

H₂O

ERGEBNISBERICHT 2023
LANDESHAUPTSTADT MÜNCHEN



Gefördert durch:



Koordiniert durch:



Projekträger:



Vorwort 3

Zusammenfassung 4

Die HyStarter-Region Landeshauptstadt München 5

H₂-Potenziale in der Landeshauptstadt München 8

Vision 2030 Landeshauptstadt München 12

Handlungsfelder und Umsetzungsstrategien 16

 Übersicht 16

 Regionales Technologiekonzept 18

 Wasserstoff-Erzeugung aus erneuerbaren Energien 22

 Wasserstofftransport 25

 Ausbau der Wasserstofftankstelleninfrastruktur 26

 Einsatz von Wasserstoff in der Logistik 28

 Einsatz von Wasserstoff in Sonderfahrzeugen 30

 Einsatz von Wasserstoff in der Industrie inkl. Erzeugung 31

 Autarke Gebäudeenergieversorgung mittels Wasserstoff 32

 Dekarbonisierung der Fernwärme 33

Anhang 34

Abkürzungsverzeichnis 35

IMPRESSUM

Herausgeber
 EE ENERGY ENGINEERS GmbH
 Wissenschaftspark, Munscheidstraße 14
 45886 Gelsenkirchen

Projektleitung
 Landeshauptstadt München
 Referat für Klima- und Umweltschutz
 Sachgebiet „Klimaneutrale Antriebe“
 Dr. Uwe Hera & Rebecca Wippersteg,
 hystarter.rku@muenchen.de

Verantwortlich für den Inhalt
 Frederik Budschun und Dr. Frank Koch
 (EE ENERGY ENGINEERS GmbH)
 Unter Mitarbeit von:
 Nadine Hölzinger (Spilett n/t GmbH)
 Rebecca Wippersteg (Landeshauptstadt München)

Gestaltung, Layout, Satz und Illustrationen
 Peppermint Werbung Berlin GmbH
 Milastr. 2 | 10437 Berlin
 www.peppermint.de

Druck
 WOESTE DRUCK + VERLAG GmbH & Co KG
 Im Teelbruch 108 | 45219 Essen-Kettwig
 E-Mail: service@woeste.de | www.woeste.de

Erscheinungsjahr
 2023

Die Strategiedialoge zu HyStarter wurden im Rahmen des HyLand-Programms durch das Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) beauftragt und durch die NOW GmbH koordiniert.



Liebe Leserinnen und Leser,

um einer der drängendsten Herausforderungen unserer Zeit – dem Klimawandel – auf lokaler Ebene effektiv zu begegnen, hat sich die Landeshauptstadt München ein ambitioniertes Ziel gesetzt: sie will bis 2035 klimaneutral werden, und die Stadtverwaltung soll dies schon bis 2030 erreichen.

Wir haben mit unserem Referat für Klima- und Umweltschutz, das eigens für die Umsetzung entsprechender Maßnahmen gegründet wurde, in kürzester Zeit viele Meilensteine erreicht, mit denen unsere Stadt klimaneutral und klimaresilienter gemacht werden soll. Dazu gehören beispielsweise zwei wegweisende Grundsatzbeschlüsse, die nicht nur den strukturellen Rahmen und ein deutlich erweitertes Klimabudget geschaffen haben, sondern auch anhand von knapp 70 konkreten Beispielen die Maßnahmen aufzeigen, die zur Regulierung unseres Stadtklimas und zur Reduzierung von CO₂-Emissionen beitragen.

In diesem Kontext gilt es aber auch, kontinuierlich neue und zukunftsfähige Technologien und deren Potenziale zu analysieren. Die Wasserstoff- und Brennstoffzellen-

technologie kann beispielsweise einen wichtigen Beitrag zur Energiewende leisten, da Wasserstoff erneuerbar erzeugt und zudem gespeichert werden kann.

Wir freuen uns daher sehr, dass wir mit der Teilnahme am HyStarter-Prozess die Chance erhalten haben, einen Fahrplan für eine lokale Wasserstoffwirtschaft aufzubauen. Gemeinsam mit unserem engagierten Akteur*innennetzwerk aus Gewerbe, Wissenschaft und Forschung, Gesellschaft sowie seitens kommunaler Eigenbetriebe wurden aussichtsreiche Projektideen identifiziert und Synergieeffekte sowie der Wissenstransfer untereinander gefördert. Der vorliegende Abschlussbericht zeigt auf, wie konkrete Herstellungs- und Transportpfade sowie Einsatzbereiche für Wasserstoff in der Region München im Jahr 2030 aussehen könnten.

Mein ausdrücklicher Dank gilt allen beteiligten Akteur*innen für das erfolgreiche Zusammenwirken über ein Jahr hinweg und das große Engagement, mit dem an dem Zukunftsthema Wasserstoff gearbeitet wurde.

