



Gefördert durch:



Koordiniert durch:



Projekträger:



Machbarkeitsstudie im Rahmen des
Regionenwettbewerbs „HyLand“, Kategorie „HyExperts“
des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur

IN2H2 – Wasserstoffkonzept Ingolstadt



Konsortialpartner: Stadt Ingolstadt, IFG Ingolstadt, Ingolstädter Kommunalbetriebe, Stadtbus Ingolstadt, Stadtwerke Ingolstadt, Gunvor Raffinerie Ingolstadt, Wenger Engineering



Stadt Ingolstadt



IFG INGOLSTADT



STADTBUS
INGOLSTADT



WENGER
Engineering GmbH

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage, Potenziale, Motivation für das Thema

Ingolstadt ist ein in Wirtschaft und Wissenschaft führender Mobilitätsstandort in Deutschland. Gemeinsam mit einer prosperierenden Wissenschaft an der Technischen Hochschule Ingolstadt (THI), der Katholischen Universität Eichstätt-Ingolstadt und Forschungsinstituten gestalten die leistungsstarken Unternehmen in der Region – von Global Playern, über den starken Mittelstand bis hin zu innovativen Start-Ups – in ihrem Umfeld die Zukunft der Mobilität. Die Stadt Ingolstadt mit ihren Kommunalunternehmen versteht sich als Testfeld und Reallabor für innovative und nachhaltige Technologien und treibt entsprechende Initiativen, etwa in den Bereichen Digitalisierung und Nachhaltigkeit, künstliche Intelligenz und autonomes Fahren sowie Urban Air Mobility, voran. Die Stadt Ingolstadt hat sich zum Ziel gesetzt, nachhaltige Mobilität proaktiv zu fördern und agiert in zahlreichen Projekten als Impulsgeber und Demonstrator.

In der Transformation der Mobilität in Richtung innovativer, intelligenter Antriebsarten und Konzepte kann Wasserstoff eine bedeutsame Rolle in zukünftigen Energie- und Mobilitätssystemen spielen. In vielfältigen (Förder-)Maßnahmen und Projekten werden aktuell die Weichen für zukünftige Innovationen und Investitionen im Bereich der Wasserstofftechnologie gestellt.

Im Zuge der Bestrebungen, das wirtschafts- und innovationsfreundliche Klima in Ingolstadt zu stärken und die Voraussetzungen für die Etablierung neuartiger Technologien und Ansätze im Bereich der Mobilität zu schaffen, erfolgte 2019 mit der Bewerbung im Rahmen der ersten Phase des HyLand-Wettbewerbs die Erschließung des Innovationsfelds "Wasserstoff" als eine Pionier-Region in Deutschland.

Im Rahmen des *IN2H2*-Projekts, das in der Kategorie HyExperts durch das Bundesverkehrsministerium gefördert wurde, sollte in einem Konsortium aus kommunalen Unternehmen, Industrie und Wissenschaft ein Konzept entwickelt werden, das die technische und wirtschaftliche Machbarkeit der Einführung von Wasserstoffmobilität in der Region untersucht.

Mit der Gunvor Raffinerie Ingolstadt (GRI) verfügt Ingolstadt dabei über einen großindustriellen Wasserstoffproduzenten und -verbraucher, der sektorenübergreifende Kooperation schon über einen modernen Fernwärmeverbund mit den Stadtwerken und dem Zweckverband Müllverwertungsanlage Ingolstadt erfolgreich demonstriert hat und zudem über weitreichende verfahrenstechnische und regulatorische Kompetenz im Umgang mit Wasserstoff verfügt.

Mit dem regionalen Alleinstellungsmerkmal einer bereits jetzt verfügbaren, großen Menge an Wasserstoff und dem im Rahmen des Projekts erarbeiteten Know-How im Bereich der Wasserstoff-Technologie, konnte das *IN2H2*-Projekt einen ersten Schritt der Entwicklung hin zu einem Kompetenzzentrum für die Erforschung und Erprobung von Wasserstoff-Technologien darstellen.

Gleichzeitig kann Ingolstadt auf ein wissenschaftlich fundiertes und erprobtes Instrumentarium zur Einbindung von Bürgerinnen und Bürgern in das kommunale Innovationsmanagement zurückgreifen, um von Beginn an die Akzeptanz und Unterstützung der Öffentlichkeit für die neue Technologie mitzudenken und zu erarbeiten.

Damit waren wesentliche Grundelemente gegeben, um den Einstieg in eine lokale sektorenübergreifende Wasserstoffwirtschaft zu erproben.

Das Vorhaben bettet sich dabei treffend in die politischen Bestrebungen sowohl der europäischen, nationalen als auch bayerischen Wasserstoffstrategie ein und zählt auf die dort formulierten Zielsetzungen ein. So werden erste Weichen in Bezug auf den Aufbau eines EU-Hydrogen-Backbone-Pipeline-Netzes gestellt und die Basis für den Aufbau von Wasserstoff-Infrastrukturen geschaffen. Durch die Untersuchungen bezüglich der Anschaffung von lokal emissionsfreien Fahrzeugen und der damit verbundenen Reduktion des CO₂-Ausstoßes in den kommunalen Flotten wird darüber hinaus die Umsetzung der Clean Vehicle Directive vorangetrieben.

Die Vernetzung der Kooperationspartner in verschiedenen Gremien und Organisationen (HyLand-Netzwerk, Bayerisches Wasserstoffbündnis etc.) und der dortige intensive Erfahrungsaustausch sollten einen Beitrag zum Entstehen eines überregionalen Wasserstoffclusters leisten und den Know-How-Aufbau in der Region unterstützen.

1.2 Projektkonsortium

Das Projektteam im *IN2H2*-Projekt bestand im Kern aus kommunalen Unternehmen. Flankierend konnte darüber hinaus ein Industriepartner aus dem Bereich Wasserstoffproduktion als Projektpartner gewonnen werden. Nachfolgend werden die Unternehmen kurz beschrieben.



Stadt Ingolstadt

Die Stadt Ingolstadt ist mit über 138.000 Einwohnern eine moderne Großstadt und eine der am stärksten wachsenden Städte Deutschlands und eine innovationsstarke Mobilitätsregion. Die Stadt hat sich als Ziel gesetzt, auch weiterhin nachhaltige Mobilität proaktiv zu fördern und erklärte im Grundsatzbeschluss des Stadtrats vom 26.2.2018 seine Bereitschaft, Ingolstadt als Pilotstadt für innovative Mobilität zu positionieren. Entsprechend treibt die Stadt verschiedene Forschungs- und Zukunftsprojekte im Bereich der Mobilität der Zukunft, wie 5GoIng, KIVI und SaVe voran und ist besonders erfahren im Hinblick auf Bürgerintegration, Untersuchung und Optimierung der öffentlichen Akzeptanz sowie der Bereitstellung von Daten. Diese Expertise wurde auch im *IN2H2*-Projekt eingebracht, um das Thema Wasserstoff in Ingolstadt zu etablieren und die Bürgerinnen und Bürger frühzeitig über das Wasserstoffkonzept in Ingolstadt zu informieren. Die Stadt übernahm als Antragsteller und Zuwendungsempfänger federführend die Projektverantwortung. Sie unterstützte das Projekt zudem mit Arbeiten zur Untersuchung von Standorten sowie der Einbeziehung interner und externer Experten im Rahmen der Nachhaltigkeitsagenda.



IFG INGOLSTADT

Die IFG Ingolstadt AöR (IFG) ist die städtische Wirtschaftsförderungsgesellschaft und seit über 50 Jahren Impulsgeber, Dienstleister, Koordinator und Projektinitiator für Ingolstadt und die Region. Als Kommunalunternehmen der Stadt Ingolstadt übernimmt die IFG im Rahmen der kommunalen Daseinsvorsorge und im Auftrag der Stadt Aufgaben der Wirtschaftsförderung und des kommunalen Innovationsmanagements. Dabei wird besonderes Augenmerk auf die Gestaltung des Strukturwandels vor dem Hintergrund der Digitalisierung sowie auf die Wissenschaftsförderung und Technologie- bzw. Transferinitiativen gelegt. Mitarbeiter und Führungskräfte der IFG verfügen über langjährige Erfahrung im Projekt-, Forschungs- und Innovationsmanagement, auch im Bereich Wasserstofftechnologien und Elektromobilität, die bei *IN2H2* gewinnbringend eingesetzt werden konnten. Die IFG übernahm im Auftrag der Stadt das Projektmanagement in der Konzeptionsphase und nutzte ihre Schnittstellenkompetenz, um im Zusammenspiel zwischen Stadt, Wirtschaft und Wissenschaft neue Impulse zu setzen. Auch die Kommunikation und Koordination mit externen sowie stadtinternen Stakeholdern wurde im Projekt durch die IFG übernommen.



Die Ingolstädter Kommunalbetriebe AöR (INKB) übernehmen als städtische Tochtergesellschaft die Aufgaben der kommunalen Daseinsvorsorge (Wasserversorgung, Stadtentwässerung, Abfallwirtschaft, Stadtreinigung, Winterdienst). Dafür unterhalten sie einen Fuhrpark mit Nutzfahrzeugen und PKW-Flotte. Sie sind dabei auch Teil eines interkommunalen Netzwerks zu zahlreichen Kommunen bzw. Zweckverbänden im Umkreis. Im Rahmen des Projekts *IN2H2* ist es angedacht, einen Testbetrieb von Müllsammelfahrzeugen und Kehrmaschinen mit Brennstoffzellentechnologie aufzubauen. Damit wollen die Kommunalbetriebe Pionierarbeit bei der zukunftsorientierten Weiterentwicklung der Entsorgungswirtschaft leisten, um zukünftig als Keimzelle für übergreifende regionale Anwendungen zu fungieren. Im Zuge einer stetigen Weiterentwicklung der Fahrzeugflotte ist hierbei auch die Vernetzung mit weiterer innovativer Technik (autonomes Fahren, automatisierte Tourenoptimierung, automatische Abrechnung) möglich.



Die Stadtbus Ingolstadt GmbH (SBI) ist im Tarifgebiet des Zweckverbandes Verkehrsgemeinschaft Region Ingolstadt (VGI) das größte Nahverkehrsunternehmen. Bereits 2013 beteiligte sich die SBI an der Erforschung neuer Antriebsmodelle im regionalen ÖPNV und wurde als Testfeld für ein vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit und den Freistaat Bayern über GVFG-Fördermittel bezuschusstes Projekt ausgewählt. Den Einsatz von Wasserstoffbussen betrachtet die SBI nicht nur als ökologisches Musterprojekt, sondern als im besten Sinne nachhaltige Investition in die Zukunft. Vor dem Hintergrund in Zukunft massiv steigender Betriebskosten in Folge der CO₂-Emission für fossile Energieträger und der Vorgaben durch die Clean Vehicle Directive ist es unabdingbar, sich Alternativen mit Einsparpotentialen im Bereich des Energieeinsatzes zu suchen und sie einzusetzen. Die SBI betrachtet Wasserstoffbusse neben batterieelektrischen Fahrzeugen daher als wichtigen weiteren Schritt, zukünftig komplett emissionsfrei Mobilität sicherzustellen.



Die Stadtwerke Ingolstadt (SWI) sind in der Region gut vernetzt und profitieren täglich von einer guten und teils langjährigen Zusammenarbeit mit unterschiedlichen Unternehmen vor Ort. Als innovativer Energieversorger und Netzbetreiber sammeln die SWI außerdem bereits seit einigen Jahren Erfahrungen auf dem Zukunftsfeld der Brennstoffzellentechnik und bieten zudem passgenaue Konzepte im Bereich der dezentralen Energieversorgung an.

So können die Stadtwerke mit ihren Fachleuten auf bestehendes Knowhow aus dem Betrieb von Brennstoffzellen zurückgreifen und bringen als Netzbetreiber über Jahrzehnte gesammelte Erfahrungswerte im Bereich des Transports von gasförmigen Energieträgern mit. Weiter verfügen die SWI durch den Betrieb mehrerer Erdgas-Tankstellen auch in diesem Bereich über große Expertise. Perspektivisch beschäftigen sich die Stadtwerke mit Blick auf den Trend hin zur dezentralen Energieversorgung und energieautarkem Wohnen außerdem mit Wohn- und ganzheitlichen Quartierslösungen, in denen die Brennstoffzellentechnik auch hinsichtlich Kraftwärmekopplung eine zentrale Rolle spielt.



Die Gunvor-Raffinerie (GRI) am Stadtrand von Ingolstadt weist eine Rohölverarbeitungskapazität von 5 Mt/a auf und vertreibt über eine Marketinggesellschaft Diesel, Benzin, Heizöl, Flugkraftstoffe, Flüssiggas und Einsatzstoffe für die chemische Industrie. Gunvor betreibt eine Wasserstofferzeugungsanlage mit einer Kapazität von 1 t/h, wobei für den internen Wasserstoffverbrauch bei verschiedenen Raffinerieprozessen etwa die Hälfte dieser Menge benötigt wird. Die andere Hälfte stünde also für Auskoppelung und Aufreinigung zu einem marktfähigen Produkt zur Verfügung. Gunvor verfügt über langjährige Erfahrung im Umgang mit Wasserstoff in technischen Anlagen inklusive aller relevanten Sicherheits- und Umweltaspekte.



Die Wenger Engineering GmbH (WE) ist weltweit bekannt als führender Dienstleister zur Entwicklung und Optimierung von Wasserstoff-Infrastruktur, v.a. von Wasserstoff-Tankstellen und Power-to-Gas-Anlagen. In diesem Zuge war das Team der WE maßgeblich an der Entwicklung der geltenden Betankungsprotokolle SAE J2601 beteiligt. Aktuelle Projekte im Auftrag der WE-Kunden sind u.a. die Konzeption, Planung und das Detail Engineering von zwei sich im Aufbau befindenden Wasserstoff-Zugtankstellen, die Konzeptionierung von Wasserstoff-Nutzfahrzeugen und Forschungstankstellen (LH₂, CGH, CCH), die Auslegung von Trailer-Abfüllstationen und Wasserstoff-tankstellen inkl. Wasserstoffherzeugung mittels Elektrolyse oder Steam-Reforming.

Seit 2018 ist ein Schwerpunkt der Wenger Engineering die Konzeption und Umsetzung von integrierten Wasserstoff-Ökosystemen von der Wasserstoffherzeugung, über den Transport, die Entwicklung von der Infrastruktur bis hin zur Nutzung im Fahrzeug oder der Industrie.

Im Rahmen der Studie übernahm die Wenger Engineering GmbH die Rolle des technischen Fachberaters im Bereich Wasserstoff und verantwortete hierbei sowohl die Berechnung und Bewertung eines möglichen H₂-Ökosystems in Ingolstadt als auch die Beratung und Unterstützung der Projektpartner beim Sondieren der Möglichkeiten oder Beschaffung von Fahrzeugen.

1.3 Ziel der Machbarkeitsstudie

Vor dem Hintergrund der oben genannten zukunftsgerichteten Positionierung Ingolstadts als Vorreiterregion für innovative Mobilitätslösungen und -konzepte, bestand die Zielsetzung des Projekts im Kern darin, die technische und wirtschaftliche Machbarkeit der Einführung von Wasserstoffmobilität in kommunalen Fahrzeugflotten in Verbindung mit lokaler Produktion von (mindestens perspektivisch) grünem Wasserstoff fundiert zu untersuchen und auf Basis verschiedener Alternativpfade ein entsprechendes integriertes Umsetzungskonzept zu entwickeln. Es sollte ein klares Bild zu Chancen und Umsetzungsrouten, aber auch zu Hürden für ein H₂-Ökosystem in Ingolstadt erarbeitet werden, das die CO₂-Emissionen im Verkehr reduziert und langfristig zum Ausbau "grüner" Mobilität in der Region beitragen kann.

Das Konzept sollte darüber hinaus Ansatzpunkte für weitergehende Entwicklungspotenziale in Richtung einer regionalen Wasserstoffwirtschaft liefern, z.B. für Anwendungen im Bereich der netzfernen Energieversorgung, für Produzenten von Brennstoffzellenkomponenten oder allgemein für Dienstleister bzw. Start-ups.

Konkret fokussierte das Projekt auf der Verbraucherseite auf die Untersuchung der möglichen Einführung von Wasserstoffbussen im ÖPNV Ingolstadts bei der Stadtbus Ingolstadt GmbH (SBI) und von brennstoffzellengetriebenen Nutzfahrzeugen (Müllsammelfahrzeuge und Kehrmaschinen) bei den Ingolstädter Kommunalbetrieben AöR (INKB).

Auf der Produzentenseite war die lokale Wasserstoff-Produktion Leitmotiv des verfolgten Ansatzes. Mit der Ingolstädter Gunvor-Raffinerie steht ein industrieller Produzent zur Verfügung, bei dem die Kapazität vorhanden ist, neben dem Bedarf für die Treibstoffherstellung große Mengen an Überschuss-Wasserstoff über Dampfreformierung von Erdgas zu erzeugen.

Integraler Bestandteil der Konzepterstellung waren auch Fragestellungen zur Aus- und Weiterbildung von Fachkräften sowie zur Einbindung der Öffentlichkeit durch innovative Demonstrations- und Beteiligungsformate.

2 Ausgangslage / Status quo

Zu Beginn des Projektes im September 2020 wurden die lokalen und die nationalen Randbedingungen für ein Wasserstoff-Ökosystem beleuchtet. Dabei wurde klar, dass Wasserstoff in Deutschland für die Mobilitätsanwendung noch sehr teuer ist (9,50 € an bestehenden H₂-Mobility-Tankstellen¹) und dass dies eine der größten Hürden für ein flächendeckendes Wasserstoff-Ökosystem sein wird. Selbst wenn sich eine größere Zahl von Abnehmern finden würde, die am Thema Wasserstoff Interesse haben, so würde die Frage nach dem Preis spätestens bei den Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen dominieren. Aus diesem Grund wurde sehr früh im Projekt beschlossen, den Fokus auf Lösungen zu konzentrieren, die in der Lage sind, Wasserstoff möglichst CO₂ neutral zu marktfähigen Preisen zu produzieren und für die Abnehmer verfügbar zu machen.

2.1 Energieerzeugung und -verteilung

Die Stadtwerke Ingolstadt bestehen aus vier Unternehmen, die gemeinsam über 300 Mitarbeiter beschäftigen und rund 85.000 Kunden in Ingolstadt und der Region versorgen. Damit erwirtschaften sie einen jährlichen Umsatz von über 200 Mio. Euro.

Für die Sparten Strom, Erdgas, Fernwärme übernehmen die Stadtwerke in einer jeweils eigenen Gesellschaft die Funktionen des Netzbetreibers/Energieversorgers für Ingolstadt und die Region.

Durch bereits im Wärmebereich aufgebaute Kooperationen mit ansässigen Partnern wie der Gunvor-Raffinerie und der Müllverwertungsanlage (MVA), sowie dem eigenständigen Betrieb von Windparks, Solar- und Biogasanlagen tragen die Stadtwerke durch ihr Engagement, Netz und übergreifende Kooperationen bereits heute dazu bei, jährlich mehr als 188.000 t CO₂ in der Region einzusparen. Darüber hinaus trägt auch die Beschaffung von Ökostrom zur CO₂-Einsparung bei. Ziel der Stadtwerke ist es, in den nächsten Jahren den Ausbau der erneuerbaren Energien beispielweise über Solar-Freiflächenanlagen in der Region weiter voranzutreiben und die bestehenden Lademöglichkeiten für die Elektromobilität weiter auszubauen.

¹ www.h2.live (abgerufen am 30.09.2021)

Mit der zunehmenden Bedeutung von Wasserstoff streben die Stadtwerke an, den Kunden perspektivisch auch in dieser Sparte Lösungen anzubieten. Dies beginnt bei der Erzeugung und der Beschaffung von Wasserstoff, der Schaffung von Betankungsmöglichkeiten und reicht bis zur Beimischung im Erdgasnetz. Hierfür bildet die Verwurzelung in der Region und die Zusammenarbeit mit weiteren Projektpartnern eine gute Ausgangsbasis.

2.2 ÖPNV / SPNV

Der Stadtverkehr Ingolstadt mit den abgehenden Linienabschnitten in die Landkreise wird derzeit mit 110 eigenen und 23 angemieteten Dieselnissen von der Stadtbuss Ingolstadt GmbH betrieben. Davon sind aktuell bereits 74 Busse mit einer Hybridkomponente ausgerüstet. Die täglichen Fahrzeugumlaufstrecken im Stadtverkehr Ingolstadt betragen zwischen 35 und 380 km. Auch die hohen Umlaufstrecken stellen für Diesel-Hybridbusse kein Problem dar, so dass derzeit der gesamte Fuhrpark freizügig auf allen Fahrzeugumläufen eingesetzt werden kann. Die aktuelle Betriebshofsituation beim kommunalen Verkehrsunternehmen Stadtbuss Ingolstadt gestattet ausschließlich die Blockabstellung von Fahrzeugen. Das heißt, dass die Fahrzeuge nicht freizügig aus dem Betriebshof aus- bzw. einfahren können, sondern dass entweder nach dem „First-In-First-Out“-Prinzip (1 Betriebshof) oder nach dem „Last-In-First-Out“-Prinzip (anderer Betriebshof) gearbeitet werden muss.

Die Anbindung des Flughafens München (MUC) an den Großraum Ingolstadt erfolgt mittels des „Ingolstädter Airport Expresses“, einer Fernbuslinie. Die dort eingesetzten Fahrzeugumläufe betragen vor Beginn der Corona-Pandemie 1.000 km pro Verkehrstag. Diese Werte sind ausschließlich mit Dieselnissen oder Brennstoffzellenbussen zu erreichen, da kurze Betankungszeiten notwendig sind.

2.3 Abfallentsorgung

Die Ingolstädter Kommunalbetriebe AöR sind ein Kommunalunternehmen der Stadt Ingolstadt und mit den Aufgaben der kommunalen Daseinsvorsorge (Wasserversorgung, Stadtentwässerung, Abfallwirtschaft, Stadtreinigung und Winterdienst) betraut.