Ihre
Christine Kugler
 Referentin für Klima- und Umweltschutz



Mitte 2022 fand das Auftaktgespräch zum HyStarter-Projekt zwischen der Landeshauptstadt München (LHM) und dem Projektteam der EE ENERGY ENGINEERS GmbH statt. Seitdem trafen sich motivierte Akteur*innen aus der Region und haben bei insgesamt sechs Strategiedialogen über die Vor- und Nachteile von Wasserstoff, die regionalen Erzeugungspotenziale, mögliche Einsatzfelder, notwendige Infrastrukturen sowie zukünftige Herausforderungen diskutiert, um gemeinsam eine Vision für die regionale Wasserstoffwirtschaft zu entwickeln. Die Strategiedialoge wurden vor Ort bei der LHM sowie verschiedenen Gastgeber*innen wie der Stadtwerke München GmbH (SWM) oder white energy GmbH durchgeführt.

Dieser Bericht präsentiert die wichtigsten Themen und Ergebnisse des HyStarter-Projekts, welches neben der Förderung von Klima- und Umweltschutz die Entwicklung neuer Wertschöpfungsketten zum Ziel hatte. Der Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft sollte dabei stets auf ökologisch, ökonomisch und sozial nachhaltige Weise umgesetzt und der Nutzen und Einsatz von Wasserstoff stets im Vergleich zu anderen nachhaltigen Alternativen hinsichtlich Effizienz geprüft werden. Die gemeinsam entwickelte Vision einer Wasserstoffwirtschaft wurde in einem Basis- und drei Alternativszenarien approximiert und umfasst ein H₂-Erzeugungssystem, das auf regionalen Ressourcen und Potenzialen basiert.

Zu den Akteur*innen zählen Unternehmen und Institutionen entlang der gesamten Wertschöpfungskette von der H₂-Produktion über die H₂-Distribution hin zur H₂-Anwendung in der Mobilität sowie in der Industrie und Gebäudeenergieversorgung aus der Landeshauptstadt München und den angrenzenden Landkreisen. Die LHM verfügt über ein sehr starkes Akteur*innennetzwerk mit viel Erfahrung und Know-how. Zudem sind in München bereits mehrere Wasserstofftankstellen (HRS) für Pkw in Betrieb. HRS für Schwerlastfahrzeuge befinden sich bereits in der Planung und Umsetzung. Zusätzlich wurden erste Müllsammelfahrzeuge bestellt und von verschiedenen Akteur*innen in der Praxis getestet. Insbesondere der Klimaschutz und die Einhaltung der CVD-Richtlinie sorgen für steigendes Interesse an H₂-Fahrzeugen bei den Anwender*innen. Der Einsatz von Wasserstoff in der industriellen Fertigung sowie der Gebäudeenergieversorgung wurden in dem Konzept ebenfalls analysiert. Im Rahmen der Potenzialanalyse wurde schnell deutlich, dass der zukünftige H₂-Bedarf nicht regional per Eigenproduktion gedeckt werden kann, weshalb es der Region zu Gute kommt, dass sie bis 2030 an das European Hydrogen Backbone angeschlossen wird. Regionale H₂-Erzeugungsprojekte sind deshalb aber nicht minder wichtig und finden ebenfalls Eingang in den vorliegenden Bericht, sodass alle Stufen der H₂-Wertschöpfungskette und regionale Synergien integriert wurden.

Die Landeshauptstadt München hat sich mit ihrer HyStarter-Bewerbung als eine von 15 Wasserstoffregionen in Deutschland aus insgesamt 65 Bewerbungen durchgesetzt. HyStarter-Regionen sind Teil des „HyLand“-Programms, welches von der Nationalen Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NOW GmbH) und dem Projektträger Jülich (PtJ) begleitet wird und vom Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) beauftragt ist. HyStarter verfolgt das Ziel, bei der Sensibilisierung für das Thema Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien sowie der initialen Organisation der Akteur*innenlandschaft zu unterstützen. Die LHM und der durch sie aufgestellte Akteur*innenkreis wurde dabei von der EE Energy Engineers GmbH begleitet und unterstützt. Weitere fachliche Expertise stellte der Konsortialpartner Spilett new technologies zur Verfügung.

Die bayerische Landeshauptstadt gehört zu den attraktivsten Wirtschafts- und Innovationsstandorten Europas. Die Isar-Metropole München ist durch namhafte Global Player, gerade im industriellen sowie im Hightechbereich, eine breite Basis eines innovativen Mittelstandes und eine kreative und breit aufgestellte Start-up-Szene gekennzeichnet. Hinzu kommt eine Vielzahl an Forschungseinrichtungen, Hochschulen und Universitäten. Diese schaffen ein Umfeld, in dem seit vielen Jahren überaus erfolgreich neue Produkte und Dienstleistungen entwickelt werden. Innovation, Forschung und Wissenschaft sind die wesentlichen Rahmenbedingungen für die Wettbewerbsfähigkeit und den Erfolg Münchens als digitaler Zukunftsstandort. In diesem Kontext gilt es, neue und zukunftsfähige Technologien wie die Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie und deren Potenziale für die Landeshauptstadt München zu analysieren und ein tragfähiges Konzept zu entwickeln.

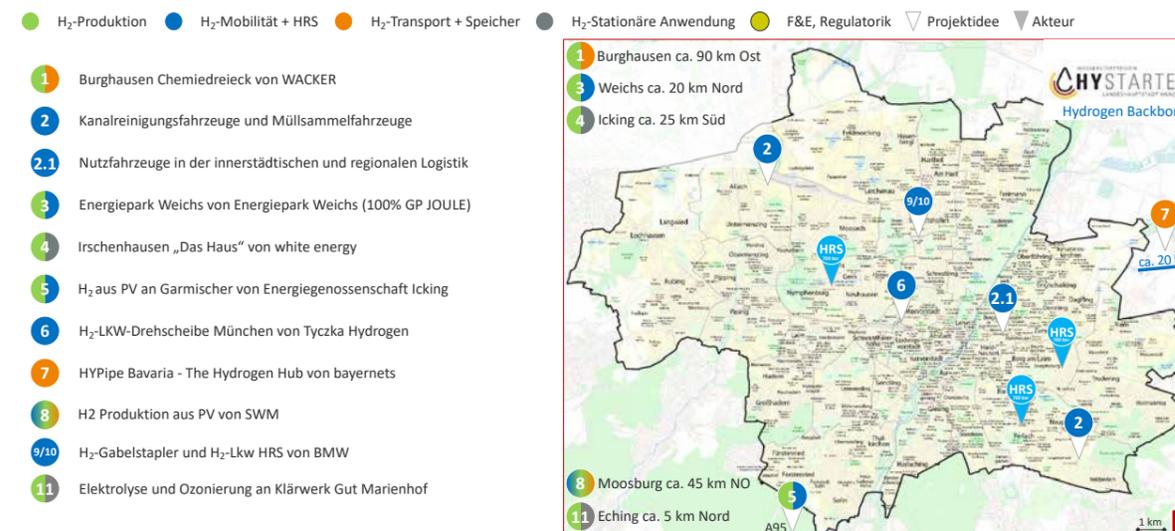


Abbildung 1: Die HyStarter-Region LHM im Überblick | © LHM / EE ENERGY ENGINEERS GmbH

Um dieses Ziel gemeinsam zu erreichen, beteiligten sich in sechs Strategiedialogen die folgenden Akteur*innen unter der Leitung des Referats für Klima- und Umweltschutz der Landeshauptstadt München am HyStarter-Prozess:

Akteure der LHM

- Abfallwirtschaftsbetrieb München
- ARTHUR BUS GmbH
- Bayerische Forschungsallianz GmbH
- Bayernets GmbH
- Bayerngas GmbH
- BMW AG
- Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V.
- Gienger Logistik KG
- H2 Süd e. V.
- IHK für München und Oberbayern
- KEYOU GmbH
- Landeshauptstadt München, Direktorium
- Landeshauptstadt München, Münchner Stadtentwässerung
- Landeshauptstadt München, Referat für Arbeit und Wirtschaft
- Landesverband Bayerischer Spediteure e. V.
- Landesverband Bayerischer Taxi- und Mietwagenunternehmen e. V.
- Landesverband Bayerischer Transport- und Logistikunternehmen e. V.
- Linde GmbH
- Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH
- MAN Truck & Bus SE
- STAATLICHES HOFBRÄUHAUS MÜNCHEN
- Stadtwerke München GmbH
- TÜV SÜD AG
- Tyczka Hydrogen GmbH
- UnternehmerTUM GmbH
- Wacker Chemie AG



Landeshauptstadt
München
**Referat für Klima-
und Umweltschutz**

In Kooperation mit:



ARTHUR



Szenarienmodellierung

Begleitend zu den Strategiedialogen in HyStarter wurden unterschiedliche Methoden und Tools genutzt, um Diskussionen anzuregen und die Entscheidungsfindung zu unterstützen. Eines dieser Tools war der Online-Szenarienrechner „H2Scout“, mit dem die Akteur*innen vor Ort alternative Szenarien einer regionalen Wasserstoffwirtschaft konfigurieren, berechnen und miteinander vergleichen können. Mithilfe eines Optimierungsalgorithmus identifiziert der „H2Scout“ unter den gegebenen Rahmenbedingungen und Annahmen das kostenoptimale Infrastruktursystem zur Bereitstellung einer definierten Nachfragemenge nach Wasserstoff aus unterschiedlichen Sektoren. Dabei muss in jeder Stunde des Jahres die Nachfrage gedeckt sein, entweder aus eigener Produktion, aus vorhandenen Speichern oder durch Import von Wasserstoff (sofern zugelassen).