Neben dem eigenen Fuhrpark wird in diesem Rahmen auch die gesamte städtische Dienstwagenflotte (Nutzfahrzeuge sowie PKW-Fuhrpark) – mit Ausnahme der Sonderfahrzeuge der Feuerwehr – zentral durch die INKB verwaltet (Beschaffung, Wartung, Distribution).

Insgesamt umfasst der Fuhrpark der INKB damit 43 LKW, 98 Transporter und 86 PKW sowie weitere Sonderfahrzeuge (Kehrmaschinen, Schmalspurfahrzeuge, etc.). Pro Jahr werden in diesem Zusammenhang rund 468.000 Liter Treibstoffe (Diesel und Benzin) verbraucht.

Im Bereich der Abfallentsorgung werden 13 Abfallsammelfahrzeuge im Rahmen der hoheitlichen Aufgabe der Müllabfuhr zur Sammlung von Rest-, Bio-, Sperr- und Papiermüll im Stadtgebiet eingesetzt. Im Bereich der Straßenreinigung setzen die INKB jeweils vier kleine und vier mittlere Kehrmaschinen sowie eine LKW-Großkehrmaschine im Rahmen ihrer gesetzlichen Aufgabe der Straßenreinigung im innerstädtischen Bereich in Ingolstadt ein.

Der Treibstoffverbrauch für die 13 Abfallsammelfahrzeuge und die LKW-Großkehrmaschine beträgt rund 163.000 Liter/Jahr. Dies entspricht bei 2,65 kg CO₂/Liter Diesel einem Ausstoß von rund 431.950 kg CO₂ pro Jahr. Ziel der Kommunalbetriebe ist es, die Daseinsvorsorge zukünftig CO₂-neutral zu betreiben.

Die Fahrzeuge sind in der Regel rund 240 Tage im Jahr im Einsatz und kommen dadurch jährlich auf jeweils ca. 1.750 Betriebsstunden. Die erwartete jährliche Fahrleistung liegt dabei bei rund 25.000 km pro Abfallsammel- bzw. Kehrfahrzeug.

2.4 Industrie

Die Gunvor-Raffinerie liegt verkehrsgünstig am Stadtrand von Ingolstadt, weist eine Rohölverarbeitungskapazität von 5 Mt/a auf. Gunvor verfügt über eine Dampfreformieranlage mit einer Wasserstoffproduktionskapazität von 1 t/h. Von dieser Menge werden für interne Entschwefelungs- und Benzinveredelungsprozesse ca. die Hälfte benötigt. Die andere Hälfte stünde also für Auskoppelung und Aufreinigung zu einem marktfähigen Produkt zur Verfügung. Als Kraftstofflieferant beteiligt sich Gunvor aktiv an der Energiewende in den Bereichen Verkehr und Mobilität, u.a. als Mitglied des *IN2H2*-Konsortiums und des Wasserstoffbündnis Bayern und hat seit über einem Jahrzehnt erfolgreich die branchenübergreifende Zusammenarbeit durch die Fernwärmeallianz mit den Stadtwerken Ingolstadt und der Müllverbrennungsanlage demonstriert zur deutlichen Reduzierung des regionalen CO₂-Fußabdrucks.

3 Erzeugung

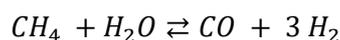
Im Rahmen des Projektes wurden die Rahmenbedingungen und Möglichkeiten zur Errichtung einer lokalen Wasserstofferzeugung untersucht. Hierbei wurden sowohl verschiedene Standorte als auch der Einsatz verschiedener technischer Pfade berücksichtigt. Im Folgenden werden die betrachteten Erzeugungspfade vorgestellt und anschließend in einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung anhand der Gesamtkosten des Betriebes (kurz: TCO) verglichen. Während der Analyse der verschiedenen Erzeugungspfade gewann die Farbgebung des erzeugten Wasserstoffes aufgrund der regulatorischen Rahmenbedingungen und ihrer ökonomischen Auswirkungen zunehmend an Bedeutung. Das diesbezüglich in Auftrag gegebene Rechtsgutachten wird in Kapitel 3.3 nochmal zusammengefasst wiedergegeben.

3.1 H₂ Erzeugungspfade

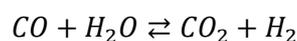
3.1.1 Dampfreformierung

3.1.1.1 Beschreibung der Technologie

Dampfreformierung ist aktuell das am weitesten verbreitete Wasserstofferzeugungsverfahren. Während des Prozesses werden Wasserstoff und Kohlenstoffmonoxid aus der Reaktion einer kohlenstoffhaltigen Verbindung mit Wasser gewonnen. Die kohlenstoffhaltige Verbindung ist meistens Methan, jedoch werden auch Leichtbenzin, Methanol, Biogas und Biomasse als Edukt für die Dampfreformierung genutzt. Die Reaktion läuft in zwei Schritten ab. Im ersten Schritt reagiert ein Kohlenstoffträger mit Wasser unter hohen Temperaturen und erhöhtem Druck zu Kohlenstoffmonoxid und Wasserstoff.



Im zweiten Schritt folgt eine Wassergas-Shift-Reaktion, welche einerseits giftiges Kohlenstoffmonoxid umwandelt und andererseits eine höhere Wasserstoffausbeute ermöglicht. Hierbei reagiert Kohlenstoffmonoxid mit Wasser zu Kohlenstoffdioxid und einem Wasserstoffmolekül.



Der produzierte Wasserstoff gilt als grauer Wasserstoff, da seine Produktion aus fossilen Kohlenstoffquellen mit hoher Kohlenstoffdioxidproduktion verbunden ist. Er kann zu blauem Wasserstoff werden, wenn das entstehende Kohlenstoffdioxid gespeichert wird ("Carbon Capture and Storage"). Gemäß der europäischen CertifHy-Initiative muss eine Reduktion der CO₂-Emissionen um mindestens 60% auf 36.4 g CO_{2eq}/MJ_{H2} erreicht werden, um Wasserstoff mit einer niedrigen Intensität an Kohlenstoff-Emissionen zu erzeugen.

3.1.1.2 Standort GRI

In der Gunvor-Raffinerie Ingolstadt werden bei Reformierungsprozessen größere Mengen Wasserstoff (1,2-1,5 t/h) erzeugt. Zusätzlich betreibt die Raffinerie eine separate Wasserstofferzeugungsanlage mit einer Kapazität von 1 t/h nach dem Verfahren der Dampfreformierung mit Raffineriegas oder Erdgas (über das Netz der Stadtwerke Ingolstadt bezogen) als Einsatzstoff, die nur zum Teil (~500 kg/h) raffinerieintern benötigt werden.

Durch die Installation einer zusätzlichen Einheit zur Aufreinigung des nicht für die Raffinerie-Prozesse benötigten überschüssigen Wasserstoffs können die hohen Qualitätsanforderungen für den Einsatz in der Mobilität ohne Weiteres erfüllt werden. Die Investitionskosten für eine solche PSA-Aufreinigung belaufen sich auf 1,5 Mio. €. Da der eigentliche Produktionsprozess bereits besteht, fallen hierfür keine weiteren Investitionskosten an. Somit stellt die Dampfreformierung den H₂-Erzeugungspfad mit den niedrigsten Investitionskosten dar.

Für die Grünstellung des Prozesses wurde der Einsatz von Biogas anstatt Erdgas betrachtet. Dieses kann aus dem Erdgasnetz von den Stadtwerken Ingolstadt bezogen werden. Wird auch der eingesetzte Dampf bilanziell emissionsfrei gestellt, werden mehr als 60% der CO₂-Emissionen auf ein Niveau kleiner 36.4 g CO_{2eq}/MJ_{H2} gegenüber der klassischen Dampfreformierung eingespart. Gemäß der Definition des europäischen Projektes CertifHy kann der Wasserstoff demnach als grün bezeichnet werden.² Auch gemäß dem TÜV-Süd Standard CMS70, welcher im Januar 2020 veröffentlicht wurde, führt der beschriebene Ansatz zu grünem Wasserstoff.³

3.1.1.3 Standort BioIN

Die Kommunalbetriebe der Stadt Ingolstadt sind Mehrheitsgesellschafter der BioIN GmbH, die im Nord-Osten der Stadt eine Biogasanlage zur Verwertung von biogenen Abfällen betreibt. Dabei entstehen ca. 5.000 Nm³ Biomethan pro Tag. Aktuell wird das entstehende Biomethan direkt vor Ort verstromt. Hierbei werden 4.500 MWh pro Jahr ins Stromnetz eingespeist. Die Stromproduktion ist noch bis in Jahr 2030 gefördert und wird mit 190 €/MWh vergütet.

Generell ist die Verwendung des Biomethans im Rahmen einer H₂-Erzeugung aus ökonomischer Sicht erst sinnvoll nach dem Jahr 2030, wenn die aktuelle Förderung des produzierten Stroms ausläuft. Daher wurde dieser Standort in die Betrachtung einer möglichen Infrastruktur nicht mehr weiter mit einbezogen.

² CertifHy-Projekt (CertifHy, 2020)

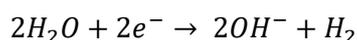
³ TÜV-SÜD Standard CMS 70 (TÜV SÜD Industrie Service GmbH, 2020)

3.1.2 Elektrolyse

3.1.2.1 Beschreibung der Technologie

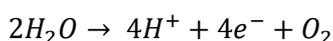
Der Prozess der Elektrolyse beschreibt die Spaltung von H₂O mittels elektrischer Energie. Hierbei wird eine Gleichspannung an zwei Elektroden angelegt, um die nötigen Reaktionen hervorzurufen. An der Kathode werden H₂-Moleküle und an der Anode O₂-Moleküle produziert und abgeführt. Die Reaktionsräume werden durch eine Membran getrennt, um das Mischen der Produktgase zu verhindern. Stand der Technik sind zwei Elektrolysearten, die Alkalische und die Protonen-Austausch-Membran-Elektrolyse. Die Hauptunterschiede der Elektrolysen sind die Elektrolyten, die Ladung der Ionen und die Beschaffenheit der Membran.⁴

Die Alkalische Elektrolyse (kurz ALE) ist das etablierteste Elektrolyseverfahren und nutzt eine mikroporöse, ionenleitende Membran sowie einen flüssigen Elektrolyten (meistens eine Kaliumhydroxidlösung). Aus Nickel gefertigte Elektroden ermöglichen den benötigten Gleichstrom. Die entstehenden, reagierenden Ionen dieser Elektrolyse sind negativ geladene Hydroxidionen (OH⁻), welche durch die Spaltung von Wasser an der Kathode entstehen.

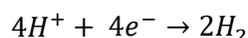


Der entstehende Wasserstoff kann als Gas aus dem Kathodenraum abgeführt werden. Die Hydroxidionen gelangen durch die Membran in den Reaktionsraum der Anode und reagieren dort zu O₂. Der Wirkungsgrad bei einer alkalischen Elektrolyse liegt aktuell bei etwa 65%.⁵

Bei der Protonen-Austausch-Membran-Elektrolyse (kurz: PEM) hingegen findet die Reaktion in saurem Milieu statt, weshalb zuerst an der Anode eine Reaktion stattfindet. Bei der Spaltung von H₂O entstehen hierbei H⁺- Ionen und gasförmiger Sauerstoff (O₂), welcher im Anodenraum abgeführt wird.



Die H⁺-Ionen gelangen durch eine protonenleitende Kunststoff-Membran zu der Kathode, an der sie weiter zu H₂ reagieren.



Aufgrund der sauren Umgebung müssen die Elektroden aus einem Edelmetall wie Iridium oder Platin gefertigt sein.³ Der Wirkungsgrad einer PEM-Elektrolyse liegt aktuell bei etwa 63%.⁴ Ein großer Vorteil der PEM-Elektrolyse ist ein gutes Lastwechselverhalten. Dies ermöglicht den Einsatz bei schwankender Stromzufuhr, wie sie bei der Erzeugung durch erneuerbare Quellen vorkommen kann.

⁴ (Milanzi, et al., 2018)

⁵ (Smolinka, 2018)

3.1.2.2 Einflussfaktoren der Standortwahl

Einflussfaktoren ohne Bezug zum Energiesystem

Zunächst sollen Einflussfaktoren für die Standortwahl und Betriebsweise von Elektrolyseuren analysiert werden, die nicht unmittelbar das Energiesystem betreffen. Hierzu können beispielsweise folgende Aspekte gehören:

- Synergien mit anderen Prozessen bei den Verbrauchern von Wasserstoff einschließlich der Nutzung von Nebenprodukten wie Sauerstoff oder Abwärme und Verfügbarkeit von anderen Rohstoffen, die für die Verwertung des Wasserstoffs (z.B. in der chemischen Industrie) benötigt werden
- bestehende Industriestandorte mit Interesse an einer eigenen Elektrolyse
- Lieferanten-, Kunden- und allgemeine Versorgungsstrukturen
- Bedarfsstrukturen im Verkehr (z.B. Lkw-, Flug-, Schiffsverkehr)

Energiesystemische Einflussfaktoren

Anschließend sollen Einflussfaktoren analysiert werden, die aus Sicht des Energiesystems die Standortwahl und Betriebsweise beeinflussen. Hierzu gehören unter anderem folgende Aspekte:

- *Stromerzeugung*: Die Standortwahl und Betriebsweise von Elektrolyseuren hängt unter anderem von den Stromerzeugungspotenzialen und der Einbindung in das Stromsystem ab. Die Stromerzeugungstechnologien und Standorte von Erneuerbare-Energien-Anlagen unterscheiden sich hinsichtlich ihrer
 - Standortgüte
 - Volllaststunden
 - zeitlichen Erzeugungsprofile
 - Stromgestehungskosten

Diese Faktoren beeinflussen letztlich die Stromkosten für den Betrieb der Elektrolyse. Dies gilt insbesondere für Elektrolyseure, die nicht an das Stromnetz angeschlossen sind und ihren Strom ausschließlich über eine direkte Verbindung zu Stromerzeugungsanlagen beziehen. Aus Systemsicht könnte eine Anbindung der Elektrolyseure an das Stromnetz sinnvoll sein, da das Stromerzeugungsprofil von einzelnen Anlagen volatiler ist als die Einspeisung aus erneuerbaren Anlagen im Gesamtsystem. Dies könnte den Ausnutzungsgrad des erneuerbaren Stroms und damit die Wirtschaftlichkeit der Wasserstoffherzeugung erhöhen. Zugleich ergeben sich in diesem Fall insbesondere kurz- und mittelfristig, solange noch höhere Anteile fossiler Stromerzeugungskapazitäten am Strommarkt vorhanden sind, Herausforderungen entsprechend der aktuellen gesetzlichen Lage im Hinblick auf den Nachweis der erneuerbaren Eigenschaft des Wasserstoffs.

- **Speicherpotenziale:** Bei einem zeitlich asynchronen Verlauf von Wasserstoffherzeugung und -verbrauch könnten die Speicherpotenziale für Wasserstoff einen erheblichen Einfluss auf die Standortwahl und ggf. auch Betriebsweise der Elektrolyseure haben. Beispielsweise könnte ein langfristig saisonal erforderlicher Einsatz von Wasserstoff zur Strom- und ggf. Wärmeerzeugung nicht mit dem Erzeugungsprofil des erneuerbaren Stroms zusammenfallen, wenn beispielsweise bei gemeinsamer Betrachtung Wind- und Solarstrom im Frühling und Herbst ein besonders hohes Erzeugungsniveau aufweisen. Dementsprechend ist das Potenzial zur Wasserstoffspeicherung ggf. auch für importierten Wasserstoff zu berücksichtigen.
- **Netze:** Im Zusammenhang mit der Standortwahl und der Betriebsweise von Elektrolyseuren sind diverse Netzfragen zu berücksichtigen und abzuwägen. Aus Sicht des Stromsystems sollte die Elektrolyse möglichst geringe zusätzliche Belastungen der Stromnetze hervorrufen, um den Netzausbau- und Redispatch-Bedarf zu begrenzen. Ferner können Elektrolyseure mit erheblichen Netzanschlussleistungen einhergehen. Im Hinblick auf die Gas- bzw. Wasserstofftransportinfrastruktur sind der zeitliche Vorlauf und die Kosten des Transformationsprozesses sowie die genaue Struktur im Hinblick auf eine Wasserstoffinfrastruktur zu berücksichtigen. Zudem sind mögliche Einspeiserestriktionen, technische Grenzen und etwaige Netzengpässe zu berücksichtigen.

3.1.2.3 Mögliche Standorte

Solar- und Windparks

In der Umgebung von Ingolstadt gibt es einige Solar- und Windparks, für die eine Erweiterung mittels einer H₂-Erzeugung denkbar ist. Diese sind:

- Windpark in Kronach in Franken mit 5 x 2,75 MW = 13,75 MW (Stromerzeugung zu 85 EUR/MWh möglich)
- PV-Anlage auf dem Audi Sportpark mit 560 kWp
- in Karlshuld wird ein weiterer großer Solarpark projektiert

Da sich alle Parks in einem Umkreis von 200 km um Ingolstadt befinden, und damit ähnliche Voraussetzungen für den Aufbau einer H₂-Infrastruktur bieten, wurde für den Vergleich der einzelnen Produktionspfade nicht zwischen den Standorten der einzelnen Solar- und Windparks unterschieden. Stattdessen werden in der nachfolgenden Auflistung die unterschiedlichen Eigenschaften generell für Wind und PV-Parks unterschieden. Zusätzlich ist die SWI noch an weiteren Parks zur Erzeugung von erneuerbarem Strom beteiligt, diese sind jedoch aufgrund der größeren Entfernung zu Ingolstadt für eine H₂-Produktion für Ingolstadt nicht geeignet.

Müllverbrennungsanlage

Ein Zweckverband aus fünf umliegenden Landkreisen und der Stadt Ingolstadt betreibt die MVA. Die dabei entstehende thermische Energie wird primär für die Versorgung des bestehenden Fernwärmenetzes eingesetzt. Überschüssige Energie wird verstromt. Im Jahr 2019 wurden hierbei 80.000 MWh Strom erzeugt, wovon 50% als regenerativer, grüner Strom angerechnet werden können.

Unter der Annahme, dass ausschließlich grüner Strom für die H₂-Erzeugung eingesetzt werden soll, könnte hier eine Elektrolyse mit einer Leistung von bis zu 4,5 MWel installiert werden. Dies führt zu einer maximalen Produktion von 2.000 kg H₂ pro Tag. Ist weiterhin eine über das Jahr bilanzielle Gleichverteilung des grünen Stromes gegeben, so kann eine Auslastung der Elektrolyse von bis zu 8.000 h pro Jahr angenommen werden. Dies würde jedoch eine Priorisierung der Elektrolyse gegenüber der CO₂-armen Fernwärmeversorgung bedeuten, was aktuell nicht vorgesehen ist. Vielmehr soll mittelfristig die Fernwärme noch ausgebaut werden.

Tabelle 1: Vergleich der Standorte anhand energiesystemischer und sonstiger Einflussfaktoren

Standort	Energiesystemische Einflussfaktoren					Sonstige Einflussfaktoren
	Strom- bezug	techn. mögl. Volllast- stunden [h]	Strom- kosten [ct/kWh]	Maximale Leistung/ Netzanschluss	Speicherung (bei saisonalen Schwankungen wird eine Spei- cherung des erzeugten H ₂ für die Wintermo- nate notwendig)	
Windpark	von Wind- park	1.600 ⁶	5,5	13-20 MW	<ul style="list-style-type: none"> • Saisonale Schwankungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Keine Belastung des Stromnetzes
PV	von PV- Park	1.000 ⁷	5	560 kWp – 110 MWp	<ul style="list-style-type: none"> • Saisonale Schwankungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Keine Belastung des Stromnetzes
MVA	durch MVA	8.000	5	9 MW mix 4,5 MW grün	<ul style="list-style-type: none"> • Keine Saisonalen Schwankungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Keine Belastung des Stromnetzes • Fokus auf Wärmebereitstellung, Strom ist untergeordnetes Neben- produkt
Gunvor	aus Netz	8.000	< 10 ⁸	Keine Limitierung, da Netzanschluss auf Hoch- spannungsebene	<ul style="list-style-type: none"> • Keine Saisonalen Schwankungen • großskalige Trailer-Abfüllung di- rekt bei Erzeugung (=mobile Speicher) • Verkauf von H₂ mit großer Reich- weite 	<ul style="list-style-type: none"> • Überschüssiger H₂ kann in Raffi- nerieprozess eingesetzt werden • Raffineriestandort bietet optimale Voraussetzungen für Betrieb

⁶ Durchschnittliche Volllaststunden für 2012 bis 2017 (Fraunhofer IWES, 2021)

⁷ Volllaststunden für PV Freiflächen in Deutschland (Harry Wirth, Fraunhofer ISE, 2021)

⁸ Strompreis inkl. Netzaufgaben und Steuern unter Annahme der aktuell geltenden Befreiungen für Großverbraucher und direkten Anschluss an das Hochspannungsnetz. Eine detaillierte Auflistung des Strompreises ist im Anhang gegeben

3.1.3 Hochtemperaturelektrolyse

Der Prozess der Dampfelektrolyse oder Solid Oxid Electrolyser Cell (SOEC) zeichnet sich durch einen höheren elektrischen Wirkungsgrad im Vergleich zur Alkali- oder PEM-Elektrolyse aus.⁹ Der Prozess läuft bei 100°C bis 800°C, wodurch die Thermolyse des Wassers deutlich effizienter ablaufen kann. Ein Großteil der Wärme wird dabei durch überhitzten Wasserdampf eingebracht, wodurch elektrische Energie gespart wird. Die Sunfire GmbH gibt den Wirkungsgrad bezogen auf die elektrische Energie mit 82% an.¹⁰

Bei der GRI ist für die energetische Kopplung verschiedener Prozesse bereits ein Dampfnetzwerk auf verschiedenen Druckniveaus vorhanden, wodurch der Einsatz einer Dampfelektrolyse ermöglicht wird.

Aktuell wird die SOEC ausschließlich von der Sunfire GmbH angeboten. Die aktuelle Produktreihe der Sunfire-HyLink SOEC wird überarbeitet, weshalb für den angefragten Zeitraum in den Jahren 2022 und 2023 keine Lieferung mehr möglich ist. Alternativ wurde von der Sunfire GmbH angeboten, einen Prototyp der neuen Produktgeneration der Sunfire-HyLink SOEC bis Ende des Jahres 2023 bei der GRI zu installieren. Die neue Produktgeneration soll nach Angaben der Sunfire GmbH eine deutlich verringerte Degradation und damit deutlich längere Standzeiten aufweisen. Die aktuell erhältliche Sunfire-HyLink SOEC hat eine Standzeit von ca. 10 Jahren (die tatsächliche Standzeit hängt vom tatsächlichen Betrieb ab). Diese ist deutlich kürzer als bei einer klassischen PEM oder Alkali Elektrolyse und ist damit auch der größte Nachteil der SOEC.

Für die Energiebereitstellung ist auch hier die ausschließliche Versorgung mit grünem, regenerativem Strom aus dem Hochspannungsnetz am Anschlusspunkt der GRI berücksichtigt. Der zugrunde gelegte Strompreis wurde gemäß geltenden Gesetzen des Strommarktes unter Berücksichtigung geltender Reduktionen für Großverbraucher und Betreiber einer Elektrolyse ermittelt (siehe Anhang 9). Um 100% grünen Wasserstoff zu erzeugen, muss auch der eingesetzte Dampf bilanziell grün gestellt werden.

⁹ (Milanzi, et al., 2018)

¹⁰ (Sunfire GmbH, 2021)

3.2 Wirtschaftlichkeitsberechnung

Für die Bestimmung der Gesamtkosten des Betriebs wurden sowohl die Anschaffungskosten (kurz: CAPEX) als auch die laufenden Betriebskosten (kurz: OPEX) berücksichtigt. Für die Anschaffungskosten wurde ein Abschreibungszeitraum von 10 Jahren angenommen. Außerdem wurden die Anschaffungskosten um die folgenden Punkte erhöht:

- 10% Risikoreserve
- 10% für die Installation und den Aufbau der entsprechenden Anlage
- 5% für die Anlagenperipherie, Verrohrung etc.

Für die Bestimmung der OPEX wurden Wartungskosten in Höhe von 5% der CAPEX angenommen. Für die Dampfreformierung wurden die bekannten laufenden Kosten gemäß den Angaben der GRI angesetzt. Für die hierfür benötigte PSA-Aufreinigung wurden Wartungskosten in Höhe von 7% angenommen, da hier u.a. regelmäßig das Adsorbens ausgetauscht werden muss.

Die Kosten für Wasser und Energie (Strom oder Gas) wurden gemäß der Wasserstoffproduktion berechnet. Gemäß den Angaben verschiedener Hersteller wurde für den Stromverbrauch für Alkali- und PEM-Elektrolyse 55 kWh pro produziertem kg Wasserstoff und für die Dampfelektrolyse 42 kWh pro produziertem kg Wasserstoff vorausgesetzt. Für die Stromkosten pro kWh wurden die in Tabelle 1 genannten Kosten angesetzt.

Für den Vergleich der einzelnen H₂-Erzeugungspfade wurden jeweils zwei Szenarien betrachtet:

1. Die Produktion von 1.200 kg H₂ pro Tag (siehe Abbildung 1). Dies entspricht der Wasserstoffmenge, die die Fahrzeugflotten der SBI und INKB perspektivisch benötigen würden (siehe Kapitel 5.4).
2. Maximale Auslastung der H₂-Erzeugung (siehe Abbildung 2).

Um eine Produktion von 1.200 kg H₂ pro Tag an einem Wind oder PV-Park zu gewährleisten, muss aufgrund der schwankenden Stromproduktion und der daraus resultierenden geringeren Betriebsstunden die dort installierte Elektrolyse größer dimensioniert werden (siehe Tabelle 2).

Für eine bessere Vergleichbarkeit wurden die H₂-Erzeugungspfade am Standort der GRI jeweils mit einer maximalen Produktionskapazität von 5.000 kg H₂ pro Tag angenommen. Dies entspricht der minimalen Produktionsrate der Dampfreformierung. Des Weiteren wird bei einer (perspektivischen) Auslegung der H₂-Erzeugung auf diese Produktionsmengen eine mögliche Versorgung mehrerer H₂-Abnehmer berücksichtigt. Im Rahmen der Studie konnte ein großes Interesse am Thema Wasserstoff in der Region festgestellt werden (siehe Kapitel 5.4).

Tabelle 2: Gesamtkosten der H₂-Erzeugungspfade

	SMR		HT-ELY als Prototyp		ELY		ELY-PV	ELY-Wind	ELY-MVA	
CAPEX	1,9 Mio.€		12,5 Mio.€		13,6 Mio.€		26,0 Mio.€	15,6 Mio.€	5,2 Mio.€	
OPEX	2,2 Mio.€	7,0 Mio.€	3 Mio.€	6,7 Mio.€	3,2 Mio.€	7,4 Mio.€	0,5 Mio.€	0,6 Mio.€	1,5 Mio.€	2,3 Mio.€
Förderung	-		4,0 Mio.€		4,2 Mio.€		1,1 Mio.€	1,1 Mio.€	-	
CAPEX m.F. ¹¹	-		8,5 Mio.€		9,4 Mio.€		2,8 Mio.€	2,8 Mio.€	-	
H ₂ -Kosten	5,14 €/kg	3,92 €/kg	9,04 €/kg	4,33 €/kg	9,79 €/kg	4,68 €/kg	12,23 €/kg	8,96 €/kg	4,68 €/kg	3,92 €/kg
H ₂ -Kosten m.F. ¹¹	-	-	8,19 €/kg	4,12 €/kg	8,93 €/kg	4,46 €/kg	10,50 €/kg	7,88 €/kg	-	-
Produktionskapazität	5.000 kg/d	5.000 kg/d	5.000 kg/d	5.000 kg/d	5.000 kg/d	5.000 kg/d	10.000 kg/d	6.000 kg/d	2.000 kg/d	2.000 kg/d
Auslastung	25% / 1.200 kg/d	100% / 5.000 kg/d	25% / 1.200 kg/d	100% / 5.000 kg/d	25% / 1.200 kg/d	100% / 5.000 kg/d	1.200 kg/d	1.200 kg/d	1.200 kg/d	2.000 kg/d

¹¹ m.F.: mit möglicher Förderung durch das HyPerformer-Programm von NOW/BMVI, Förderquoten aus 1. HyLand-Runde 19/20 (z.B. 40% Elektrolyse-Anlage, 40% Tankstellen-Infrastruktur, 80% der Mehrkosten für Fahrzeuge)

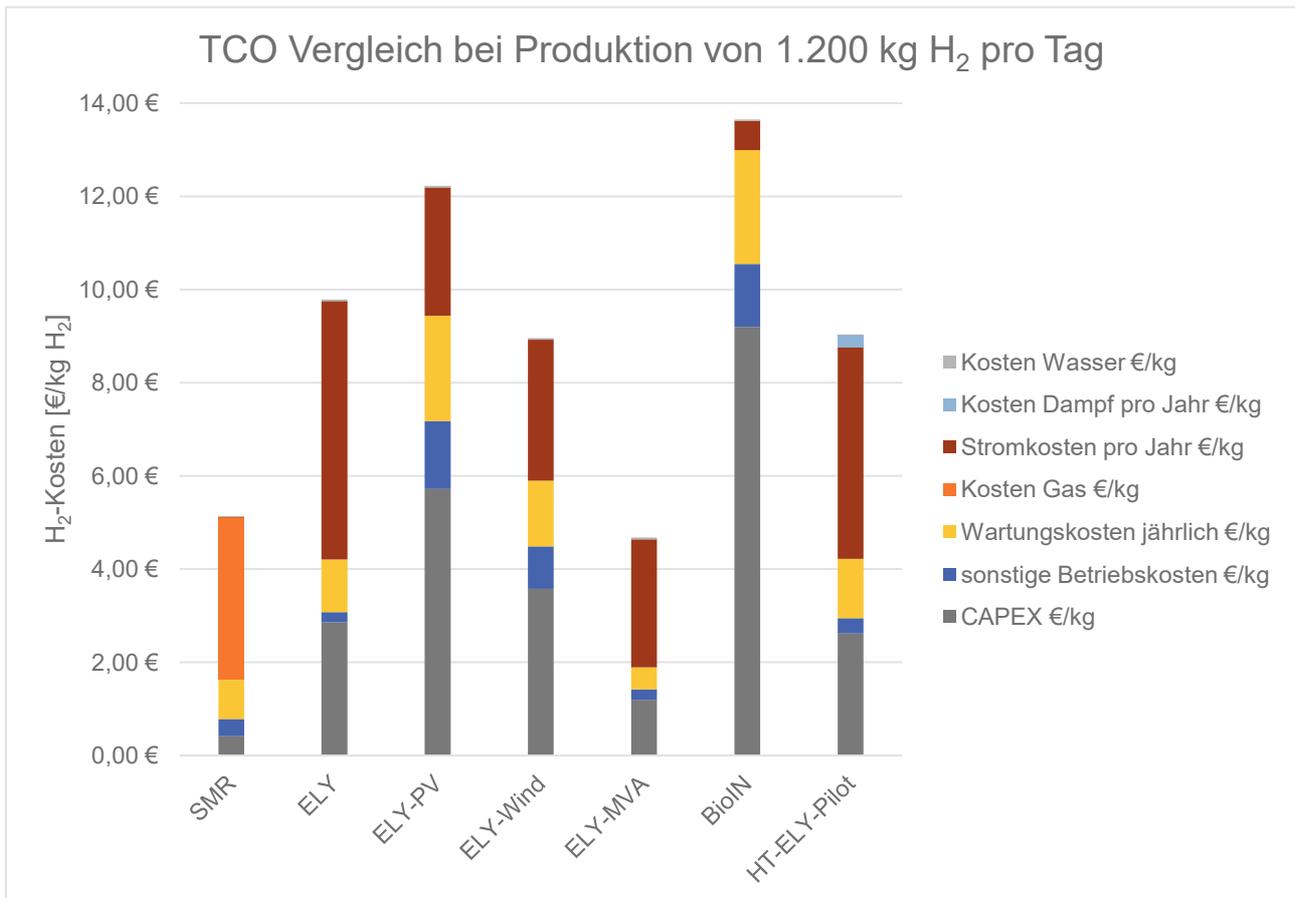


Abbildung 1: Vergleich der TCO in €/kg H₂ der verschiedenen Möglichkeiten der H₂-Erzeugung in Ingolstadt bei einer Produktion von 1.200 kg H₂ pro Tag, das entspricht 25% Auslastung.

Die Betrachtung der möglichen H₂-Erzeugungspfade zeigt, dass eine Elektrolyse an einem PV oder Windpark durch die stark schwankende Stromproduktion auf nur wenige Betriebsstunden kommt und damit aus rein wirtschaftlicher Sicht ausscheidet. Durch die geringe Auslastung der Erzeugungsanlage ergeben sich hohe Kosten pro kg Wasserstoff.

Stattdessen könnte über den Abschluss von PPAs und den Kauf von Herkunftsnachweisen grüner Strom über das öffentliche Netz bereitgestellt werden. Da die GRI bereits über einen Anschluss an das Hochspannungsnetz sowie die nötige Infrastruktur an Transformatoren verfügt, erwies sich dieser Standort für alle Arten der Elektrolyse als optimal. Durch den direkten Anschluss an das Hochspannungsnetz lassen sich die Netzaufgaben drastisch reduzieren (siehe Anhang 9). Eine weitere Reduktion der Abgaben kann erreicht werden durch den Antrag auf Befreiung von besonderen Belastungen. Dieser ist für Großverbraucher, die mehr als 1.000 MWh Strom pro Jahr verbrauchen. Für die vorgeschlagenen Produktionskapazitäten von 1.200 kg/d bis 5.000 kg/d ist dies der Fall.

Der oben beschriebene Trend ist noch deutlicher ersichtlich, wenn die maximal mögliche Auslastung betrachtet wird (siehe Abbildung 2).

Mit einer Elektrolyse an der Müllverbrennungsanlage wird ebenfalls sehr günstiger Wasserstoff erzeugt. Auch hier begründen sich die geringen Kosten in der hohen Auslastung der Elektrolyse. Für die MVA ist ein ganzjähriger Betrieb, 24/7 angenommen, weshalb auch die Elektrolyse mit bis zu 8.000 Betriebsstunden pro Jahr angesetzt wurde. Dies setzt allerdings einen Fokus der Energieerzeugung der MVA auf die Stromproduktion voraus. Diese Annahme ist nicht gegeben. Die MVA fokussiert aktuell primär auf die Versorgung des Fernwärmenetzes, welches in Zukunft noch ausgebaut werden soll. Des Weiteren ist der produzierte Strom bereits an langfristige Verträge gebunden, so dass für dieses Erzeugungsszenario lediglich mittelfristig eine Elektrolyse mit einer Produktionskapazität von deutlich unter 2.000 kg Wasserstoff pro Tag denkbar ist. Daher wurde dieser Standort in die Betrachtung einer möglichen Infrastruktur nicht mehr weiter mit einbezogen.

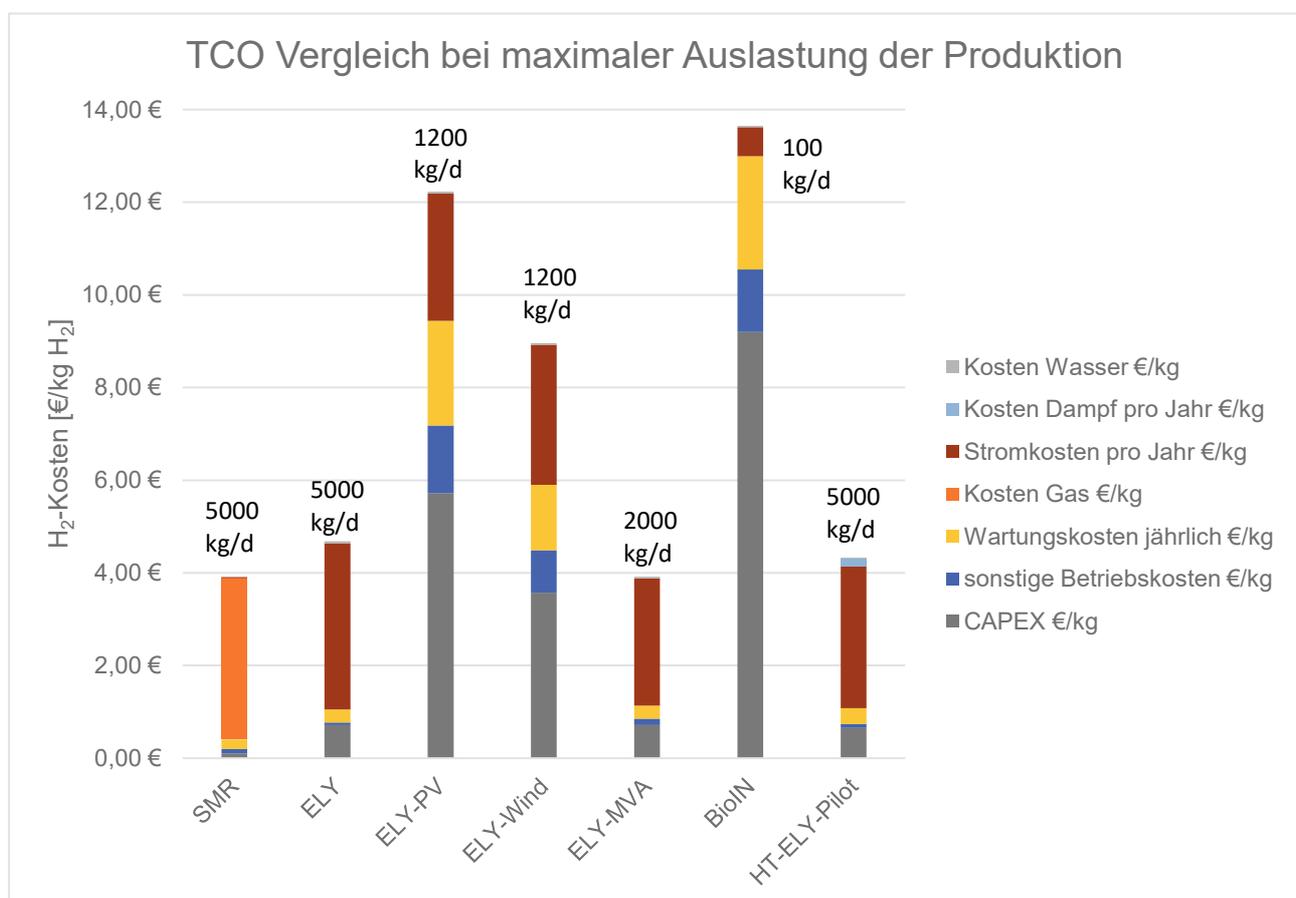


Abbildung 2: Vergleich der TCO in €/kg H₂ der verschiedenen Möglichkeiten der H₂-Erzeugung in Ingolstadt bei einer Produktion entsprechend der jeweils maximal möglichen Auslastung.

Zusammenfassend zeigt die Betrachtung der einzelnen H₂-Erzeugungspfade, dass es aus wirtschaftlicher Sicht sinnvoller ist, einen (größeren) H₂-Erzeuger an einem günstigen Standort mit vielen Betriebsstunden pro Jahr, als mehrere kleine Erzeuger mit möglichst günstigen Energiekosten direkt bei der Energieerzeugungsanlage zu betreiben. Durch die geringe Auslastung und den Mehraufwand, Wasserstoff an verschiedenen Stellen „einsammeln“ zu müssen, hat die dezentrale Erzeugung einen strukturellen Nachteil.

Bezogen auf die Region Ingolstadt bedeutet dies, dass am Standort der GRI Wasserstoff mit verschiedenen Verfahren für 4 - 5 € pro kg Wasserstoff produziert werden kann. Für alle vorgeschlagenen Verfahren wurde eine Grünstellung des Wasserstoffes im Sinne einer maximalen CO₂-Ersparnis berücksichtigt. Wird auf die Grünstellung verzichtet, könnten die Kosten der Produktion noch weiter gesenkt werden. Da das Ziel dieser Studie die Erzeugung von grünem, bzw. CO₂-armen Wasserstoff ist, wird die Erzeugung von grauem Wasserstoff an dieser Stelle nicht weiter aufgeschlüsselt.

Für die nachfolgende Betrachtung der H₂-Infrastruktur, bzw. des H₂-Ökosystems in Kapitel 4 wurde, aufgrund der diskutierten Wirtschaftlichkeitsbetrachtung, auf die Produktion von Wasserstoff am Standort der GRI fokussiert.

3.3 Rechtlicher Rahmen / Grünstellung des Wasserstoffs

Aus der politischen Diskussion im Projektzeitraum (September 2020 bis September 2021) zum Thema „Was macht grünen Wasserstoff grün?“ ergaben sich im Projekt immer wieder Fragen zur Investitionssicherheit für den Produktionspfad „Dampfreformierung von grünem Wasserstoff aus Biomethan“. Durch die bereits existierende SMR-Anlage bei der GRI führt dieser in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zu den niedrigsten Kosten (in €/kg H₂), v.a. in der Markthochlaufphase, wenn vergleichbare Elektrolyseanlagen nur im Teillastbetrieb laufen könnten (siehe Abbildung 3). Daneben wurde in Förderaufrufen immer wieder darauf verwiesen, dass ein definierter Anteil des verarbeiteten Wasserstoffs grün sein muss, damit die Investitionen förderfähig sind.

Wie in Abschnitt 3.1.1 bereits beschrieben, weisen sowohl das EU-Projekt CertifHy, als auch die Definition von grünem Wasserstoff im TÜV-Süd Standard CMS70 darauf hin, dass Wasserstoff über Dampfreformierung aus Biomethan grün ist, d.h. Wasserstoff nachhaltig mit sehr geringen oder keinen CO₂-Emissionen produziert werden kann. Der deutsche Gesetzgeber hat diese Definition allerdings nicht übernommen, sondern weitere „Farben“ (orange, blau, türkis etc.) eingeführt.¹² Entsprechend war unklar, welche Farbe der aus Biomethan produzierte Wasserstoff gesetzlich aufweist.

Um die rechtliche Lage und die damit verbundenen Risiken besser bewerten zu können, wurde eine rechtliche Einschätzung bei der Kanzlei BRAHMS NEBEL & Kollegen beauftragt.¹³ Die zentralen Fragen, die beantwortet werden sollten, waren:

- Ist Wasserstoff, der auf die in Abschnitt 3.1.1 beschriebene Weise aus Biomethan produziert wird, auch rechtlich grün?
- Muss die thermische Energie zum Heizen des Dampfreformers auch „grün“ sein, damit der Wasserstoff als „grüner Wasserstoff“ qualifiziert werden kann?
- Wie setzt sich der Preis zusammen (Produktionskosten, Steuer, Netzgebühr, etc.)?

¹² (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), 2020)

¹³ Rechtliche Einschätzung (Brahms, 2021)

- Verursacht die Verwendung von Biomethan noch CO₂-Abgaben (hier nach dem Treibhaushandelsemissionsgesetz (kurz: TEHG) bzw. dem Brennstoffemissionshandelsgesetz (kurz: BEHG))?