Der Szenarienrechner greift bei der Optimierung auf drei Datenquellen zurück:

- einen techno-ökonomischen Datensatz mit Leistungs- und anderen Kenngrößen der eingesetzten Technologien sowie Angaben zu Kosten und zu Wertschöpfungspotenzialen, der vom System für das Jahr 2030 vorgegeben ist;
- einen Datensatz zur regionalen Energiewirtschaft (Angebots- und Nachfrageseite), der mit Unterstützung der EE ENERGY ENGINEERS durch die regionalen Akteur*innen für das Jahr 2030 abgeschätzt wurde;
- einen Datensatz zu den gewünschten oder erwarteten politisch-gesellschaftlichen Rahmenbedingungen im Jahr 2030, der durch die regionalen Akteur*innen im Rahmen der HyStarter-Strategiedialoge definiert wurde.

Die alternativen Szenarien stellen mögliche Zielsysteme für eine regionale Wasserstoffwirtschaft dar, in dem Wissen, dass es sich um eine vereinfachte Betrachtungsweise der hochkomplexen und -dynamischen Energiewirtschaft handelt.

Basisszenario (Trend 2030)

Quellen für verwendete Parameter und Zeitreihen

- **Bestandsanlagen und Ausbaupotenziale für erneuerbare Energien im Jahr 2030:** Die Angaben zu den Bestandsanlagen basieren auf den Energiemengen, die in München laut Zielszenario 2030 zur Verfügung stehen sollten. Diese wurden mithilfe der unter renewables.ninja definierten Volllaststundenzahl in die resultierende Anlagenleistung umgerechnet. Die Ausbaupotenziale für PV-Anlagen wurden durch die EE ENERGY ENGINEERS anhand der Fläche abgeschätzt.
- **Erzeugungszeitreihen erneuerbare Energien im Jahr 2030:** Vereinfachend wurden hier die aktuellen Wind- und Solarprofile der Region nach renewables.ninja für das Jahr 2030 für Neuanlagen unverändert angewandt. EEG-Anlagen (Wind) wurden altersbedingt auf 85,1 Prozent Effizienz skaliert, Post-EEG-Anlagen (Wind) auf 69,6 Prozent. Für PV-Anlagen gilt analog eine skalierte Effizienz von 95,1 Prozent und 89,3 Prozent.
- **Gesamtnachfrage und sektorale Nachfrage Verkehr:** Die Angabe zur Gesamtenergienachfrage wurde in Anlehnung an das Zielszenario 2030 aus der Region gemeldet. Die sektorale Nachfrage im Verkehrsbereich basiert ebenfalls auf Angaben aus der Region.
- **Gesamtnachfrage und sektorale Nachfrage Wärme:** Die Annahmen zu den Prozessenergiebedarfen wurden von der Bayernets GmbH auf Grundlage des Netzentwicklungsplans Gas 2022-2032 geliefert.
- **Verfügbare Reststoffmengen:** Die verfügbaren Biogasmengen wurden durch die regionalen Akteur*innen definiert, weitere Reststoffmengen stehen nach Angaben aus der Region nicht für eine thermolytische Wasserstoffproduktion zur Verfügung.
- **Gesamtnachfrage und sektorale Nachfrage Industrie:** Die Nachfrage nach Wasserstoff zur mikrobiellen Methanisierung wurde durch den H2Scout auf Basis der zu methanisierenden Biogasmengen berechnet. Die allgemeine Nachfrage nach Wasserstoff in Höhe von 25.000 t bildet einen Schätzwert (Platzhalter) für mehrere kleinere Nachfrager bzw. einen Export via H₂-Pipeline.

Annahmen zur regionalen H₂-Nachfrage (inkl. Nachfragezeitreihen)

	Energie-nachfrage	Deckungsanteil H ₂	H ₂ -Nachfrage	Mehrzahlungs-bereitschaft
Verkehrssektor	4.000 GWh/Jahr	Pkw (2%) LKW und Transporter (je 10%) Abfallsammelfahrzeuge (50%) Busse, Züge, Schiffe (0%)	2.155 t/Jahr	Keine Mehrzahlungsbereitschaft (Dieselpreis: 1,80 €/l ohne CO ₂ -Preis)
Wärmesektor	1.430 GWh/Jahr	Wohngebäude (0%) Bürogebäude (0%) Prozesswärme (50%)	21.452 t/Jahr	Keine Mehrzahlungsbereitschaft (Erdgaspreis: 80 €/MWh ohne CO ₂ -Preis)
Industrienachfrage H₂		Allgemeine Nachfrage (unspezifisch) Mikrobielle Methanisierung	25.000 t/Jahr 277 t/Jahr	Mit Mehrzahlungsbereitschaft (allgemein: 5,50 €/kg H ₂ , mikrobielle Methanisierung: 3,00 €/kg)

Annahmen zur Energie- und H₂-Bereitstellung

Verfügbare EE-Kapazitäten	Weitere regionale Ressourcen	H ₂ -Produktionspfade
 Bestand (2030): 6 MW Ausbaupotenzial: 0 MW	 Klärschlämme: 0 t/a Kunststoffabfälle (PE/PP): 0 t/a Altreifen: 0 t/a Biogas zur mikrobiellen Methanisierung: 2 Mio. m ³ /a Wasser: unbegrenzt verfügbar	<input checked="" type="checkbox"/> Wasserelektrolyse <input checked="" type="checkbox"/> Reststoffthermolyse <input checked="" type="checkbox"/> Methanplasmalyse <input checked="" type="checkbox"/> Dampfgasreformierung
 Bestand (2030): 225 MW Ausbaupotenzial: 310 MW		
 Bestand (2030): 10 MW Ausbaupotenzial: 0 MW		