Gemäß der rechtlichen Einschätzung in Kombination mit den aktuellen rechtlichen Entwicklungen lassen sich derzeit zusammenfassend folgende Feststellungen treffen:¹⁴

- Die aktuellen Regelungen zur Qualifizierung als „Grüner Wasserstoff“ in Bezug auf das Erneuerbare-Energien-Gesetz und das Stromsteuer-Gesetz bedingen regelmäßig den Prozess der Elektrolyse und sind nicht technologieoffen ausgestaltet.
- Das EEG 2021 enthält zwar selbst entsprechende Regelungen zum grünen Wasserstoff, stellt hierbei aber maßgeblich auf den Produktionsprozess der Elektrolyse ab. Überdies regelt die Verordnung nach § 93 EEG 2021 zur Qualität von grünem Wasserstoff, dass es gerade auf eine 100 %-Nutzung von Erneuerbaren Energien ankommt. Aufgrund der restriktiven Betrachtung des Ausschließlichkeitskriteriums im EEG 2021 müsste auch die notwendige Wärme für die Dampfreformierung aus Erneuerbaren Energien stammen, damit ein zumindest gleichwertiges Produkt „Grüner Wasserstoff“ entstehen dürfte. Hierbei sollte auch das Massebilanzsystem, welches bisher bei der Verstromung von Biomethan in KWK-Anlagen zum Tragen kommt, entsprechend genutzt werden.
- Eine Doppelanrechnung auf die THG Quote ist im zwischenzeitlich erlassenen BImSchG nur für Wasserstoff gegeben, der durch Elektrolyse aus zusätzlich erzeugtem Strom aus regenerativer Quelle produziert und im Raffinerieprozess eingesetzt ist. Damit ergibt sich für diesen Wasserstoff ein deutlich höherer Wert als für Wasserstoff aus grünem Erdgas und SMR, der nur für Betankung von Fahrzeugen und dann auch nur einfach auf die THG Quote angerechnet werden kann. Für beides ist der gesetzliche Rahmen gesteckt, es fehlen jedoch bislang die Details der Verordnung.
- Unter Berücksichtigung des § 28 Abs. 1 EnergieStG könnte eine teilweise Befreiung von der Energiesteuer in Betracht kommen, soweit das Biomethan den Anforderungen des § 8 der 10. BImSchV entspricht. Dies würde jedoch nur für die eingesetzten Biomethanmengen gelten, die zur Wärmeerzeugung/zum Verheizen genutzt werden. Im Übrigen dürften weder durch den Herstellungsprozess zur Wasserstoffherzeugung noch unter Berücksichtigung des Einsatzes von Biomethan Vorteile gegenüber dem Bezug sonstigen Erdgases aus dem Netz der allgemeinen Versorgung entstehen.

¹⁴ Rechtliche Einschätzung (Brahms, 2021)

- Innerhalb des § 6 Abs. 1 Satz 1 EBeV 2022 ist ausdrücklich geregelt, dass Biomethan unter Einhaltung der Voraussetzungen der BiomasseV bzw. der Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung unter Zuhilfenahme eines Massebilanzsystems auf die Zertifikate nach dem BEHG angerechnet werden können. Eine vergleichbare Ausgestaltung ist dem TEHG für die Anrechnung des Einsatzes von Biomethan nicht vorgesehen, wobei das eingesetzte Biomethan bzw. der Grüne Wasserstoff in diesem Fall der entsprechenden Kraftstoffquote zugeordnet werden kann.

Die vorstehenden Ergebnisse sind insoweit auch als Arbeitsanweisungen an den Gesetzgeber zu verstehen, welche rechtliche Maßnahmen ergriffen werden müssten, um den Einsatz von Biomethan im Prozess zur Dampfreformierung zur Herstellung von grünem Wasserstoff rechtssicher auszugestalten. Insoweit können hieraus folgendes Maßnahmenpaket abgeleitet werden:

- Der Gesetzgeber hat neben der Regelung des § 69b EEG 2021 und der darauf beruhenden Verordnung auch innerhalb des EnWG bzw. der GasNEV klarzustellen, unter welchen Prämissen der in der Dampfreformierung erzeugte Wasserstoff als grün gilt.
- Hier ist insbesondere darauf abzustellen, ob das bereits bestehende Massebilanzsystem für Biomasse zum Zwecke der Nachweisführung genügt und die eingesetzte Wärme selbst nachhaltig sein muss.
- Soweit der Gesetzgeber eine weitergehende Förderung der Erzeugung von grünem Wasserstoff vorantreiben und die Sektorenkopplung steuern möchte, so ist insbesondere im EnWG und dem EnergieStG zu prüfen, ob die Entnahme von Biomethan zur Herstellung von grünem Wasserstoff durch ganz oder teilweisem Entfall der Netzentgelte (hier ggf. in § 118 Abs. 6 EnWG) und darauf gewälzter Umlagen bzw. der Energiesteuer gefördert werden sollte im Rahmen der Markthochlaufphase.
- Im TEHG dürfte es gerade darum gehen in Ansehung der Rechtsprechung des EuGH festzulegen, ob bei einer CO₂-freien Produktion von grünem Wasserstoff eine Teilnahme am Treibhaushandel erforderlich ist.¹⁵

Aus dem Ergebnis der rechtlichen Untersuchung ist ersichtlich, dass vom Gesetzgeber aktuell nur eindeutig Wasserstoff aus Elektrolyse grün ist. Im Sinne der Technologieoffenheit und des Markthochlaufs unter Nutzung bereits bestehender SMR-Anlagen wäre es allerdings sehr zu begrüßen, wenn grüner Wasserstoff auch in Deutschland aus der Dampfreformierung aus Biomethan herstellbar wäre und dies gesetzlich entsprechend fixiert würde.

¹⁵ Rechtliche Einschätzung (Brahms, 2021)

4 Infrastruktur

Aus den zuvor betrachteten H₂-Erzeugungspfaden ergibt sich das in Abbildung 3 und Abbildung 4 dargestellte Ökosystem für die Produktion und Verteilung von CO₂-armen Wasserstoff. Hierbei sind die ökonomisch relevanten Möglichkeiten unter Angabe der entstehenden Kosten aufgeführt. Wie in Kapitel 3 bereits erläutert, wird hierbei von der Verwendung von ausschließlich regenerativer Energie ausgegangen.

Die Angabe der Kosten beruht auf der Annahme, dass jeweils eine Produktion und eine Trailer Abfüllung für 5.000 kg H₂ pro Tag bereitgestellt wird. Es werden die entstehenden Kosten für die Vollauslastung der Produktion (100%) sowie für eine Auslastung von 25% angegeben. 25% Auslastung entsprechen einer Produktion von 1.200 kg H₂ pro Tag und decken damit den perspektivischen H₂-Bedarf der kommunalen Flotten der INKB und SBI. Während in Abbildung 3 keinerlei Förderung berücksichtigt wurde, ist in Abbildung 4 eine mögliche Förderung gemäß dem „HyPerformer“-Programm des BMWI aus dem Jahr 2020 berücksichtigt.

Aufgrund der städtischen Lage bringt eine Verteilung des Wasserstoffs via Pipeline hohe Kosten sowie einen hohen Planungs- und Genehmigungsaufwand für eine Belieferung mehrerer Tankstellen im Stadtgebiet mit sich. Daher wird im Folgenden die Verteilung des Wasserstoffs mittels H₂-Trailer untersucht.

Die Infrastruktur sowie die Zusammensetzung der angegebenen Kosten werden im nachfolgenden Kapitel beschrieben. Die aufgeführten Kosten für die Produktion des Wasserstoffes sind im vorhergehenden Kapitel 3 beschrieben.

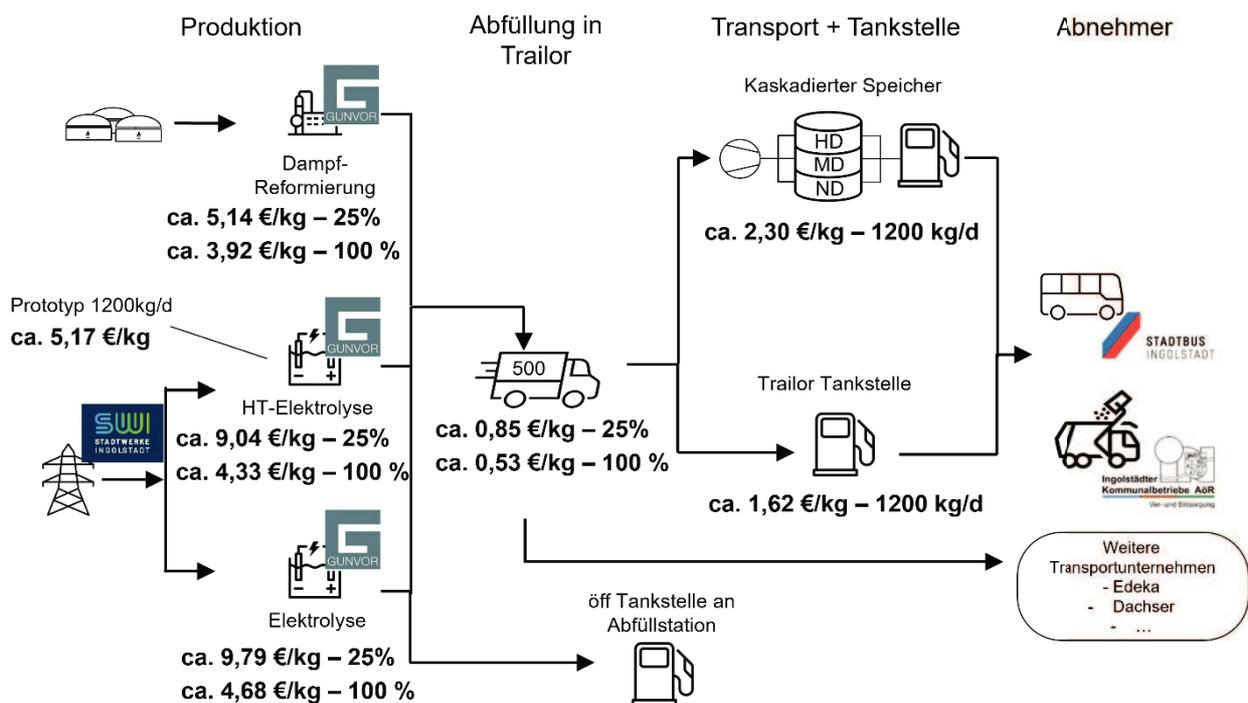


Abbildung 3: H₂-Ökosystem in Ingolstadt ohne Förderung

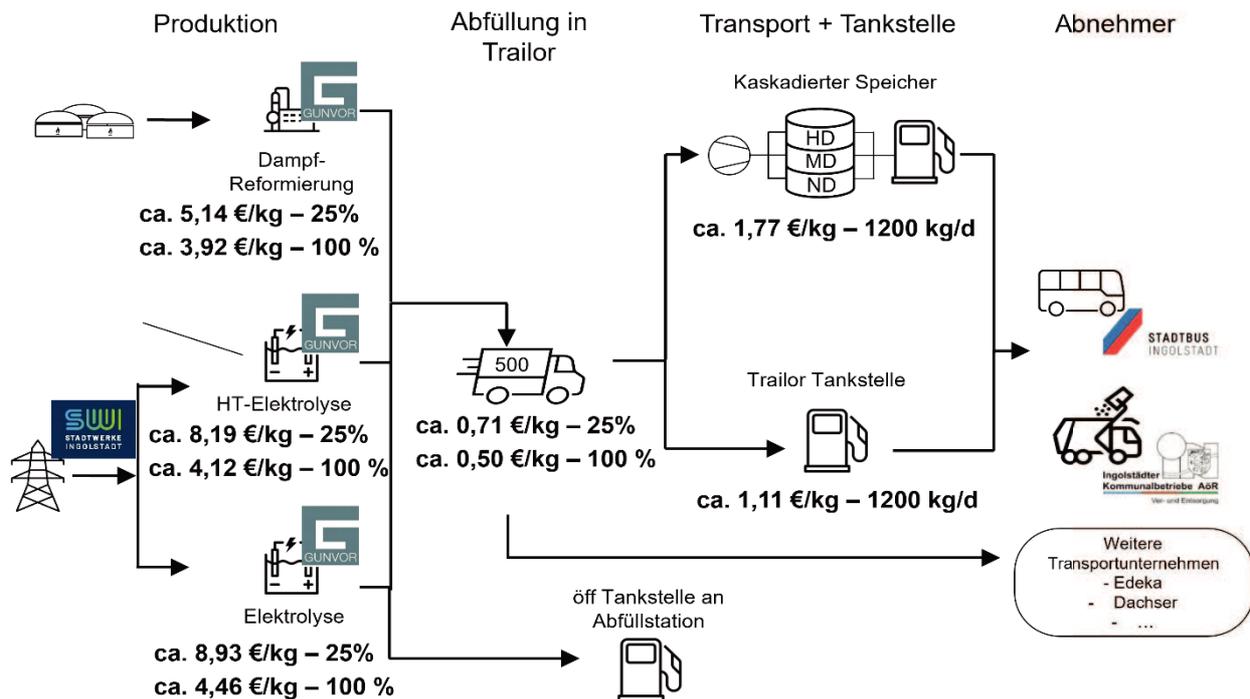


Abbildung 4: H₂-Ökosystem in Ingolstadt mit Förderung durch das HyPerformer Programm von NOW/BMWI

4.1 Trailer Abfüllanlage

Für die Verteilung des Wasserstoffes wurde der Transport mittels H₂-Trailern betrachtet. Hierfür ist eine Trailer-Abfüllanlage nötig. Da sich in der Betrachtung der H₂-Erzeugungspfade die GRI als optimaler Standort herausgestellt hatte, wurde auch die Trailer-Abfüllanlage an diesem Standort in die Überlegungen einbezogen und projiziert.

Die Trailer-Abfüllstation beinhaltet 6 Trailer-Stellplätze inklusive der benötigten verfahrenstechnischen Infrastruktur für deren Anbindung, einen Niederdruckspeicher mit einer Speicherkapazität von 1.500 kg Wasserstoff, eine 350 bar Zapfsäule für die Betankung von Nutzfahrzeugen sowie einen Kompressor für die Verdichtung von 200 kg Wasserstoff pro Stunde von 30 bar auf 550 bar. Ein möglicher Aufbau der Trailer-Abfüllstation ist in Abbildung 6 dargestellt. Mit den 6 Stellplätzen sind die Voraussetzungen für einen reibungsfreien Ablauf einer kontinuierlichen Befüllung mehrerer Trailer gegeben. Die Anzahl der Trailer-Stellplätze ist grundsätzlich auf dem vorgeschlagenen Gelände erweiterbar. Damit wird der Tatsache Rechnung getragen, dass die GRI die Produktion von Wasserstoff weit über 5.000 kg pro Tag erhöhen kann. Durch den Niederdruckspeicher in einer Größenordnung von 1,5 40'-Trailern mit 500 bar ist auch ein ausreichender Puffer für die Produktion und Zwischenspeicherung von Wasserstoff gegeben.

Der vorgeschlagene Kompressor bietet die Möglichkeit, einen Trailer in nur 5 h zu füllen und ist damit auch für die in dieser Studie angenommene maximale Ausbaustufe der Produktion von 5.000 kg Wasserstoff pro Tag ausreichend.

Unter Berücksichtigung der benötigten Peripherie, baulichen Maßnahmen und einem Sicherheitszuschlag von 10% ergeben sich Anschaffungskosten in Höhe von 3,3 Mio. €. Werden weiterhin die operativen Betriebskosten berücksichtigt, welche sich im Wesentlichen aus Strom- und Wartungskosten für den Kompressor und die Verfahrenstechnik zusammensetzen, ergeben sich bei einem Umsatz von 1.200 kg Wasserstoff pro Tag 0,85 € pro kg Wasserstoff, respektive 0,53 € pro kg Wasserstoff bei einem Umsatz von 5.000 kg Wasserstoff pro Tag. Unter der Annahme einer 40% Förderquote auf alle CAPEX werden diese Kosten auf 0,71 € pro kg Wasserstoff, respektive 0,50 € pro kg Wasserstoff gesenkt.



Abbildung 5: Möglicher Aufbau der Trailer-Abfüllstation

4.2 Betriebshoftankstellen

Im Rahmen der Studie wurde verschiedene Tankstellenkonzepte untersucht. Diese werden im Folgenden erläutert und bewertet.

4.2.1 Speicher-Tankstelle

Eine Speicher-Tankstelle besteht grundsätzlich aus mehreren Speichern bei unterschiedlichem Druckniveau, einem Verdichter zum Befüllen und einer Zapfsäule. Bei einer 350-bar-Tankstelle für Nutzfahrzeuge sind die Druckniveaus meist in einen Niederdruckspeicher (50 - 100bar) und einen Hochdruckspeicher (350 - 550 bar) unterteilt. Angelieferter Wasserstoff wird in die Speicher überströmt bzw. mittels des Kompressors in die Speicher verdichtet. Dadurch kann die Speicherkapazität des anliefernden Trailers komplett ausgenutzt werden. Befindet sich die Tankstelle in der Nähe von Wohngebäuden, darf der nötige Kompressor aufgrund des erzeugten Lärms jedoch nur bei Tag betrieben (oder muss alternativ lärmschutzgekapselt ausgeführt) werden. Ist eine Betankung während der Nachtruhe nötig, wie dies beispielsweise beim Betrieb eines Busbetriebshofes der Fall ist, kann nur aus dem Hochdruckspeicher überströmt werden, wodurch die Kapazität der Tankstelle stark limitiert wird.

Für die Betankung eines Fahrzeuges wird der Wasserstoff nun entweder aus einem der Speicher in den Tank des Fahrzeuges überströmt oder mittels des Kompressors verdichtet. Ist eine schnelle Betankung in weniger als 15 min gewünscht, kann die Tankstelle um eine Vorkühlung des Wasserstoffs erweitert werden. Im Rahmen der Studie wurde auf eine Vorkühlung verzichtet.

4.2.2 Trailer-Tankstelle

Der größte Kostenreiber der zuvor beschriebenen Speicher-Tankstelle ist der Kompressor. Dieser ist in der Anschaffung teuer und erzeugt neben hohen laufenden Kosten durch die für die Kompression benötigte Energie auch einen hohen Wartungsaufwand.

Beim Konzept der Trailer-Tankstelle werden die Fahrzeuge direkt aus dem oder den Trailern betankt. Dadurch kann auf einen Kompressor verzichtet werden, wodurch die laufenden Kosten der Tankstelle deutlich reduziert werden. Dies macht auch insofern Sinn, als dass ein mehrfaches Verdichten des Wasserstoffs umgangen wird. Aktuell wird der Wasserstoff verdichtet, um in Trailer abgefüllt zu werden. Von den Trailern wird er in die Speicher der Tankstelle entspannt, um anschließend für das Überströmen in die Fahrzeuge wieder verdichtet zu werden. Das mehrfache Verdichten erzeugt nicht nur hohe Kosten, sondern stellt auch eine „Verschwendung“ von Energie dar. Wird das Fahrzeug direkt aus dem Trailer befüllt, kann dieser Verbrauch weitestgehend umgangen werden. Darüber hinaus werden die Baukosten und der Bauaufwand reduziert, da kein Fundament oder Stromversorgung für den Kompressor realisiert werden muss und auch auf die stationären Speicher verzichtet werden kann.

Während der Betrieb und die Baukosten einer Tankstelle deutlich reduziert werden, steigen die Kosten für den Transport, bzw. den Einkauf des Wasserstoffs (siehe Abbildung 6). Dies hat zwei Gründe:

- Hohes Druckniveau; der Wasserstoff muss bei einem Druckniveau eingekauft werden, welches höher ist als der benötigte End-Druck des Fahrzeuges (bei Bussen und Nutzfahrzeugen in der Regel 350 bar). In der Studie wurde eine Lieferung bei 500 bar angenommen.
- Höhere Transportkosten; da kein Kompressor vorhanden ist, kann die Speicherkapazität des Trailers nur zur 70% bis 75% ausgenutzt werden. Des Weiteren sollte aus Gründen der Versorgungssicherheit für den Fall eines technischen Defekts stets ein Trailer in Reserve vorgehalten werden. Dies führt dazu, dass bei einem täglichen Wasserstoffbedarf von 1.200 kg für eine Trailer-Tankstelle 4 Trailer angeschafft werden müssen, für eine Speicher Tankstelle genügen jedoch 2. Darüber hinaus steigen die Kosten für den Trailer selbst. Um 70% bis 75% Nutzungsgrad der Trailer zu erzeugen, müssen die Trailer in mehrere Segmente (≥ 10) unterteilt sein und intelligent entleert werden. Die Idee ist hierbei, dass leere Fahrzeuge zuerst aus Trailer-Segmenten mit niedrigem Druckniveau betankt werden und erst nach und nach die Segmente mit hohem Druckniveau aufgebraucht werden. Der damit verbundene Aufwand in der Verrohrung und Ansteuerung der Trailer wurde mit 10% Mehrkosten in den Anschaffungskosten der Trailer berücksichtigt.

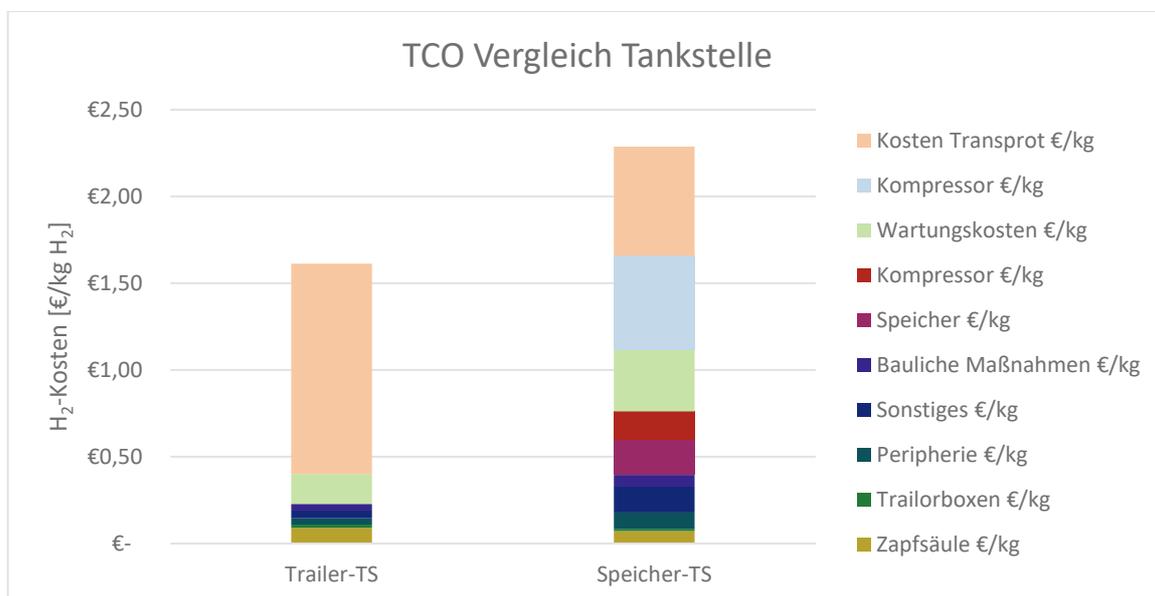


Abbildung 6: Vergleich der TCO in €/kg H₂ der Trailer- und Speicher-Tankstelle bei einer täglich vertankten Menge von 1.200 kg H₂.

Abbildung 6 vergleicht die TCO-Kosten der vorgestellten Tankstellenkonzepte bei einem täglichen Bedarf an Wasserstoff von 1.200 kg. Für den hier angenommenen Fall einer Betriebshoftankstelle in 20 km Entfernung zur Trailer-Abfüllstation verdoppeln sich die Kosten für den Transport des Wasserstoffs für eine Trailer-Tankstelle (1,21 €/kg H₂ für Transport) im Vergleich zu einer Speicher-Tankstelle (0,63 €/kg H₂ für Transport). Aufgrund der deutlich niedrigeren Betriebs- und Baukosten führt die Trailer-Tankstelle dennoch zu günstigeren H₂-Kosten von 1,62 €/kg H₂ gegenüber 2,30 €/kg H₂ bei der Speicher-Tankstelle.

Ein möglicher Aufbau einer Trailer-Tankstelle ist in Abbildung 7 dargestellt. Zwischen den Trailer-Boxen und den Zapfsäulen ist eine Brandwand vorgesehen. Hinter den Trailern befindet sich die Anschlussstafel, um die einzelnen Trailer in die Tankstelleninfrastruktur zu integrieren. Vor den Trailer-Boxen muss genügend Platz berücksichtigt werden, um eine problemlose Anlieferung der Trailer zu gewährleisten.



Abbildung 7: Möglicher Aufbau einer Trailer-Tankstelle

4.2.3 Wirtschaftlichkeitsberechnung

Für den Vergleich der beiden Tankstellentypen müssen die Kosten für den Transport, inklusive Kosten für die Trailer und die Kosten für die Tankstelle gemeinsam betrachtet werden, da, wie bereits zuvor erwähnt, die Verteilung der Kosten zwischen diesen Punkten verschoben wird. Während die Speicher-Tankstelle selbst höhere Kosten gegenüber Trailer-Tankstelle verursacht, sind die Kosten für den Transport des Wasserstoffs für die Speicher-Tankstelle deutlich geringer gegenüber den Transportkosten für eine Trailer-Tankstelle. Die addierten Kosten für das jeweilige Tankstellenkonzept sind in Abbildung 8 dargestellt.

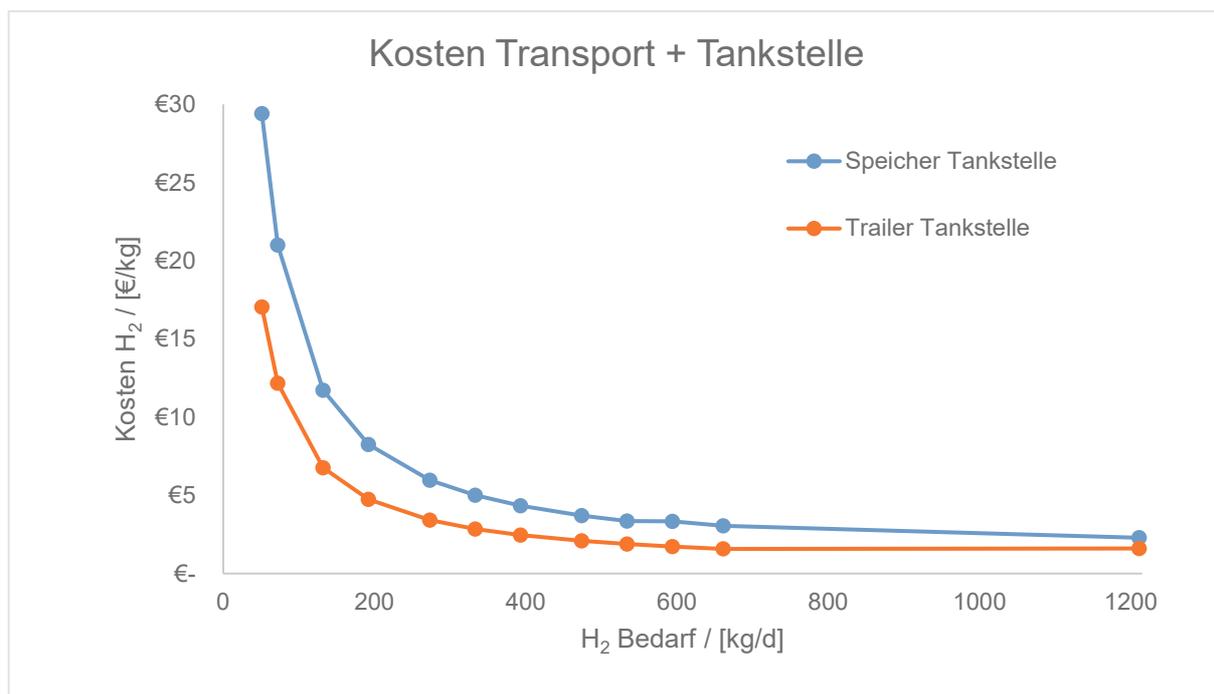


Abbildung 8: Vergleich der Kosten für Transport und Tankstelle

Die Kosten für den Transport des Wasserstoffs inklusive der Kosten für die Trailer wurden wie in Kapitel 4.2 berechnet. Für beide Tankstellen wurde die Anzahl der benötigten Zapfsäulen sowie die Anzahl der benötigten Trailer in Abhängigkeit des H₂-Bedarfs erhöht. Um die Versorgungssicherheit sicherzustellen und einen technischen Defekt eines Trailers absichern zu können, wurde für die Trailer-Tankstelle ein Reserve-Trailer berücksichtigt. Da die Speicher-Tankstelle aufgrund der vorhandenen Speicher notfalls auch einige Tage mit einem Trailer weniger auskommen würde, wurde hier kein Reserve-Trailer berücksichtigt.

Für den Kompressor wurden typische Daten einer Nutzfahrzeug-Tankstelle angenommen:

Ansaugdruck: 20bar

Zieldruck: 550bar

Maximale Förderrate: 75kg/h

Anschaffungskosten: 730.000 €

Des Weiteren wurde ein Kompressor in Redundanz berücksichtigt. Für die Stromkosten wurden 0,15 €/kWh bei einem Verbrauch von 2,5 kWh pro kg Wasserstoff angenommen. Die Druckniveaus der Speicher befinden sich bei 200-300 bar für den ND-Speicher und bei 550 bar für den HD-Speicher. Die Größe der Speicher wird an den H₂-Bedarf angepasst, da die Speicher jederzeit ergänzt und nachgerüstet werden können.

Für beide Tankstellenvarianten wurden bauliche Maßnahmen sowie Tiefbau im Bereich der Tankstelle mit einer Fläche von 100 m² pro Zapfsäule berücksichtigt. Für die Kompressoren der Speicher-Tankstelle wurde die Erstellung eines Fundaments berücksichtigt. Beide Tankstellen mit allen beteiligten Bauteilen wurden über 20 Jahre abgeschrieben und Wartungskosten von 5% der CAPEX angenommen. Eine Vorkühlung wurde für keine der Tankstellen berücksichtigt.

Zusammenfassend zeigt der Vergleich der beiden Tankstellen, dass die Kosten pro kg Wasserstoff für Transport und Tankstelle mit steigendem H₂-Bedarf sinkt. Dabei ist die Trailer-Tankstelle stets um 40% günstiger als die Speicher-Tankstellen. Perspektivisch reduziert sich der Kostenvorteil der Trailer-Tankstelle auf 29% (1,62 €/kg H₂) gegenüber der Speicher-Tankstelle (2,30 €/kg H₂) bei einem H₂-Bedarf von 1.200 kg pro Tag.

4.2.4 Standorte

Aufgrund des Platzangebots bietet sich für die SBI lediglich das Busdepot in Oberstimm für eine Erweiterung um eine H₂-Tankstelle an. An allen anderen Standorten herrscht akuter Platzmangel, so dass hier kein Platz für eine zusätzliche Tankstelle vorhanden ist.

Aktuell sind am Standort Oberstimm 40 Gelenkbusse untergebracht. Damit bietet das Depot genügend Platz für den Bedarf an Langstrecken-Bussen (H₂) der SBI (siehe Kapitel 2.2). Das Depot in Oberstimm ist aktuell nur gepachtet, weshalb es keine Standortgarantie gibt. Für den Fall eines Umzugs des Depots bietet die Trailer-Tankstelle den Vorteil geringer baulicher Maßnahmen und kaum fest verbauten Equipments, wodurch ein Umzug verglichen mit einer Speicher-Tankstelle kostengünstiger und schneller möglich wäre.

Für die Müllfahrzeuge der INKB ist eine Tankstelle an der Müllverbrennungsanlage denkbar, da diese in ihren täglichen Routen die MVA anfahren (Entladen des Mülls) und genügend Platz vorhanden ist. Jedoch ist der Weg zur GRI mit ca. 2 km sehr kurz, so dass auch eine Betankung an einer öffentlichen Tankstelle (siehe Kapitel 4.4) bei der GRI umsetzbar wäre. Da die aktuell verfügbaren Müllsammelfahrzeuge mit Brennstoffzellenantrieb mit einem 700bar H₂-System ausgestattet sind, haben sie des Weiteren auch die Möglichkeit, an der bestehenden Ingolstädter H₂-Mobility-Tankstelle betankt zu werden. Die H₂-Mobility-Tankstelle ist bereits seit 2018 in Betrieb und erfüllt bereits jetzt alle Voraussetzungen, um die bestellten zwei Müllfahrzeuge und die Kehrmachine mit Brennstoffzellenantrieb zu betanken.

Aus diesen Gründen ist eine Betriebshoftankstelle für die INKB nicht zwingend notwendig. Zum aktuellen Zeitpunkt ist es deutlich kostengünstiger auf eine eigene Betriebshoftankstelle zu verzichten und – auch vor dem Hintergrund der aktuell nicht vorhandenen Kompetenz und Erfahrung der INKB im Betrieb einer eigenen Tankstelle – den (überschaubaren) Mehraufwand in Kauf zu nehmen, um die Fahrzeuge an einer Tankstelle außerhalb des Betriebsgeländes zu betanken. Steigt die Anzahl der Fahrzeuge wie prognostiziert in den kommenden Jahren an, sollte die Möglichkeit einer Betriebshoftankstelle erneut geprüft werden. Auch unter dem Aspekt, dass die Kosten für die H₂-Infrastruktur deutlich sinken werden.

4.3 Transport in Trailer

Die in Kapitel 4.2 vorgestellten Möglichkeiten einer Betriebshoftankstelle führen zu einer unterschiedlichen Anzahl an benötigten Trailern. So werden für den Betrieb einer Trailer-Tankstelle deutlich mehr Fahrzeuge benötigt, um die gleiche Menge an Wasserstoff zu vertanken als für den Betrieb einer Tankstelle mit kaskadiertem Speicher. Aus diesem Grund sind in Abbildung 3 und Abbildung 4 die Kosten für Transport und Tankstelle zusammengefasst.

Wird der Trailer als Fahrzeug gewertet, so kommt hierfür eine 50% Förderquote in Frage, welche in Abbildung 4 Berücksichtigung findet. Für die Anschaffungskosten des Trailers wurden nach Einholung von Angeboten 938.000 € angesetzt.

Die operativen Kosten werden weitestgehend durch die gefahrene Strecke verursacht. Als Strecke wurde hierbei der Hin- und Rückweg zwischen der GRI und dem potenziellen Standort der SBI mit 30 km angenommen. Die Transportkosten setzten sich dabei aus einem Sockelbetrag von 160 € pro Fahrt und einer Kilometerpauschale für einen 500-bar-Trailer von 1,70 € pro km zusammen.

4.4 Öffentliche Tankstelle an Trailer-Abfüllstation

Im Laufe der Studie stellte sich der potentielle Standort der GRI als günstiger Standort für eine öffentliche Tankstelle für Nutzfahrzeuge heraus. Nicht nur in Ingolstadt, sondern auch im angrenzenden Landkreis Eichstätt wird die Umstellung der Abfallbeseitigung auf emissionsarme Antriebe untersucht. Durch die Nähe zur Müllverbrennungsanlage kommen viele Müllsammelfahrzeuge auf ihrer täglichen Route an der GRI vorbei, weshalb dieser Standort für die 700-bar-Fahrzeuge ein geeigneter Tankstellenstandort ist. Durch die Nähe des Standortes zur Autobahn ist auch denkbar, dass LKWs hier einen Tank-Stopp einlegen. Diese sind in der Regel mit einem 350-bar-System ausgestattet. Voraussetzung hierfür ist eine kurze Betankungszeit, weshalb für diese Tankstelle eine Vorkühlung berücksichtigt werden würde.

Da für die Abfüllung der Trailer bereits Wasserstoff bei 500 bis 550 bar vorliegt, könnte hier direkt eine Verbindung von der Trailer-Abfüllstation zu einer öffentlichen Tankstelle gelegt werden. Damit kann sowohl auf große Speicher als auch auf kosten- und wartungsintensive Kompressoren verzichtet werden.

Bei einer Tankstelle mit einer Zapfsäule mit 350-bar- und 700-bar-Füllstutzen und Vorkühlung belaufen sich die zusätzlichen Kosten auf 1,4 Mio. €. Hierbei sind bauliche Maßnahmen, Planung und Genehmigung ebenfalls berücksichtigt. In diesem Fall wird auf einen Kompressor verzichtet, wodurch an der 700-bar-Füllgarnitur der Tankstelle maximal 550 bar bereitgestellt werden. Aufgrund der Vorkühlung wird jedoch eine kurze Betankungszeit gewährleistet, womit die nicht zu 100% Befüllung der 700-bar-Fahrzeuge toleriert werden kann. Für den Fall der Müllsammelfahrzeuge stellt häufigere Frequentierung der Tankstelle kein Hindernis dar, da sich die Tankstelle in der Nähe der Müllverbrennungsanlage befinden würde.

Für einen Betrieb der öffentlichen Tankstelle vor dem Bau der Trailer-Abfüllanlage kann diese mittels Trailer mit Wasserstoff versorgt werden.

Um eine möglichst zeitnahe Realisierung dieser Tankstelle zu ermöglichen, wurden die Fördermöglichkeiten mittels des bayerischen Förderprogramms zum Aufbau einer Wasserstofftankstelleninfrastruktur (BayMBI, 2020 Nr. 524 vom 16. September 2020) geprüft. Hierbei ist eine Förderquote von 80% für Nicht-KMUs auf die Anlagentechnik und Instandsetzungskosten gegeben. Durch die Förderung werden die Anschaffungskosten der zuvor beschriebenen Tankstelle inklusive zwei 20' 500-bar-Trailer auf 850.000 € reduziert.

5 Anwendungsbereiche/Profile

Im Rahmen der Studie liegt der Fokus der Untersuchungen zur Anwendung von Wasserstoff im Bereich der Mobilität. Mit der INKB und der SBI sind bereits zwei potenzielle Großverbraucher von Wasserstoff im Projektkonsortium vertreten. Aufgrund der verkehrsgünstigen Anbindung der Region an die A9 befinden sich zusätzlich mehrere Logistik- und Fuhrunternehmen in der Region. Demzufolge gibt es in der Region im Bereich der Mobilität großes Potenzial, Wasserstoff anzuwenden und CO₂ einzusparen. Diese Menge an CO₂-armem Wasserstoff kann unter den oben genannten Rahmendbedingungen und Durchführung der beschriebenen Maßnahmen von der GRI bereitgestellt werden.

Die Thematik der Gebäudeversorgung oder Rückverstromung wurde nicht betrachtet, da in Bayern kaum überschüssige regenerative Energie vorhanden ist. Somit ist die Speicherung dieser regenerativen Energie nicht nötig.

5.1 ÖPNV / Busse

Motivation

Die Clean-Vehicle-Directive bzw. deren nationale Umsetzung, das Saubere-Fahrzeuge-Beschaffungs-Gesetz, zwingt ab 02.08.2021 alle Sektorenauftraggeber, einen gewissen Anteil ihres Fuhrparks bei Neubeschaffungen durch sogenannte emissionsfreie Fahrzeuge abzudecken. Lokale Emissionsfreiheit kann derzeit durch batterieelektrische Busse, durch Oberleitungsbusse oder durch Wasserstoff-Brennstoffzellenbusse sichergestellt werden. Die Stadtbus Ingolstadt ist nicht nur Sektorenauftraggeber, sondern wird aus eigenem Interesse alle Möglichkeiten ausschöpfen, weiterhin in einem lebenswerten Umfeld Verkehrsdienstleistungen erbringen zu dürfen. Dazu gehört vor allem, Emissionen wo immer möglich, zu vermeiden oder so zu gestalten, dass sie nicht im verdichteten urbanen Umfeld anfallen und Mensch und Natur über Gebühr belasten oder schädigen.

Neben der Beschaffung von batterieelektrischen Bussen gilt es daher zu prüfen, wie zukünftig die langen Fahrzeugumläufe über 200 km Tagesleistung sichergestellt werden können, ohne dass die Fuhrparkgröße insgesamt steigt. Dies wäre dann der Fall, wenn Fahrzeugumläufe, die derzeit mit einem Dieselbus erbracht werden, künftig mit mehreren batterieelektrischen Bussen erbracht werden, die tagsüber zwischengeladen werden.

Fahrzeugbeschaffung

Der Brennstoffzellenbus ist aus Sichtweise des Betreibers eine sinnvolle Alternative für die kilometerintensiven Fahrzeugumläufe. In einem ersten Schritt soll daher bei Zusage von Fördermitteln ein Testfahrzeug (Gelenkbus) mit Brennstoffzellenantrieb angeschafft werden und eingehend erprobt werden.

Wichtig ist für den Betreiber zu wissen, wie stabil das Fahrzeug den täglichen Linienbetrieb absolvieren kann und wie hoch die Einsatzverfügbarkeit ist. Vergleichbare Dieselsebusse liegen bei über 90%.

Neben den reinen Kosten für den Betriebsstoff Diesel oder Wasserstoff sind aus Betreibersicht noch weitere Parameter von Interesse, nämlich die zu erwartenden Wartungs- und Instandhaltungskosten für die neue Technologie, die Dauer und die Komplexität des Betankungsvorganges, die Witterungsbeständigkeit bei extremen Temperaturen und die Vor- bzw. Nacharbeitszeit vor Werkstattaufenthalten. Aktuell sind hierzu allenfalls erste Erfahrungen andere Verkehrsbetriebe (z.B. in Köln oder Wiesbaden), jedoch keine belastbaren Daten vorhanden. Um hier den eigenen Kenntnisstand aber auch die Technologie selbst weiterzuentwickeln, wurde eine Erprobungsphase beschlossen.

Nach Beendigung der eingehenden Erprobungsphase könnten Brennstoffzellenbusse im Stadtverkehr Ingolstadt und im Ingolstädter Airport-Express einen wichtigen Beitrag dazu leisten, konventionelle Dieselsebusse früher aus dem Betrieb abzulösen und dennoch keine Fuhrparkmehrung auszulösen und damit größeren Bedarf an Abstellflächen zu generieren, die nicht vorhanden sind.

Technologie

Führende Hersteller für Brennstoffzellen-Kurzbusse (H₂-Bus) sind aktuell Caetano, Van Hool und Solaris. Die deutschen Hersteller Evo-Bus und MAN setzen mittelfristig auf die Weiterentwicklung der batteriebetriebenen Busse (BEV) und bieten aktuell keine H₂-Busse an. Brennstoffzellen-Gelenkbusse sind aktuell am Markt nicht erhältlich, diese befinden sich noch in der Entwicklungs- bzw. Erprobungsphase.

Da für die Umläufe der SBI sowohl BEV als auch H₂-Busse in Frage kommen, zeigt Tabelle 3 einen Vergleich der beiden Technologien exemplarisch an den Daten des Solaris Hydrogen-Bus und dem MAN Lion's City 12 E. BEV sind bereits länger am Markt erhältlich und daher auch schon deutlich günstiger als H₂-Busse. H₂-Busse zeichnen sich durch längere Reichweiten und kürzere Betankungszeiten gegenüber einem BEV aus, wodurch der gewohnte Betrieb, wie er aktuell mit Dieselsebusen stattfindet, beibehalten werden kann.

Umlaufanalyse

In der Umlaufanalyse wurden die gefahrenen km pro Bus und Tag analysiert. Die Fahrleistung eines Busses ist unabhängig vom Streckennetz oder -profil, da die meisten Busse über den Tag hinweg auf verschiedenen Linien zum Einsatz kommen. Des Weiteren wird aktuell nicht zwischen verschiedenen Antriebsarten unterschieden, sodass jeder Bus in jedem Umlauf eingesetzt werden kann. Abbildung 9 zeigt exemplarisch die Auswertung der Umläufe für einen Wochentag während der Schulzeit. Es ist ersichtlich, dass ein Großteil der Busse eine tägliche Fahrleistung von weniger als 200 km aufweist. Diese Fahrleistung kann mit dem heutigen Stand der Technik durch batteriebetriebene Elektrobusse (kurz: BEV) abgedeckt werden. 35% der eingesetzten Busse weisen jedoch eine Fahrleistung von größer 200 km auf. Auf diesen Strecken ist der Einsatz von Bussen mit Brennstoffzellenantrieb (kurz: H₂-Busse) denkbar und sinnvoll.