Weitere Annahmen

H₂-Importe: < 26,35 t/h, (grün), max. 20% Jahresnachfrage
 Stromexportkapazitäten: < 300 MW
 Transport- und Handlingkosten H₂: 0,36 €/kg H₂ (Pipeline)/2,30 €/kg (Trailer, H₂-Tankstelle)
 Strom- oder Erdgasimporte: < 300 MW • CO₂-Preis: 100 €/t CO₂

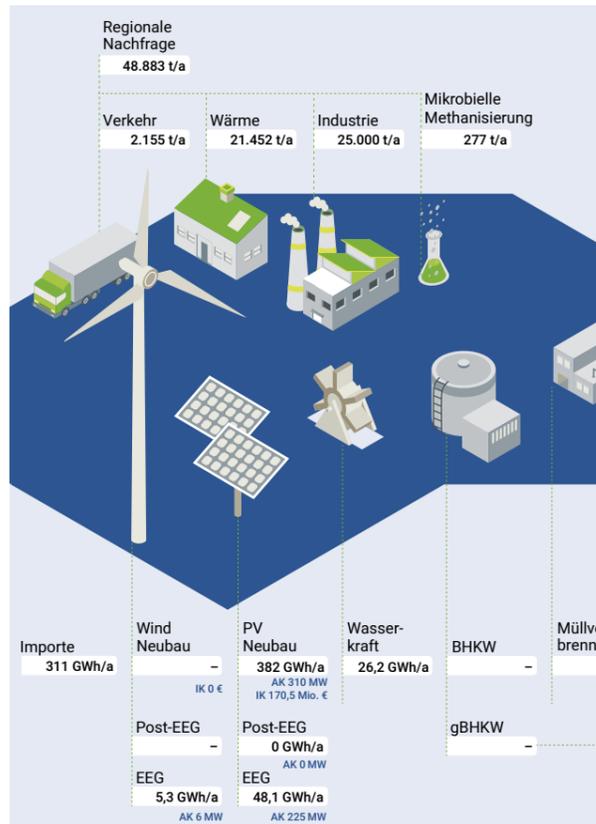
Alternativszenarien (Trend 2030)

Vom Basisszenario abweichende Annahmen

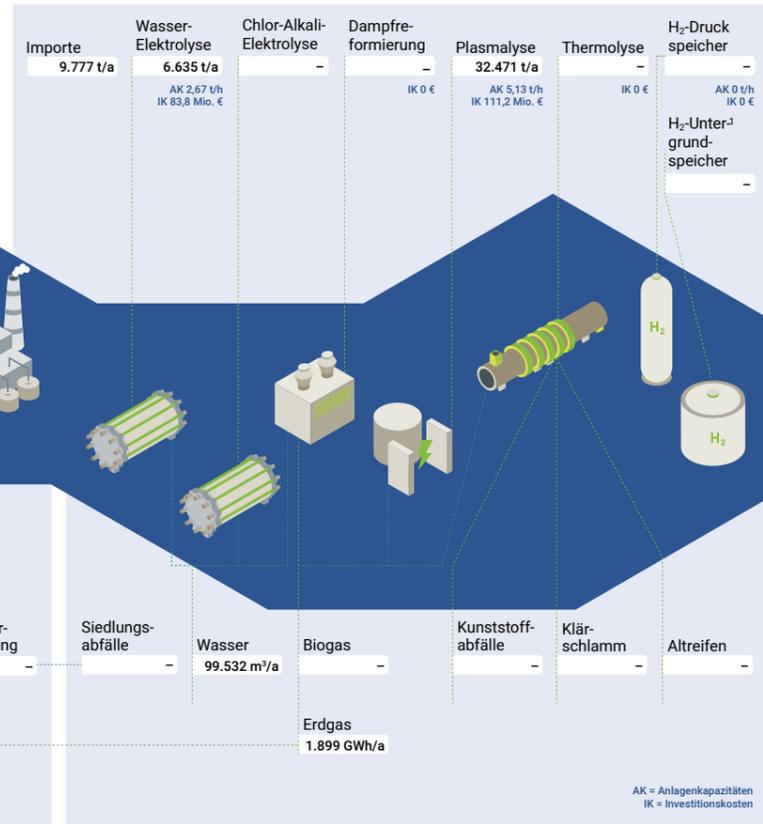
Szenario „nur Elektrolyse und Importe“	Szenario „H ₂ -Importe bis 100% möglich“	Szenario „optimistisch“
In Abweichung des Basisszenarios sind in diesem Alternativszenario ausschließlich die Wasserelektrolyse und der Import von grünem H ₂ als Wasserstoffbezugsquellen zugelassen. Es erfolgt keine Nutzung von Erdgas.	In Abweichung zum Basisszenario sind H ₂ -Importe von bis zu 100% der Nachfrage zugelassen.	In Abweichung zum Basisszenario liegt in diesem Alternativszenario eine höhere Durchdringung von Wasserstoff im Verkehrssektor vor (Pkw 10%, Lkw und Transporter je 15%). Alle Nebenprodukte aller H ₂ -Erzeugungspfade werden zu Marktpreisen vertrieben (Abwärme, Sauerstoff, Cfix) und es besteht eine zusätzliche Nachfrage nach Wasserstoff zur Deckung von Prozessenergiebedarfen in Höhe von 100 GWh bei einer Mehrzahlungsbereitschaft dieses Sektors von 100 €/MWh (Erdgas).