Tabelle 3: Vergleich BEV zu BZ-Bus

	H₂-Fahrzeuge: Solaris Urbino 12 Hydrogen¹⁶	BEV-Fahrzeuge: MAN Lion's City 12 E¹⁷
Reichweite	380 km (9 kgH ₂ /100km)	200 km 270 km ohne Last
Ladeinfrastruktur	H ₂ -Tankstelle	Ladesäule mit 150kW
Betankungs-/Ladezeit	< 20 min	2-3h (3-4h 18m-Bus)
		Regelung über eManager
Anschaffungskosten	700.000 €	550.000 € - 600.000 €
Kosten inkl. Förderung ¹⁸	340.000 €	310.000 € - 320.000 €
Streckenplanung	jeder Bus kann überall eingesetzt werden	Detaillierte Planung notwendig
Benötigte Busse	110	140 - 160 ¹⁹
CAPEX	77 Mio. €	77 Mio. € - 88 Mio. €
CAPEX inkl. Förderung	37,4 Mio. €	43,4 Mio. € - 49,6 Mio. €

¹⁶ Angaben Homepage Solaris

¹⁷ Angaben Homepage MAN und Broschüre „Einfach Einsteigen. In die Mobilität der Zukunft. Ihre eMobility-Lösung von MAN“

¹⁸ Angenommene Förderung: Förderquote: 80% des Mehraufwandes, Grundpreis 250.000 € für Dieselbus

¹⁹ Berechnungen der SBI, Mehraufwand and BEV Fahrzeugen aufgrund der langen Ladezeiten und maximalen Reichweiten um einen Faktor 1,5

Insgesamt betreibt die SBI eine Fahrzeugflotte von ca. 110 Bussen. Werden davon 35% durch Brennstoffzellenfahrzeugen ersetzt, entspricht dies knapp 40 Fahrzeugen.

Sollen alle Umläufe mit BEV bedient werden, so geht die SBI nach eigenen Hochrechnungen von einem Mehrbedarf an Fahrzeugen um einen Faktor 1,5 aus. Dies entspricht einem Mehrbedarf von 55 Bussen und begründet sich in den langen Ladezeiten der einzelnen Busse, sowie der Tatsache, dass nicht alle Busse gleichzeitig über Nacht geladen werden können. Des Weiteren müsste der Umlauf- und Linienplan angepasst werden, um extrem lange Einzellinien weiterhin bedienen zu können. Ein Beispiel hierfür ist die Sprinter-Linie „Airport Express“ an den Münchner Flughafen.

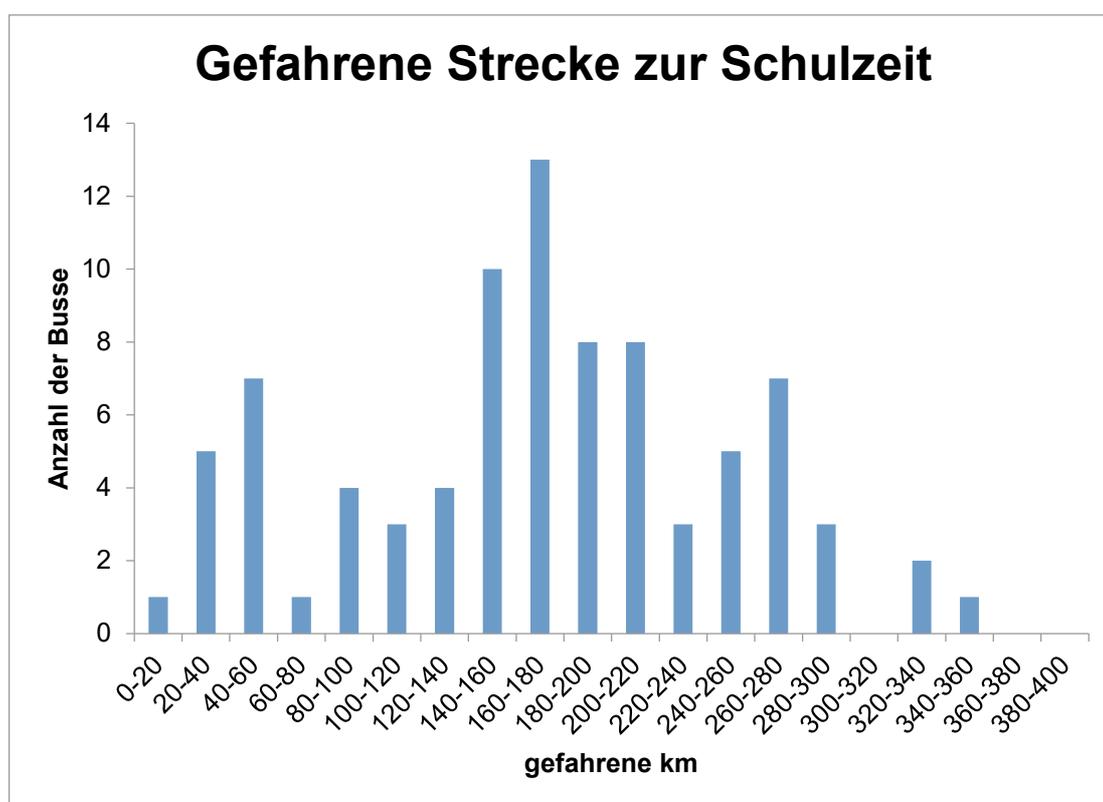


Abbildung 9: Umlaufanalyse, gefahrene Strecke pro Bus unter der Woche während der Schulzeit

Insgesamt legt die Flotte der SBI eine wöchentliche Fahrleistung (Mo-So) von 86.313 km während der Schulzeit und 80.893 km während der Ferienzeit zurück. Dies entspricht einer jährlichen Fahrleistung von ca. 4,4 Mio. km.

5.2 Abfallsammelfahrzeuge und LKW-Großkehrmaschine

Motivation

Die INKB als Kommunalunternehmen der Stadt verstehen sich als Testfeld und Reallabor für innovative und nachhaltige Technologien und treiben in ihren Aufgabenbereichen entsprechende Initiativen etwa in den Bereichen Nachhaltigkeit, CO₂-Neutralität, Digitalisierung und Mobilität der Zukunft voran.

Nachdem die Nutzfahrzeugflotte stetig sowie bedarfsorientiert modernisiert wird, hat sich die INKB im Rahmen des Projekts *IN2H2* bereit erklärt, erste Nutzfahrzeuge mit Brennstoffzellenantrieb im Testbetrieb einzusetzen. Damit wollen sie Pionierarbeit bei der zukunftsorientierten Weiterentwicklung der Entsorgungswirtschaft leisten. Zudem kann auf diese Weise der Verbrauch fossiler Brennstoffe schrittweise reduziert und damit CO₂ eingespart werden, wodurch wiederum ein Beitrag zum Klimaschutz für Ingolstadt geleistet wird.

Ferner stellt sich mit der Einführung der Brennstoffzellentechnologie ein Wissensvorsprung in der Technik und deren Anwendung in der „Schlüssel- bzw. der Zukunftstechnologie Wasserstoff“ ein. So bietet sich mit dem Echteinsatz dieser Technologie zum einen die Möglichkeit, eine verstärkte Kooperation bzw. Vernetzung mit ortsansässigen Bildungseinrichtungen (Technische Hochschule, Universität, Technikerschule, Berufsschule) aufzubauen. Zum anderen ergeben sich mit dem laufenden Betrieb und den damit verbundenen Wartungs- und Reparaturarbeiten in der firmeneigenen Werkstatt zusätzliche Entwicklungs- und Spezialisierungsmöglichkeiten für das eigene Fachpersonal, wodurch dem Aspekt der Personalentwicklung Rechnung getragen wird.

Das Projekt soll letztlich im Hinblick auf die langfristige CO₂-neutrale Ausrichtung des Fuhrparks grundlegende Erkenntnisse für zukünftige Beschaffungsentscheidungen liefern.

Durch die tägliche Präsenz dieser Müllsammel- bzw. Kehrfahrzeuge im Straßenverkehr kann darüber hinaus ein Beitrag geleistet werden, die Wasserstoffmobilität in der öffentlichen Wahrnehmung zu stärken.

Förderung von Abfallsammel- und Kehrfahrzeugen mit Brennstoffzellenantrieb (09/2020)

Flankiert und unterstützt wurde diese Motivation des Weiteren dadurch, dass Anfang September 2020 seitens des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) ein gesondertes Förderprogramm für Abfallsammelfahrzeuge sowie Kehrmaschinen mit Brennstoffzellenantrieb veröffentlicht wurde. Dieses wird von der NOW GmbH koordiniert und durch den Projektträger Jülich umgesetzt. Sofern die Fahrzeuge ausschließlich für hoheitliche Aufgaben eingesetzt würden, wurde hierbei eine Förderquote von bis zu 90% der Investitionsmehrkosten gegenüber einem konventionell ausgerüsteten Fahrzeug in Aussicht gestellt.

Seitens der INKB wurden nach einer anfänglichen Marktsondierung zunächst Richtpreisangebote für potenziell als einsetzbar erachtete Abfallsammel- bzw. Kehrfahrzeuge mit Brennstoffzellenantrieb eingeholt, geprüft und entsprechenden Angeboten für vergleichbare Nutzfahrzeuge mit konventionellem Antrieb gegenübergestellt. Daraufhin reichten die INKB einen entsprechenden Förderantrag für drei derartige Nutzfahrzeuge mit Brennstoffzellenantrieb (zwei Müllsammelfahrzeuge sowie eine LKW-Großkehrmaschine) am 12.10.2020 fristgerecht ein. Mit Zuwendungsbescheid vom 15.03.2021 wurde die Förderung durch den Projektträger Forschungszentrum Jülich vollumfänglich mit einem Gesamtumfang von 2.029.553 € bewilligt.

Aufgrund von Änderungen in der Fahrzeugkonzeption in Folge von Umlaufanalysen wurden die beantragten Fahrzeuge im Vorfeld der europaweiten Ausschreibung nochmals geringfügig modifiziert. Dieser Änderung wurde vom Forschungszentrum Jülich zugestimmt.

Ergebnisse der Umlaufanalyse

Im Februar sowie März 2021 wurde im Zuge des Projekts *IN2H2* für je 10 Arbeitstage jeweils eine Umlaufanalyse in Form von Messfahrten für eine Abfallsammel- sowie eine Kehrmaschinentour im Realbetrieb zur Erstellung entsprechender Leistungsprofile durchgeführt. Auf Basis dieser Leistungsprofile erfolgte schließlich die finale Konzipierung für die Auslegung der Tank- und Brennstoffzellengrößen der bewilligten Nutzfahrzeuge.

Zum Einsatz kam jeweils ein vom Hersteller FAUN mit entsprechender Messtechnologie ausgerüstetes Fahrzeug, mit dem die normalen Regeltouren für zwei Wochen abgefahren wurden. Damit wurde sichergestellt, dass die Werte dem tatsächlichen Einsatzbild hinsichtlich der Länge, der Arbeitsintensität und des Streckenprofils entsprechen.

Die Umlaufanalyse für das Abfallsammelfahrzeug ergab, dass pro Abfuhrtag ein Energiebedarf zwischen 66 kWh und 151,4 kWh notwendig ist, wodurch sich – je nach Wahl des Energieträgers (nur BEV / nur H₂ / Mischbetrieb) – ein Verbrauch von H₂ zwischen 0 kg/Tag und 8,8 kg/Tag ergibt. Um das Arbeitspensum ohne Einschränkungen zu bewältigen und die Tankzyklen möglichst zu strecken, wurde empfohlen, ein Brennstoffzellenmodul á 30 kWh und acht Wasserstofftanks mit einem Volumen von insgesamt 16,8 kg im Fahrzeug zu verbauen.

Die Umlaufanalyse für die Kehrmaschine ergab, dass pro Einsatztag ein Energiebedarf zwischen 151 kWh und 259 kWh notwendig ist. Je nach Wahl des Energieträgers ergibt sich ein täglicher Verbrauch von H₂ zwischen 3,6 kg und 12,9 kg. Daraus ergibt sich eine Fahrzeugkonfiguration mit zwei Brennstoffzellenmodulen á 30 kWh und acht Wasserstofftanks mit einem Gesamtvolumen von 16,8 kg.

Technologie

Entsprechend der Ausschreibungsergebnisse wurde schließlich im August 2021 die Firma FAUN Umwelttechnik GmbH & Co. KG aus Osterholz-Scharmbeck mit der Lieferung der drei Nutzfahrzeuge mit Brennstoffzellenantrieb beauftragt. Angeboten wurden jeweils Modelle der BLUEPOWER-Fahrzeugreihe.

Mit den Wasserstoffbrennstoffzellen-Fahrzeugen BLUEPOWER entwickelte FAUN modular konfigurierbare, alternative Antriebssysteme für eine umweltfreundliche Entsorgungslogistik (Zero Emission). BLUEPOWER ist ein selbst entwickelter, elektrischer Antrieb, der zur Reichweitensteigerung Wasserstoffbrennstoffzellen- und Batterie-Technologie miteinander kombiniert. In dieser Baureihe werden jeweils Fahrgestelle des Herstellers Mercedes-Benz, Typ Econic, mit einem vollelektrischen Antrieb (Akkuleistung von 80 kWh) sowie bis zu drei Brennstoffzellen als Reichweitenvergrößerer (= Range-Extender) von der Firma FAUN ausgerüstet.

Die Energie für den Antrieb der Räder und des jeweiligen Aufbaus wird hierbei zunächst aus der Batterie gewonnen. Zugleich wird durch Rekuperation zurückgewonnene Energie in ihr gespeichert. Sie dient damit als Pufferbatterie und federt die unterschiedlichen Leistungs- und Rückgewinnungsphasen ab.

Die Brennstoffzelle im Hintergrund läuft im technischen Optimum unabhängig von Leistungsschwankungen und liefert – entsprechend der Anforderung aus der Batterie und des Fahrers – zusätzliche Energie an die Batterie, sodass diese immer ausreichend geladen ist, um den restlichen Tagesauftrag zu erledigen.

Die Fahrzeuge können mit bis zu acht Wasserstofftanks mit einer Gesamtkapazität von 16,8 kg bestückt werden. Die Betankung erfolgt mit 700 bar, da diese Technik bislang von den meisten in Deutschland verfügbaren Wasserstoff-Tankstellen verwendet wird.

Wirtschaftlichkeitsberechnungen

Eine vollumfassende Wirtschaftlichkeitsberechnung ist zum derzeitigen Zeitpunkt noch nicht möglich, insbesondere da die Fahrzeuge noch nicht geliefert sind. Auch sind zum derzeitigen Zeitpunkt nur sehr wenige vergleichbare Fahrzeuge im Bundesgebiet ausgeliefert, weshalb keine belastbaren Daten zu den Kosten im laufenden Betrieb vorliegen.

Die Wirtschaftlichkeit der Fahrzeuge hängt – unabhängig vom aktuell nicht wirtschaftlich bepreisten Faktor Klimaschutz – von den Anschaffungskosten, den Kosten des Treibstoffs und den sonstigen laufenden Kosten des Unterhalts ab.

Anschaffungskosten:

Die Kosten für die geförderten Fahrzeuge liegen in etwa bei dem Drei- bis Vierfachen über den Kosten für ein konventionell betriebenes Fahrzeug. Dies ist vor allem bedingt durch die kleinen Stückzahlen und den hierin abgebildeten hohen Kosten für die Entwicklung der Technologie.

Analog zur Kostenentwicklung bei anderen technischen Innovationen wird erwartet, dass sich die Anschaffungskosten mit zunehmendem Markthochlauf und dem auftretenden Wettbewerb deutlich reduzieren.

Im laufenden Projekt werden die Mehrkosten durch eine Förderung in Höhe von 90% größtenteils vom Bund übernommen.

Treibstoffkosten:

Basierend auf den aktuellen Treibstoffkosten und den Kosten für den Wasserstoff, wird erwartet, dass sich die laufenden Betriebskosten in etwa kostenneutral abbilden lassen.

Abhängig von der Entwicklung der Kosten für Dieseltreibstoff (wegen CO₂-Bepreisung tendenziell steigend) und den Kosten des Wasserstoffs (Annahme: wegen Mengeneffekten tendenziell sinkend) wird davon ausgegangen, dass sich die Kosten für den Treibstoff im laufenden Betrieb langfristig reduzieren.

Laufende Kosten der Wartung und des Unterhalts:

Zu den Kosten des laufenden Unterhalts sind aufgrund der fehlenden Vergleichswerte noch keine belastbaren Berechnungen möglich. Lediglich die Einsparung der Kfz-Steuer und Mautgebühren mit rund 1.150 €/Fahrzeug ist verbindlich planbar.

Es wird erwartet, dass aufgrund der vergleichsweise wartungsärmeren Elektrotechnologie sich die Kosten für die Wartung der Elektromotoren und der Brennstoffzelle gegenüber den Kosten für die Wartung der Dieselmotoren reduzieren.

Betankung

Ingolstadt verfügt im Stadtgebiet in Autobahnnähe bereits über eine öffentliche PKW-Wasserstoff-Tankstelle des Joint-Ventures H2-Mobility. Da die geförderten Nutzfahrzeuge eine Betankung mit 700 bar erlauben, besteht somit bereits heute eine Betankungsmöglichkeit.

Beitrag zum Umweltschutz

Unter der Voraussetzung, dass die Produktion des verwendeten Wasserstoffs CO₂-neutral erfolgt, sparen die beiden Müllsammelfahrzeuge sowie die LKW-Großkehrmaschine mit Brennstoffzellenantrieb jedes Jahr im Alltag 26.500 Liter Diesel, was ca. 69.960 kg CO₂ entspricht.

5.3 Prognose des Wasserstoffbedarfs der kommunalen Flotten

Bei der Prognose der Fahrzeugbeschaffungen wird davon ausgegangen, dass unter der Voraussetzung einer positiven Technologie-Erprobung nach und nach alle Müllsammelfahrzeuge und bis zu 40 Busse auf einen Brennstoffzellenantrieb umgestellt werden können. Dies geschieht jeweils im Rahmen der regulären Beschaffung neuer Fahrzeuge. Für den Erhalt der Flotte von 13 Müllfahrzeugen beschaffen etwa die INKB durchschnittlich alle drei Jahre drei neue Abfallsammelfahrzeuge (siehe Abbildung 10). Der SBI wurden in der mittelfristigen Haushaltsplanung Mittel für die Beschaffung von vier CO₂-neutralen Fahrzeugen pro Jahr zugesprochen. Da ein Großteil der Umläufe mittels BEV bedient werden kann, ist, unter der Voraussetzung einer positiven Erprobung der Brennstoffzellentechnologie, angedacht, bis zu 2 Brennstoffzellenfahrzeuge jährlich zu beschaffen.

Aus den zuvor beschriebenen Szenarien zur Beschaffung von Bussen und Müllsammelfahrzeugen lässt sich der in Abbildung 10 dargestellte Wasserstoffverbrauch prognostizieren.

Die Erprobung endet bei der INKB voraussichtlich im Jahr 2025, bei der SBI im Jahr 2024. Unter Berücksichtigung des benötigten Zeitraums für die Beschaffung weiterer Fahrzeuge könnten diese ab dem Jahr 2025 bzw. 2026 zum Einsatz kommen.

Mit dem angenommenen Hochlauf an Fahrzeugen seitens der INKB und SBI ergibt sich ein kontinuierlicher Anstieg des H₂-Bedarfs von täglich 50 kg im Jahr 2024 auf 660 kg pro Tag im Jahr 2034. Wird die perspektivische Zielgröße von 40 Bussen erreicht, entsteht ein H₂-Bedarf von 1.200 kg pro Tag.

Die Prognosen wurden für einen Zeitraum von 10 Jahren diskutiert. Aufgrund sich verändernder technischer oder politischer Rahmenbedingungen, beispielsweise einer Verschärfung der Clean-Vehicle-Directive, weiterer Förderprogramme oder eines sinkenden Verbrauchs der Fahrzeuge aufgrund einer technologischen Weiterentwicklung ist eine Abweichung von den vorgeschlagenen Beschaffungs- und H₂-Bedarfsszenarien denkbar. Auch ist seitens INKB, eine positive Technologieerprobung vorausgesetzt, eine schrittweise Umstellung der LKW-Flotte (43 Stück) auf Brennstoffzellenantrieb grundsätzlich vorstellbar. Dies ist letztlich auch abhängig von der Verfügbarkeit entsprechender Fahrzeuge.

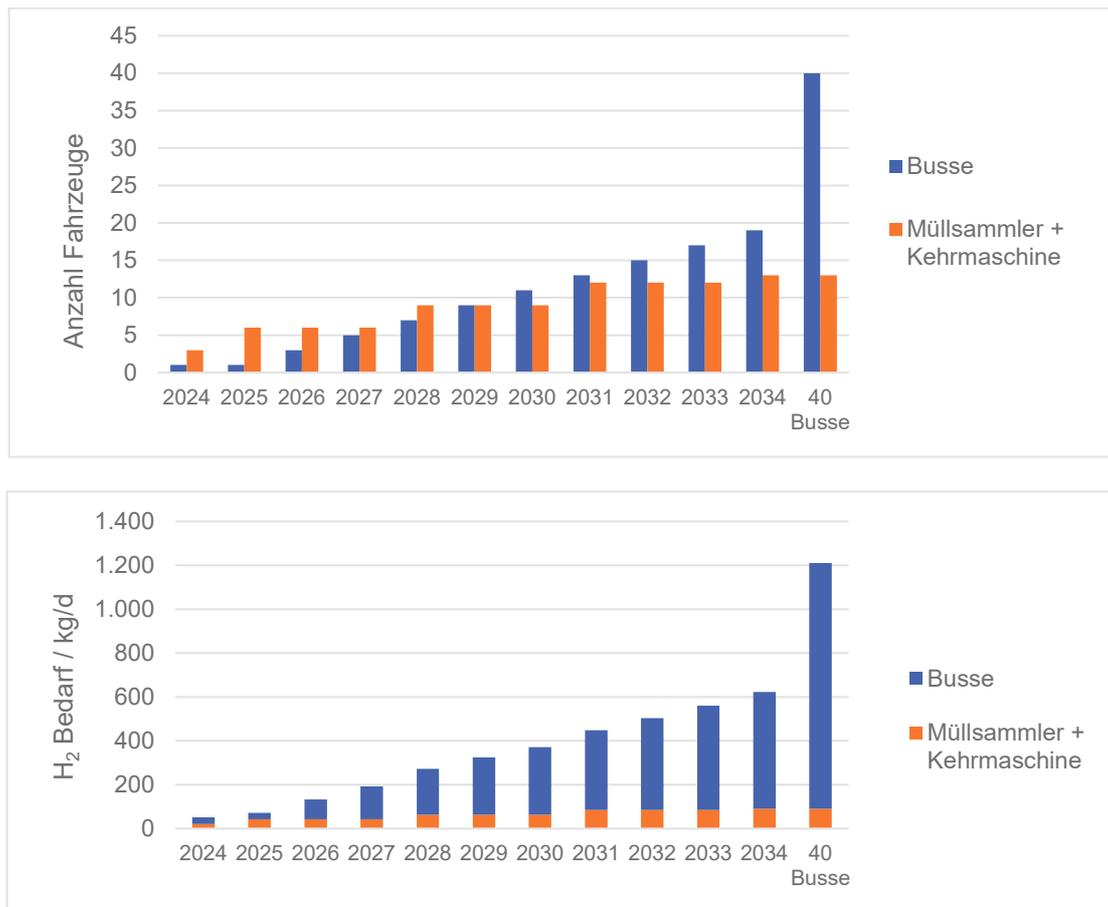


Abbildung 10: Prognose der kommunalen H₂-Fahrzeugflotte und des Wasserstoffbedarfs der kommunalen Flotten

Für die Prognose wurde ein Wasserstoffverbrauch für die eingesetzten Busse nach dem heutigen Stand der Technik von 9 kg Wasserstoff auf 100 km angenommen. Des Weiteren wurde angenommen, dass die eingesetzten BZ-Busse die längsten Umläufe bedienen und damit eine durchschnittliche Fahrleistung von 300 km vollständig ausgenutzt wird. Dies entspricht einem täglichen Wasserstoffverbrauch von 27 kg.

Für die Müllsammelfahrzeuge und Kehrmaschinen wurden die in den Messfahrten ermittelten Verbräuche von durchschnittlich 7,5 kg (Müllfahrzeug) bzw. 10 kg (Kehrmaschine) Wasserstoff pro Tag angesetzt.

Insgesamt ergibt sich wie beschrieben ein H₂-Bedarf für die kommunalen Flotten der INKB und SBI von 1.200 kg Wasserstoff pro Tag. Dieser kann sich durch den Einstieg weiterer Logistik- und Fuhrunternehmer oder anderer Anwendungen in der Industrie wie beispielsweise in Raffinerieprozessen deutlich erhöhen, wie im nachfolgenden Kapitel dargelegt.

5.4 Anwendungsfeld Industrie

Zu Beginn des Fahrzeughochlaufs wird mehr Wasserstoff produziert, als von den kommunalen Fahrzeugflotten benötigt wird. Die GRI hat im Rahmen des Projektes zugesagt, den überschüssigen Wasserstoff abzunehmen und in Raffinerieprozessen zu verwenden.

Im Rahmen der Studie wurde auch Kontakt zu Busbetreibern, Spediteuren, dem Maschinenring sowie dem Landesverband Bayerischer Spediteure e.V. (LBS) und dem Landesverband Bayerischer Transport- und Logistikunternehmen (LBT) e.V. aufgenommen.

In der Wasserstoff-Region Ingolstadt konnte ein großes Interesse und Potential der regionalen Logistikunternehmen festgestellt werden.

- Ein Spediteur, welcher aktuell schon Kraftstoffe von der Gunvor-Raffinerie bezieht, kann sich beispielsweise vorstellen, zukünftig seinen Mineralölhandel durch die Distribution von Wasserstoff als Kerngeschäft zu ersetzen
- Einige Brennstoffzellen-Fahrzeuge der MAN-Bayernflotten werden ab 2023/2024 in der Region in der Kundenerprobung zum Einsatz kommen, ebenso vereinzelte Fahrzeuge der Testflotte der Daimler Trucks, allerdings in einer Stückzahl <10 und mit flüssigem Wasserstoff betrieben. Gespräche mit MAN und Daimler wurden geführt, um eine möglichst genaue Anzahl an Fahrzeuge zu identifizieren, jedoch sind vor der offiziellen Veröffentlichung ihrer Strategie nur geringe Einblicke in das Vorhaben zu erhalten.
- Edeka Südbayern betreibt in Ingolstadt ein zentrales Lager und Umschlagsplatz. Hier sind 400 LKWs für den Gütertransport untergebracht. Die Betreiber haben großes Interesse und können sich vorstellen, bei entsprechender Verfügbarkeit einige LKWs mit Brennstoffzellenantrieb zu betreiben.

Das bestehende Interesse und Potenzial der Dekarbonisierung des Transportsektors wird weitestgehend durch ein mangelndes Angebot an Fahrzeugen ausgebremst. Der zukünftige Markthochlauf ist direkt an die Verfügbarkeit von geeigneten und wirtschaftlich interessanten LKWs, Bussen und Landmaschinen gebunden. Hier wird politische Unterstützung benötigt. Die wenigsten Unternehmen sind bereit, mehr für das Fahrzeug und den Kraftstoff zu bezahlen.

6 H₂-Road-Map

Im Rahmen des *IN2H2*-Förderprojekts wurde die technische und wirtschaftliche Machbarkeit der Einführung von Wasserstoffmobilität in kommunalen Fahrzeugflotten in Verbindung mit lokaler Produktion von Wasserstoff untersucht.

Hierzu wurden die für den Aufbau einer Wasserstoff-Infrastruktur relevanten Handlungsfelder und Rahmenbedingungen in der Region analysiert und zentrale Daten aller Projektbeteiligten erhoben, um so die Voraussetzungen für die Umsetzung des Konzepts zu schaffen.

Daraus wurden verschiedene Alternativpfade und Szenarien abgeleitet, die für ein entsprechendes integriertes Umsetzungskonzept in Betracht gezogen werden können. Es entstand dabei ein klares Bild zu Chancen und Umsetzungsrouten, aber auch zu Hürden und Problemstellungen für ein H₂-Ökosystem in Ingolstadt, die im Folgenden kurz dargestellt werden sollen.

Lokale Produktion

In Bezug auf die Wasserstoff-Produktion bestand die Grundlage des Konzeptantrags in der Idee, dass die GRI im Zuge der Treibstoffherstellung die Kapazität hat, große Mengen an Überschuss-Wasserstoff zu produzieren, der nach Aufreinigung zur Betankung von Brennstoffzellenfahrzeugen mindestens in einer Übergangszeit zur Verfügung stehen könnte. Dieser Wasserstoff ist per Definition „grau“, da er über das Standardverfahren der sogenannten Dampfreformierung aus Erdgas gewonnen wird. Eine physikalische „Grünstellung“ des entstehenden Wasserstoffs durch Ersatz eines Teils des Erdgases durch Biogas ist denkbar, sofern die Anrechenbarkeit regulatorisch im Detail geklärt ist. Diese Produktionsmethodik hat sich in der Konzeptbearbeitung als technisch machbar und als die wirtschaftlichste Alternative herausgestellt. Als weiteres sinnvolles Produktionsszenario wurde die Erzeugung von Wasserstoff durch Elektrolyse von Wasser mit grünem Strom identifiziert.

Dieses Verfahren bedeutet deutlich höhere Investitionen, kann aber ggf. mittelfristig für die GRI sinnvoll sein, wenn die regulatorischen und ökonomischen Rahmenbedingungen einen robusten Business Case für die Produktion von grünem Wasserstoff via Elektrolyse und Nutzung für die Raffinerieprozesse zur Reduzierung des CO₂-Footprints ihrer Produkte ermöglichen.

Während der Laufzeit des *IN2H2*-Projektes wurden die strategischen Optionen der Raffinerien zur Beteiligung an einer Wasserstoffwirtschaft durch die Bundesgesetzgebung und die nationale Förderpolitik stark eingeschränkt. Politisch soll nach aktuellem Stand lediglich der elektrolytisch erzeugte „grüne“ Wasserstoff gefördert werden. Eine schnell wirksame Reduktion von Treibhausgasemissionen z.B. durch biogenen Wasserstoff unter Nutzung bereits vorhandener Anlagen (z.B. Dampfreformierung) wird auf diese Weise zurückgehalten.

Das am 20. Mai 2021 beschlossene Gesetz zur Weiterentwicklung der Treibhausgasminderungsquote zur Umsetzung der Europäischen Energien Richtlinie (RED II) stellt die im Projektkonzept als günstigste Option identifizierte Erzeugung von Wasserstoff aus biogenen Quellen in bestehenden Anlagen (Dampfreformierung in der Raffinerie mit Einsatz von Biogas) zur Verwendung innerhalb der Raffinerie bzgl. der Anrechenbarkeit auf die Treibhausgasminderungsquote deutlich schlechter als der Technologiepfad via Elektrolyse aus grünem Strom. Sie ist allenfalls zur Verwendung im Verkehr nach Maßgabe einer noch zu erlassenden Bundesverordnung möglich, mit ebenfalls geringerer Anrechenbarkeit.

Des Weiteren sind die regulatorischen Einschränkungen bezüglich der Erzeugungsrouten über eine Elektrolyse noch nicht abschließend geklärt. Es ist noch unklar, wie grüner Wasserstoff in Mischsystemen mit grauem Wasserstoff anrechenbar ist. Hierfür sind noch die entsprechenden Durchführungs-Verordnungen zu verabschieden. Darüber hinaus stellen die geltenden regulatorischen Rahmenbedingungen eine Einschränkung bzgl. des wirtschaftlichen Anreizes für die Erzeugung von grünem Wasserstoff dar. In § 12i abs. 3 EEG (Erneuerbare-Energien-Verordnung) ist beispielsweise festgelegt, dass Wasserstoff aus grünem Strom nur innerhalb der ersten 5.000 Vollbenutzungsstunden von der EEG-Umlage befreit ist. Darüber hinaus hält sich die Bundesregierung offen, weitere Anpassungen über Rechtsverordnungen nach § 37d Absatz 2 Satz 1 Nummer 19 zu bestimmen.

Insofern ist hier noch keine Rechtssicherheit und damit auch keine Investitionssicherheit für die GRI gegeben bzw. Investitionsanreize werden versagt. Gunvor steht folglich vor der strategischen Entscheidung, ob mittelfristig die Investition in eine Elektrolyseanlage erfolgen soll, um (politisch) einwandfreien grünen Wasserstoff sowohl für ihre internen Prozesse als auch zur Abgabe an Tankstellen unter wirtschaftlichen Bedingungen produzieren zu können.

Kommunale Nutzfahrzeugflotten als Wasserstoffverbraucher

Busflotte der SBI

Brennstoffzellenbusse sind in der Reichweite und im Handling – die Tankzeiten sind vergleichbar mit Dieselfahrzeugen – batterieelektrischen Bussen überlegen bzw. sind hinsichtlich des Betriebsablaufs am ehesten mit herkömmlichen Dieselfahrzeugen zu vergleichen. Während Brennstoffzellenbusse von ausländischen Herstellern (z.B. Solaris, van Hool) forciert werden, haben sich die führenden deutschen Hersteller MAN und Mercedes (EvoBus) Ende 2020 in ihren offiziellen mittelfristigen Fahrzeugstrategien eindeutig gegen Brennstoffzellen- und für batterieelektrische Busse entschieden. MAN wird auf absehbare Zeit keine Brennstoffzellenbusse anbieten und EvoBus wird erst 2027/28 einen batterieelektrischen Bus mit ergänzender Brennstoffzelle zur Reichweitenverlängerung („Range Extender“) auf den Markt bringen.

Vor dem Hintergrund dieser eindeutigen Herstellerstrategie - mindestens der deutschen Bushersteller - und dem Grundsatz, dass batterieelektrische Fahrzeuge bei kleinen Reichweiten bzw. Umlaufwegen aufgrund des Wirkungsgrads vorzuziehen sind, wird die Umstellung der gesamten Fahrzeugflotte (aktuell ca. 110 Busse) der Stadtbuss Ingolstadt GmbH auf Brennstoffzellenbusse nicht verfolgt. Ca. 65 % der Umlaufwegen der Busflotte liegen unter 200 km und können daher voraussichtlich gut mit batterieelektrischen Bussen, die über Nacht laden können, bedient werden. Daher sind im Rahmen der Beschaffungsstrategie der SBI batterieelektrische Busse der nächste logische Schritt nach Hybridfahrzeugen. Bei den längeren Umläufen, welche aufgrund der eingeschränkten Reichweiten nicht von batterieelektrischen Bussen bedient werden können, sind Brennstoffzellenbusse bei entsprechender Verfügbarkeit eine Alternative, das Potenzial beträgt hier rund 40 Fahrzeuge. Die SBI wird als Ergebnis des Projekts einen Brennstoffzellen-Gelenkbus eines ausländischen Herstellers anschaffen, um im Sinne der Technologieoffenheit den Einsatz unter realen Bedingungen zu erproben. Hierzu soll eine Investitionsmehrkostenförderung über die BMVI-Förderrichtlinie „zur Förderung alternativer Antriebe von Bussen im Personenverkehr“ beantragt werden. Die Betankung während dieser Erprobungsphase, die voraussichtlich im Jahr 2023 startet, erfolgt an der vorhandenen Tankstelle der H2-Mobility (ggf. Umrüstung erforderlich).

Nutzfahrzeuge der INKB

Auch für die Flotte der Ingolstädter Kommunalbetriebe wurden im *IN2H2*-Projekt Möglichkeiten für den Einsatz erster Nutzfahrzeuge mit Brennstoffzellenantrieb untersucht. Hierzu wurden unter anderem Umlaufanalysen zur Abbildung der Strecken- und Einsatzprofile und zur bedarfsgerechten Auslegung der Fahrzeuge durchgeführt. Für die Abfallsammelfahrzeuge kristallisierte sich ein Brennstoffzellenmodul in Kombination mit acht Wasserstofftanks als optimale Fahrzeugkonfiguration heraus. Die Umlaufanalyse für die Kehrmaschine ergab zwei Brennstoffzellenmodule und acht Wasserstofftanks als sinnvolle Auslegung.

Die INKB haben nach Analyse der Streckenprofile im Rahmen des Projekts zwei Abfallsammelfahrzeuge und eine Kehrmaschine der FAUN Umwelttechnik GmbH aus Serienproduktion bestellt. Hierfür erfolgte eine Beantragung von BMVI-Mitteln zur „Förderung von Abfallsammel- und Kehrfahrzeugen mit Brennstoffzellenantrieb“. Nach der vollumfänglichen Bewilligung und der Durchführung einer europaweiten Ausschreibung, bestellten die INKB im August die Fahrzeuge, welche ab Mitte 2022 einer Erprobung im täglichen Betrieb unterzogen werden. Bei erfolgreichem Abschluss der Testphase ist eine sukzessive Umstellung aller Abfallsammelfahrzeuge auf Brennstoffzellenantrieb denkbar.

Die Betankung der Fahrzeuge wurde bis auf weiteres durch eine (mündliche) Vereinbarung mit der bestehenden H2-Mobility-Tankstelle gesichert, wo die Brennstoffzellenfahrzeuge ohne weitere Erüchtigung der vorhandenen Infrastruktur betankt werden können.

Roadmap kommunale Flotten

Nach dem Ende der Erprobungsphase, voraussichtlich im Jahr 2025, erfolgt für die kommunalen Flotten dann eine umfassende Evaluierung der Ergebnisse des Testbetriebs. So werden und anderem die Zuverlässigkeit der Fahrzeuge, technisches Handling, Sicherheitsaspekte, die Akzeptanz der Fahrzeuge durch die Nutzer (Fahrer, Fahrgäste, Werkstattpersonal etc.) bewertet. Darüber hinaus soll die aktuelle Situation in Bezug auf die Fahrzeugverfügbarkeit und Wirtschaftlichkeit analysiert werden, um eine umfassende Entscheidungsgrundlage für die Beschaffung weiterer Fahrzeuge und einen möglichen sukzessiven Flottenhochlauf von Brennstoffzellenfahrzeugen zu erarbeiten.

Tankstelleninfrastruktur

Um von Beginn an eine effiziente und sichere Versorgung der Brennstoffzellenfahrzeuge mit Wasserstoff sicherstellen zu können, wurden verschiedene Konzepte der Betankung ausgearbeitet. Neben der oben beschriebenen Betankung an der H2-Mobility-Tankstelle, die in jedem Fall als Rückfalloption genutzt werden kann, wurde ein neuartiges Betriebskonzept für eine Trailer-Tankstelle entwickelt, die als „Leuchtturmprojekt“ angrenzend an das Raffineriegelände der Gunvor-Raffinerie realisiert werden könnte. Diese - auch für externe Dritte (Logistikunternehmen, Flottenbetreiber etc.) zugängliche Tankstelle - könnte über das „Förderprogramm zum Aufbau einer Wasserstofftankstelleninfrastruktur in Bayern“ gefördert werden. Auf Basis der aktuell vorliegenden Entscheidungsgrundlage kann diese bei entsprechendem Flottenhochlauf und steigenden Bedarfen weiter ausgeplant und projektiert werden. Aktuell ist eine Wirtschaftlichkeit aufgrund fehlender Abnehmer nicht gegeben. Bis zu einer Realisierung der Betankung über in der Raffinerie produzierten Wasserstoff könnte hier zunächst eine externe Beschaffung von (grünem) Wasserstoff erfolgen. Zudem ist bis zur Errichtung der Tankstelle die o.g. Nutzung der öffentlichen H2-Mobility-Tankstelle vorgesehen.

Perspektivisch ist – bei steigender Anzahl von Brennstoffzellenfahrzeugen in den kommunalen Flotten – auch die Betankung an eigenen Betriebshof-Tankstellen denkbar bzw. wird dann notwendig, wenn sich die Fahrten zu einer externen Betankungsoption nicht mehr effizient in die Umlaufpläne/Betriebsabläufe integrieren lassen bzw. die benötigten Wasserstoffmengen die Kapazitäten beispielsweise der H2-Mobility-Tankstelle übersteigen. Der Wasserstoff für eine derartige Betriebshof-Tankstelle könnte dann über Trailer etwa von der Gunvor-Raffinerie angeliefert werden.

Abbildung 11 gibt einen Überblick zu kommenden Meilensteinen und Schritten hin zu einer umfassenden Wasserstoff-Infrastruktur in Ingolstadt und der Region. Hierbei ist darauf hinzuweisen, dass die dargestellten und beschriebenen Maßnahmen von zahlreichen externen Rahmenbedingungen, zukünftigen Entwicklungen und Unwägbarkeiten abhängen, sodass zum jetzigen Zeitpunkt kein starrer „Fahrplan“ für die Etablierung der Wasserstoff-Mobilität aufgestellt werden kann.

Vielmehr wurden im Projekt für die einzelnen Schritte der Wertschöpfungskette Konzepte und Szenarien erarbeitet, die stetig an die entsprechenden Entwicklungen angepasst, kontinuierlich weiterentwickelt werden müssen und als Basis für weitere Umsetzungsschritte dienen.

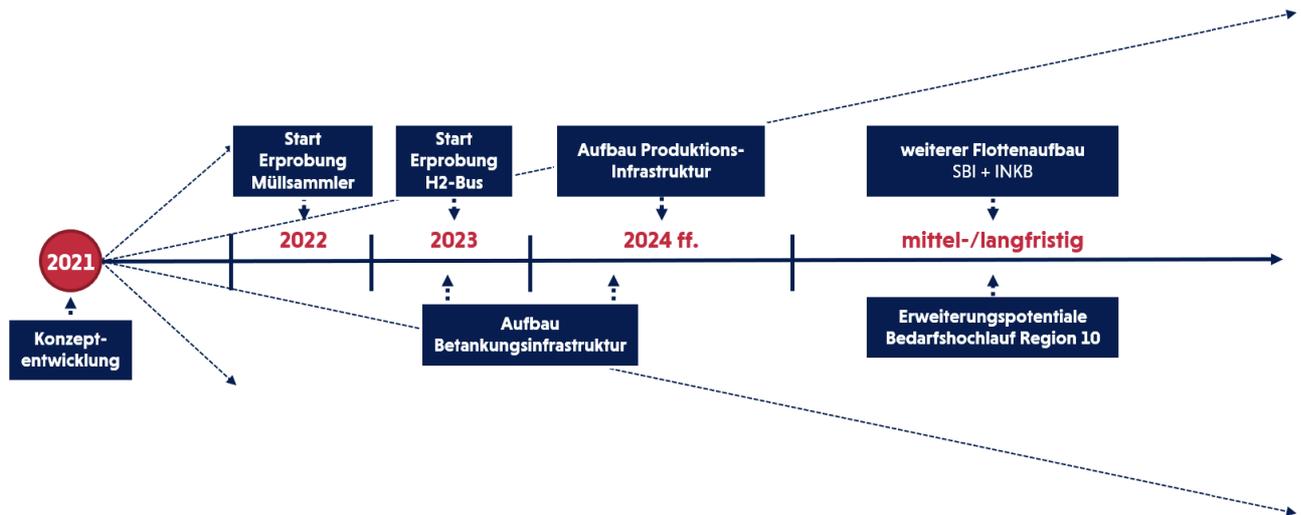


Abbildung 11: Mögliche H₂ Road-Map

7 Fazit und weiteres Vorgehen

7.1 Zusammenfassung Projektergebnisse

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass im *IN2H2*-Förderprojekt eine Roadmap für den stufenweisen Einstieg in die lokale Wasserstoffmobilität und -produktion entwickelt wurde, die die folgenden Schritte umfasst:

Auf Fahrzeugseite wird eine Erprobungsphase gestartet, in der zwischen 2022 und 2025 im Sinne der Technologieoffenheit der Einsatz von Brennstoffzellenfahrzeugen unter realen Bedingungen bei SBI und INKB getestet wird. Dabei ist klar, dass der Einsatz von Brennstoffzellenbussen eine sinnvolle Ergänzung zu den für den größten Teil der Busflotte zu priorisierenden batterieelektrischen Fahrzeugen sein kann. Die Betankung der Flotten würde von einer lokalen Wasserstoffproduktion profitieren, kann aber auch unabhängig davon dargestellt werden.