Jahresbilanzen des Basisszenarios
Investitionskosten gesamt: 365,5 Mio. €

Regionale Wasserstoffnutzung



Wasserstoffproduktion und -herkunft



Energieeinsatz (elektrisch)

Energieexporte und Nebenprodukte

Strom	Wärme	O ₂	H ₂ (Exporte)	H ₂ (Gasnetz)	CH _{4, bio}	CO ₂	C _{fix}
108 GWh/a	0 GWh/a	0 t/a	-	-	11,9 GWh/a	259.692 t/a	97.414 t/a

Spezifischer Emissionsfaktor H ₂	Regionale H ₂ -Produktion
5,2 kg CO ₂ / kg H ₂	39.107 t/a

Abbildung 2: © H2Scout.eu/Spilett

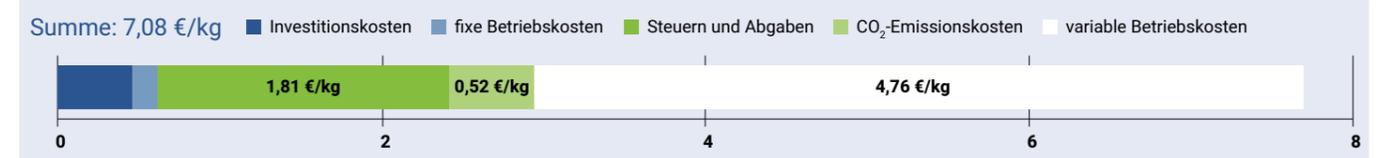
¹Theoretisch müssen keine Speicherkapazitäten aus Gründen der Versorgungssicherheit errichtet werden, da die Produktion von Wasserstoff aufgrund der kontinuierlich verfügbaren Ressourcen (Netzbezug von Strom und Gas) „on demand“ erfolgen kann. In der Realität sind jedoch Speicherkapazitäten für den Transport und die Vor-Ort-Speicherung an den Standorten der dezentralen Nachfrage erforderlich.

(1) Netzstrombezug wird als Stromimport gewertet, auch wenn der Strom bilanziell aus regionalen EE-Anlagen stammen könnte.
(2) Abweichungen in der Zahlungsbereitschaft entstehen aufgrund unterschiedlicher Märkte bzw. abweichender Mengen exportiertem „Überschusswasserstoffs“

Basis- und Alternativszenarien im Vergleich
Ergebnisse

Szenarien	H ₂ -Nachfrage	Autarkiegrad ¹	H ₂ -Bereitstellungskosten	Zahlungsbereitschaft H ₂ ²	Gewinn vor Steuern
Basisszenario	48.883 t/a	11,4 %	6,16 €/kg	5,16 €/kg	-48,86 Mio €/a
Nur Elektrolyse und H ₂ -Importe	48.883 t/a	26,2%	7,51 €/kg	5,16 €/kg	-114,97 Mio €/a
H ₂ -Importe bis 100% möglich	48.883 t/a	4,33%	5,31 €/kg	5,16 €/kg	-7,58 Mio €/a
Optimistisches Szenario	55.487 t/a	19,8%	5,49 €/kg	5,85 €/kg	19,63 Mio €/a

Zusammensetzung der regionalen H₂-Gestehungskosten¹



1 Die H₂-Gestehungskosten beziehen sich ausschließlich auf die H₂-Produktionsanlagen. Stromkosten werden als variable Betriebskosten berücksichtigt

Abbildung 3: © H2Scout.eu/Spilett

Zusammensetzung der Umsätze

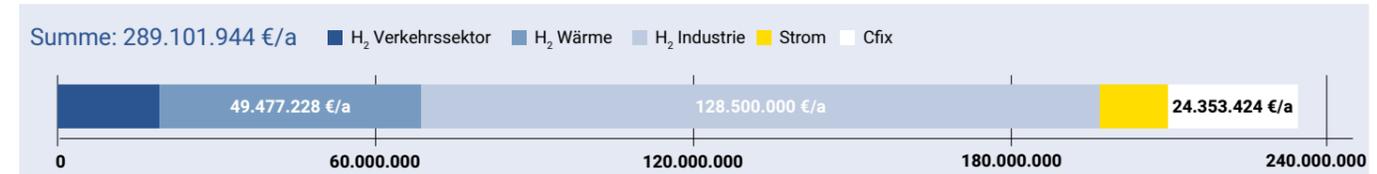


Abbildung 4: © H2Scout.eu/Spilett

Leistungskennzahlen des Systems (KPI)

48.883 t/a H ₂ -Nachfrage ergibt sich aus den definierten H ₂ -Bedarfen der Region	6,16 €/kg H ₂ -Bereitstellungskosten Break-Even-Preis, der im Mittel vom Kunden gezahlt werden muss, um einen Gewinn zu erzielen	-48.857.842,42 €/a Gewinn vor Steuern Maximaler Gewinn vor Steuern im Fall, dass die durchschnittliche Zahlungsbereitschaft als Preis realisiert wird	295.336 t/a Vermiedene CO ₂ -Emissionen Vermiedene Gesamtemissionen zuzüglich der bei der Wasserstoffproduktion entstehenden CO ₂ -Emissionen	60.959.677 €/a Vermiedene externe Kosten Vermiedene gesellschaftliche Kosten des Klimawandels und der Stickoxidemissionen des Verkehrssektors
11,4 % Autarkiegrad Regionaler Anteil der zur Wasserstoffproduktion verwendeten Primärenergie	5,16 €/kg Zahlungsbereitschaft H ₂ Durchschnittliche Zahlungsbereitschaft über alle Nachfragesektoren	-21,8 % Kapitalrendite bei einer angenommenen Systemlaufzeit von 20 Jahren.	351,58 €/t CO ₂ -Vermeidungskosten Die CO ₂ -Vermeidungskosten enthalten als Differenz zwischen Bereitstellungskosten und Zahlungsbereitschaft den definierten CO ₂ -Preis.	18.350.000 €/a Direkte regionale Wertschöpfung Anteil der in der Region verbleibenden Wertschöpfung aus dem Betrieb der Anlagen (Näherungswert aufgrund unvollständiger Datenbasis)

Fazit

Unter den getroffenen Annahmen zu den techno-ökonomischen und energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen im Jahr 2030 ist der im Basisszenario definierte Einsatz von Wasserstoff als Baustein einer Dekarbonisierung des Verkehrssektors und der Industrie technisch möglich, jedoch ohne Förderung nicht wirtschaftlich realisierbar. Im Basisszenario entsteht je kg verkauftem Wasserstoff ein durchschnittlicher Verlust von 1 €, der über anderweitige Finanzierungsquellen gedeckt werden muss. Ursächlich für die Deckungslücke sind zum einen die fehlenden eigenen Energieressourcen, die durch Importe von Strom, Erdgas und teilweise auch Wasserstoff kompensiert werden müssen. Die anteilig hohe Nachfrage nach Wasserstoff aus den Industrie- und Wärmemärkten trifft auf eine verhältnismäßig geringe Zahlungsbereitschaft dieser Märkte. Im „optimistischen Szenario“ wird eine höhere Wasserstoffnachfrage aus dem zahlungswilligeren Verkehrssektor angenommen, sowie ein Vertrieb der bei Elektrolyse und Plasmalyse entstehenden Nebenprodukte. Dieses Szenario zeigt einen Weg auf, wie sich auch in einer Metropole wie München eine Wasserstoffwirtschaft wirtschaftlich rechnen kann. Einnahmen durch einen möglichen Verkauf von CO₂-Zertifikaten sind in keinem der Szenarien enthalten.

	Kapitalrendite	Vermiedene CO ₂ -Emissionen	CO ₂ -Vermeidungskosten	Vermiedene externe Kosten	Direkte regionale Wertschöpfung
Basisszenario	-21,8 %	295.336 t/a	351,58 €/t	60,96 Mio €/a	18,35 Mio €/a
Nur Elektrolyse und H ₂ -Importe	-39 %	5.453 t/a	31.168,38 €/t	1,53 Mio €/a	18,53 Mio €/a
H ₂ -Importe bis 100% möglich	-5,7 %	507.058 t/a	123,37 €/t	104,36 Mio €/a	10,57 Mio €/a
Optimistisches Szenario	6,1 %	229.809 t/a	195,29 €/t	48,22 Mio €/a	41,22 Mio €/a

Die nächsten Jahre sind entscheidend, um die drohende Klimakrise abzuwenden. Einer innovativen und wohlhabenden Stadt wie München kommt hier eine große Bedeutung als Vorbild zu. Der Wille zu handeln und die ehrgeizigen Klimaziele zu erreichen, bewegten die Stadtverwaltung dazu, einen umfassenden Maßnahmenplan gemeinsam mit der Stadtgesellschaft zur Klimaneutralität 2030 für die Stadtverwaltung und 2035 für die Gesamtstadt, insbesondere für die Energiebereitstellung und die unterschiedlichen Endenergiesektoren Gebäude, Verkehr, Industrie, Gewerbe, Handel und Dienstleistungen zu erarbeiten. Die LHM steht hierbei vor verschiedenen Herausforderungen. Aufgrund der Größe und Dichte sowie der großen Konkurrenz um Freiflächen ist die Stadt auf ein hohes Maß an netzgebundener Strom- und Wärmeversorgung angewiesen.