Parallel und unabhängig von der möglichen Darstellung eines größeren Bedarfs an Wasserstoff für kommunale Fahrzeuge wird die Gunvor-Raffinerie die strategische Entscheidung vorbereiten, in die Produktion grünen Wasserstoffs per Elektrolyse zu investieren, mit dem neben der Abgabe für den Verkehr auch eine Anrechnung auf die Treibhausgasminderungsquote bei der Raffinerie-internen Verwendung erzielen werden kann. Die SWI sind hier ein möglicher Partner. Für die gesetzlich grundsätzlich bestätigte Option, biogenen Wasserstoff als Abfallprodukt nur zur Abgabe für den Verkehr zu produzieren, fehlt mangels der entsprechenden Verordnungen bis auf weiteres die Investitionssicherheit. Für eine effiziente und rentable Wasserstoff-Infrastruktur werden die kommunalen Bedarfe mittelfristig nicht ausreichen, so dass die Erschließung von weiteren Bedarfen und Einbeziehung externer Abnehmer erforderlich sein wird. Im Verkehrsbereich sind dies insbesondere die Schwerlastverkehre. Hier besteht durch die verkehrlich gute Lage an der Autobahn A9 als Haupt-Nord-Süd-Achse sowie einer Vielzahl in der Region ansässigen Logistikunternehmen und Speditionen grundsätzlich ein großes Potential. Auch besteht seitens dieser Unternehmen vielfach Interesse an der Beschaffung und Erprobung von Brennstoffzellenfahrzeugen, jedoch ist die Fahrzeugverfügbarkeit hier derzeit noch nicht gegeben.

Parallel prüfen Gunvor und SWI Fördermöglichkeiten für die gemeinsame Errichtung einer Tankstelle auf der Basis des im Rahmen des Projekts ausgearbeiteten neuen Trailer-Konzepts bei der Gunvor-Raffinerie. Diese Tankstelle kann kommunalen Fahrzeugen, aber vor allem auch Nutzfahrzeugen privater Betreiber zur Verfügung stehen und den Markthochlauf bis zu einer späteren Eigenproduktion grünen Wasserstoffs unterstützen.

Mit diesem modularen Konzept wird sichergestellt, dass zukünftige Chancen im entstehenden Wasserstoffmarkt genutzt werden können und gleichzeitig die sich dynamisch verändernden Randbedingungen insbesondere in Bezug auf Fahrzeugverfügbarkeit, Entwicklung der rechtlichen Rahmenbedingungen und Bedarfsentwicklung beobachtet und berücksichtigt werden können.

Mit den erarbeiteten Ansätzen wurde außerdem auch der Grundstein für etwaige zukünftige Projektvorhaben, Studien und Förderanträge, wie etwa eine Bewerbung im Rahmen der HyPerformer-Förderung des HyLand-Wettbewerbs, gelegt. Hier können – auf die gewonnenen Erkenntnisse aufbauend – die entstandenen Konzeptideen weiterentwickelt und umgesetzt werden.

7.2 Weiteres Vorgehen in Bezug auf das etablierte Netzwerk

Im Verlauf des Projekts wurden regionale Strukturen im Bereich der Wasserstofftechnologie geschaffen, die nach Projektende weiterverfolgt und ausgebaut werden sollen. So wird sich beispielsweise das IN2H2-Konsortium auch weiterhin regelmäßig zum Austausch zusammenfinden, um als "IN4H2" (Arbeitstitel) die angestoßenen Aktivitäten, geknüpften Beziehungen und entstandenen Projektideen voranzutreiben und den Know-How-Aufbau zu forcieren. Auch soll die Zusammenarbeit mit den umliegenden Landkreisen der Region, die durch IN2H2 initiiert wurde, weiter intensiviert und im Rahmen von gemeinsamen Projekten an der Etablierung der Wasserstofftechnologie gearbeitet werden.

Die geknüpften Kontakte zu anderen HyLand-Regionen und Projekten im Rahmen des HyLand-Netzwerks, die sich als wertvolle Informationsquelle für den gemeinsamen Erfahrungsaustausch etabliert haben, sollen weiter gepflegt werden. Die Region Ingolstadt kann hier auch in Zukunft wichtige Erkenntnisse und eigene Learnings einbringen, um anderen Kommunen und Projekten Hilfestellung und Tipps zur Verfügung zu stellen – beispielsweise gewonnene Erkenntnisse aus der Technologieerprobung bei SBI und INKB – und darüber hinaus für die künftigen Aktivitäten von den Erfahrungen anderer Regionen profitieren.

7.3 Akzeptanz und Öffentlichkeitsarbeit

Parallel zur technischen bzw. wissenschaftlichen Ausarbeitung des Wasserstoffkonzepts war die Information und Beteiligung der Bürger sowie die öffentlichkeitswirksame Darstellung der Initiative während der gesamten Projektlaufzeit von großer Bedeutung. Daher wurden im Projekt verschiedene Formate der Öffentlichkeitsarbeit durchgeführt, darunter Webinare, Vorträge und eine Veranstaltung auf der Landesgartenschau.

Wasserstoff-Aktionstag 2019

Bereits in der Bewerbungsphase für die HyExperts-Förderung fand mit dem "Wasserstoff-Aktionstag" am 11. Dezember 2019 eine erste Veranstaltung zum Thema Wasserstoff in Ingolstadt statt, die auf enormes Interesse stieß. Die Ingolstädter Bevölkerung konnte sich dabei über die vielfältigen Anwendungsgebiete der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie informieren sowie erste Einblicke in die geplanten Aktivitäten in der Region gewinnen.

Zusätzlich zu mehreren Impulsvorträgen für das Fachpublikum aus Politik, Industrie und Wissenschaft etwa über die Fördermöglichkeiten für Wasserstoffprojekte oder die verschiedenen Einsatzmöglichkeiten von Brennstoffzellen, waren für die Ingolstädter Bürger zahlreiche Exponate und Anschauungsmaterial (z.B. Brennstoffzellen-Ape) ausgestellt. Interessierte Besucher hatten die Gelegenheit, mit Fachleuten ins Gespräch zu kommen. Unter dem Titel „Neue Mobilität – Wohin geht die Reise?“ fand zudem eine Podiumsdiskussion mit Experten von Stadt, Technischer Hochschule, Clean Energy Partnership sowie Vertretern der „jungen Generation“ – politisch interessierten Schülern und Studenten – statt.

Tag des Wasserstoffs 2021

Am 22. August 2021 stellten die Projektpartner zudem beim „Tag des Wasserstoffs“ auf der Landesgartenschau in Ingolstadt, das erarbeitete regionale Wasserstoffkonzept vor. Dabei wurden an mehreren Orten auf dem LGS-Gelände sowohl Anschauungsobjekte und Prototypen als auch Informationen rund um die Wasserstoff-Mobilität und im Speziellen das *IN2H2*-Projekt dargestellt.

Die *IN2H2*-Projektpartner und weitere Initiativen der Region präsentierten sich und laufende Aktivitäten im Bereich Wasserstoff. Neben verschiedenen Anschauungsobjekten und Infomaterial war etwa auch eine Brennstoffzellen-Kehrmaschine der FAUN Umwelttechnik GmbH vor Ort zu sehen. Mit einem Informationsstand war auch die „Roadshow Elektromobilität“ des Bundesverkehrsministeriums beim Tag des Wasserstoffs vor Ort. Außerdem wurden in Zusammenarbeit mit der Technischen Hochschule Ingolstadt interessante Versuchsaufbauten gezeigt, die den Besuchern die Technologien „Brennstoffzelle“ und „Elektrolyse“ anschaulich und verständlich näherbrachten. Am Nachmittag fand eine Podiumsdiskussion statt, bei der sich Experten aus Politik, Kommune, Wirtschaft und Wissenschaft über das Ingolstädter Wasserstoffkonzept austauschten, die Vor- und Nachteile verschiedener alternativer Antriebsarten erörtern und sich mit der Zukunft des Verkehrs auseinandersetzten.

Website + Newsletter

Seit Beginn des Projektes wurde darüber hinaus eine Projekt-Website (www.wasserstoffregion-ingolstadt.de) aufgebaut, die über aktuelle Entwicklungen im Projekt sowie interessante Neuigkeiten und Veranstaltungen rund um das Thema Wasserstoff informiert und auch nach Projektabschluss weiter gepflegt werden soll. Zusätzlich wurden die Informationen und Nachrichten auch über einen Newsletter verteilt, der mittlerweile über 250 Abonnenten aus der Region und ganz Deutschland aufweist.

IN2H2-Webinare

In zwei Webinaren (Januar + Juli) haben die Projektpartner zusätzlich über die *IN2H2*-Projektergebnisse und die laufenden Wasserstoff-Aktivitäten in der Region informiert. Es wurde über den jeweils aktuellen Stand des im Projekt erarbeiteten Konzepts berichtet und ein Ausblick auf die kommenden Entwicklungen in der Region im Bereich Wasserstoff gegeben. Darüber hinaus wurden im Rahmen der Webinare auch Unternehmerinnen und Unternehmer der Region (z.B. Flottenbetreiber, Logistik-Firmen etc.) als potentielle zukünftige Wasserstoffabnehmer angesprochen und ihnen Anknüpfungspunkte/Perspektiven für eine mögliche Zusammenarbeit aufgezeigt. Ergänzt wurden die Informationen zum Projekt jeweils durch Impulse von Fachexperten im Bereich der Wasserstofftechnologie, die etwa Einblicke in aktuelle Technologietrends gaben, vielfältige Fördermöglichkeiten vorstellten oder die regionalen Aktivitäten im Kontext der nationalen und globalen Strategien einordneten. Die Online-Veranstaltungen stießen mit jeweils knapp 200 Teilnehmern in der Bevölkerung und der regionalen Unternehmerschaft auf großes Interesse.

Vorträge/Präsentationen

In Ergänzung zu den oben genannten öffentlichkeitswirksamen Veranstaltungen zur Bürgerinformation und -beteiligung, wurde das *IN2H2*-Projekt regelmäßig auch in Form von Vorträgen in unterschiedlichen Gremien repräsentiert und dargestellt. So fanden bzw. finden beispielsweise bei den Ingolstädter Nachhaltigkeitstagen 2020 und 2021 (Oktober) Vortragsslots statt, in denen das *IN2H2*-Konzept vorgestellt wird. Auch bei verschiedenen Veranstaltungen im Rahmen des HyLand-Netzwerks oder im Wasserstoffbündnis Bayern wurde die *IN2H2*-Initiative bereits vorgestellt.

7.4 Übertragbarkeit auf andere Regionen

Das erarbeitete modulare Konzept mit einer vorgesehenen zentralen Produktion von Wasserstoff aus regenerativen Energien über eine Elektrolyse-Anlage in Kombination mit der Verteilung des produzierten Wasserstoffs über eine Trailer-Lösung ist auch auf viele andere Regionen mit einer großen Energiequelle (z.B. Raffinerie, Windpark, PV-Park etc.) übertragbar. Es ermöglicht große Reichweiten, den Aufbau einer günstigen Tankstelleninfrastruktur und damit die Versorgung eines großen Gebiets (Umfeld +/- 150km) mit Wasserstoff.

Generell kann Ingolstadt als mobilitätsgeprägte, technologieaffine und wirtschaftsstarke Region mit zahlreichen innovativen Unternehmen eine Vorreiterrolle in der Frage übernehmen, wie eine Kommune durch Innovationsinitiativen und wegweisende Beschaffung einen „technology pull“ erzeugen und so die Markteinführung neuer Technologien befördern kann. Die im Rahmen des Projekts gewonnen Erkenntnisse sowohl in der konkreten Planung als auch methodisch im Bereich des kommunalen Innovationsmanagements und der Bürgerbeteiligung werden Interessenten zur Verfügung gestellt.

Dazu werden die Projektpartner auch in Zukunft ihre Netzwerke, Verbände und Gremien bzw. Foren nutzen, in denen sie mitwirken bzw. eine Führungsrolle übernehmen, darunter der Verband Deutscher Verkehrsunternehmen, der Deutsche Städtetag, die Europäische Metropolregion München u.v.m. Auch über bestehende bzw. zu intensivierende Kontakte zur Clean Energy Partnership, dem Deutschen Wasserstoff und Brennstoffzellen-Verband, dem Mineralölwirtschaftsverband, dem Wasserstoffbündnis Bayern, Umweltverbänden und Gewerkschaften sollen die Ergebnisse verbreitet werden.

7.5 Reichweite des Projektes in und über die Region hinaus

Als „First Mover“ unterstützt Ingolstadt die Region bei deren Wasserstoffinitiativen und Projektvorhaben. Der Landkreis Pfaffenhofen wurde bei der inhaltlichen Ausarbeitung einer Bewerbung als Satellitenstandort für den bayerischen Antrag für ein Wasserstoff-Technologie- und Anwendungszentrum unterstützt. Der vorgesehene Satelliten-Standort (Reichertshofen) wurde in das Bewerberkonsortium um den Standort Pfeffenhausen (Landkreis Landshut) aufgenommen, das neben Duisburg, Chemnitz und Norddeutschland schließlich einer von vier ausgewählten Standorten ist, an denen ein Wasserstoff-Technologie- und Anwendungszentrum entsteht. Die Region 10 wird sich hier auch in der weiteren Ausarbeitung und Realisierung des Zentrums intensiv einbringen.

Darüber hinaus hat sich das Projektkonsortium auch an der Antragstellung des Landkreises Pfaffenhofen für die HyExperts-Förderung beteiligt. Es wurden konkrete Anknüpfungspunkte bzw. gegenseitige Ergänzungspotenziale identifiziert, um gemeinsam die Region auf dem Weg zu einem Wasserstoff-Kompetenzzentrum voranzubringen.

Ebenso wurden die Nachbarlandkreise Neuburg-Schrobenhausen und Eichstätt im Rahmen des Projekts beraten. Die Zusammenarbeit soll fortgeführt bzw. weiter intensiviert werden, um Erfahrungen auszutauschen und gemeinsame Projekte zu initiieren.

So ist beispielsweise eine gemeinsame Interessenbekundung der Region für die Umsetzung des Innovationsclusters „E-Highway Bayern“ entlang der A9 zwischen München und Nürnberg geplant, die aktuell von der Projektgruppe unter Leitung des Bayerischen Verkehrsministeriums als eine mögliche Alternative untersucht wird. Dort soll dann die Kombination verschiedener Antriebstechnologien (Batterie, Brennstoffzelle) erprobt und Wasserstoff-Tankstellen und Ladeinfrastruktur errichtet werden.

Außerdem arbeiten die Stadtwerke Ingolstadt mit der Gemeinde Karlshuld (Landkreis Neuburg-Schrobenhausen) an der Projektierung einer Freiflächen-Photovoltaik-Anlage, die neben der Erzeugung grünen Stroms für die Region auch einen Elektrolyseur zur Produktion grünen Wasserstoffs für die regionale Vermarktung erhalten soll.

8 Quellen

- Brahms, R. D. (2021). *Rechtliche Einschätzung - Produktion von Wasserstoff aus Biomethan*. Hamburg: Brahms Nebel & Kollegen.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). (2020). *Nationale Wasserstoffstrategie*. Berlin.
- CertifHy. (2020). *CertifHy - The first European Guarantee of Origin for Green & Low Carbon Hydrogen*.
- Fraunhofer IWES. (12. 04 2021). *Fraunhofer IWES Windmonitor*. Von http://windmonitor.iee.fraunhofer.de/windmonitor_de/3_Onshore/5_betriebsergebnisse/1_volllaststunden/ abgerufen
- Harry Wirth, Fraunhofer ISE. (20. 02 2021). *Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland*. Von www.pv-fakten.de: www.pv-fakten.de abgerufen
- Milanzi, S., Spiller, C., Grosse, B., Hermann, L., Kochem, J., & Müller-Kirchenbauer, J. (2018). *Technischer Stand und Flexibilität des Power-to-Gas-Verfahrens*. Berlin.
- Smolinka, T. (2018). *Studie IndWEDe*. Berlin: NOW GmbH.
- Sunfire GmbH. (12. 04 2021). *Sunfire.de*. Von www.sunfire.de abgerufen
- TÜV SÜD Industrie Service GmbH. (2020). *TÜV SÜD Standard CMS 70, Version 01/2020 - Erzeugung von grünem Wasserstoff*.

9 Anhang

9.1 Zusammensetzung des Strompreises

Nachfolgend ist die Zusammensetzung des Strompreises aufgeführt wie in der Wirtschaftlichkeitsberechnung berücksichtigt. Hierbei werden exemplarisch 2 Fälle mit unterschiedlichen Volllaststunden berechnet.

Installierte Leistung	MW	1,00	11,50	11,50
Benutzungstunden	h/a	2.000,00	2.000,00	8.000,00
Jahresverbrauch	MWh/a	2.000,00	23.000,00	92.000,00

		Voller Satz Hochspannung	Reduzierter Satz ELY + Großverbraucher	IN2H2 Hochspannung	IN2H2 Hochspannung	Begründung
Strombezugskosten	€/MWh	110,92 €		100,45 €	64,97 €	
Bezug Börse	€/MWh	- €		50,00 €	50,00 €	Für Lieferjahr 2022
Ökostromzuschlag	€/MWh	- €		1,00 €	1,00 €	
Grundpreis	€/MWh	- €		- €	- €	
Netzentgelte	€/MWh	13,24 €	- €	48,45 €	13,24 €	Energiewirtschaftsgesetz § 118 Übergangsregelungen (6); Nach dem 31. Dez. 2008 neu errichtete Anlagen zur Speicherung elektrischer Energie, die ab 4. Aug. 2011, innerhalb von 15 Jahren in Betrieb genommen werden, sind für einen Zeitraum von 20 Jahren ab Inbetriebnahme hinsichtlich des Bezugs der zu speichernden elektr. Energie von den Entgelten für den Netzzugang freigestellt
Spannungsebene		HS		HS	HS	
Arbeitspreis	€/MWh	1,50 €		1,50 €	1,50 €	
Leistungspreis	€/kW	93,90 €		93,90 €	93,90 €	
Leistungspreis	€/MWh	11,74 €		46,95 €	11,74 €	
Steuern, Abgaben, Umlagen	€/MWh	97,68 €		1,00 €	0,73 €	
Messstellenbetrieb	€/a	547,44 €		547,44 €	547,44 €	
Messstellenbetrieb	€/MWh	0,27 €		0,02 €	0,01 €	
Konzessionsabgabe	€/MWh	1,10 €		- €	- €	

KWK-G Umlage	€/MWh	2,45 €	- €	- €	- €	Reduzierte Umlage mind. 0,030 ct/kWh für Bereich über 1.000.000 kWh/a (nur mit EEG Begrenzungsbescheid nach der BesAr §§ 63 ff. EEG) Für Strom, der von einem Unternehmen zur Herstellung von Grünem Wasserstoff verbraucht wird, verringert sich die KWKG-Umlage unabhängig vom Verwendungszweck des hergestellten Wasserstoffs nach Maßgabe des § 69b des Erneuerbare-Energien-Gesetzes auf null. (https://www.gesetze-im-internet.de/kwkg_2016/_27d.html)
§19 StromNEV Umlage	€/MWh	4,32 €	0,25 €	0,43 €	0,29 €	Letztverbrauchergruppe C' bei >10 ⁶ kWh; SKI >4%
§17 f EnWG Offshore-Netzumlage	€/MWh	3,95 €	0,30 €	0,46 €	0,34 €	Voraussetzung seit 2019 Über 1.000.000 kWh/a und Vorlage EEG-Begrenzungsbescheids nach der BesAr §§ 63 ff. EEG
Umlage für abschaltbare Lasten §18 AbLaV	€/MWh	0,09 €	0,09 €	0,09 €	0,09 €	
Stromsteuer	€/MWh	20,50 €	- €	- €	- €	Vollständige Steuerentlastung nach § 9a StromStG für Elektrolyseure
EEG-Umlage	€/MWh	65,00 €	- €	- €	- €	Höhe der Vergünstigung Bereich 0-1 GWh keine Vergünstigung, d.h. volle EEG-Umlage; Bereich >1 GWh 15 % der EEG-Umlage ab 17 % SKI bzw. 20% EEG-Umlage ab 14% SKI § 69b Herstellung von Grünem Wasserstoff; Der Anspruch auf Zahlung der EEG-Umlage verringert sich auf null für Strom, der von einem Unternehmen zur Herstellung von grünem Wasserstoff verbraucht wird [...], wenn die Einrichtung über einen eigenen Zählpunkt mit dem Netz verbunden ist. 1. nicht in Kalenderjahren anwendbar in denen die EEG Umlage nach §64a begrenzt ist; 2. erst anwendbar, wenn Anforderungen an die Herstellung von grünem Wasserstoff bestimmt wurden (§93); 3. nur bei Einrichtungen, die vor dem 01.01.2030 in Betrieb genommen wurden https://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/_69b.html

Impressum

Die Entwicklung der Region Ingolstadt als Wasserstoffregion wird im Rahmen des Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP2) mit insgesamt 299.952,00 Euro durch das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur gefördert. Die Förderrichtlinie wird von der NOW GmbH koordiniert und durch den Projektträger Jülich (PtJ) umgesetzt.