In diesem Kontext gilt es, Potenziale zukunftsfähiger und klimaneutraler Technologien wie u. a. Wasserstoff als Energieträger zu analysieren, welche klimaneutral produziert und lokal emissionsfrei genutzt werden können. Die LHM verfügt zudem über ein sehr starkes Akteur*innen-Netzwerk, welches viel Wissen und praktische Erfahrung im Bereich der H₂-Technologie mitbringt. Die urbane Struktur der LHM erfordert einen hohen Energiebedarf in diversen Sektoren. Insbesondere im Mobilitätssektor streben verschiedene Akteur*innen wie Logistiker, OEMs, Industrieunternehmen, kommunale Betriebe u. v. m. den Einsatz von wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen an.

Im Vergleich zu anderen Regionen in Deutschland verfügt die LHM bereits jetzt über eine H₂-Tankstelleninfrastruktur. Im Rahmen von HyStarter wurden potenzielle H₂-Bedarfe für den Mobilitätssektor bei der Münchner Stadtentwässerung (MSE), dem Abfallwirtschaftsbetrieb München (AWM), dem STAATLICHEN HOFBRÄUHAUS MÜNCHEN, der MAN Truck & Bus SE, der Gienger Logistik KG sowie ARTHUR BUS GmbH aufgezeigt, sodass diese in die Planung und Erschließung weiterer HRS-Standorte einfließen können. Wasserstoff soll dabei in verschiedenen Fahr-

zeugklassen eingesetzt werden, wie u. a. Flurförderzeuge, Lkw, Müllsammelfahrzeuge und weitere. Über diese Bedarfe hinaus baut und plant u. a. die Akteurin Tyczka Hydrogen GmbH in der Region München H₂-Tankstellen mit der 350 bar Druckstufe, die insbesondere im Schwerlastbereich verwendet wird. Die Tyczka Hydrogen GmbH nahm die aufgeführten Bedarfe der HyStarter-Akteur*innen während der internen Strategiedialoge auf, sodass hieraus gegebenenfalls weitere HRS-Standorte eruiert werden können.

Zusätzlich werden auch klimafreundliche Lösungen für den Gebäudeenergiebereich analysiert. München ist zwar ein Gunststandort zur Wärmeversorgung aus Geothermie. Die Grundlast der Fernwärmeversorgung wird durch die Erschließung tiefer geothermaler Quellen gewährleistet, jedoch müssen Spitzen- und teils Mittellast über alternative Wärmequellen bereitgestellt werden. Aus diesem Grund wird derzeit ein Transformationsplan der SWM erstellt, der den Dekarbonisierungspfad für Fernwärme bis 2045 beschreibt. Großwärmepumpen werden ebenfalls stark zum Einsatz kommen. Im Zuge des Geothermie- und Großwärmepumpenausbaus wird sukzessive der Einsatz fossiler Energieträger reduziert. In Schätzungen von Mitte 2023 gehen die SWM davon aus, dass zukünftig ein Anteil der Fernwärmeerzeugung auch durch Wasserstoff bereitgestellt wird. Im Bereich der H₂-Anwendung wurde während der HyStarter-Dialoge zudem der H₂-Einsatz in der Industrie besprochen. Für die Substitution von Erdgas soll Wasserstoff u. a. in Brennern und Öfen energetisch eingesetzt werden.

Zur Umsetzung der Visionen in den verschiedenen Sektoren zeigen die Ergebnisse des HyStarter-Prozesses eine hohe H₂-Nachfrage in der LHM auf. Die geographische Lage in Süddeutschland stellt Herausforderungen an die Versorgung und Verfügbarkeit von regenerativ erzeugtem Strom dar. So wird zum einen die Stromversorgung Münchens auch unter günstigen Rahmenbedingungen nur zu

einem kleineren Teil mit erneuerbaren Energien vor Ort abgedeckt werden können. Verschiedene Projekte konnten jedoch auch hier während des HyStarter-Prozesses identifiziert werden, um H₂-Produzent*innen und Anwender*innen lokal zu vernetzen. Aufgrund der örtlichen Gegebenheiten ist der H₂-Import für die Region unerlässlich. Aber auch hierfür wurde eine Lösung identifiziert: Über das nahe gelegene European Hydrogen Backbone soll Wasserstoff in den benötigten Mengen importiert werden.

Die Vision der LHM ist die Bereitstellung einer geeigneten H₂-Tankinfrastruktur, um die Problematik des Henne-Ei-Problems zu beheben. Somit wird auch der Weg für den H₂-Einsatz in den verschiedenen Mobilitätssektoren geebnet, der Fokus liegt bei den HyStarter-Akteur*innen auf Nutz- und Schwerlastfahrzeugen. Der benötigte Wasserstoff wird in der Vision zum Teil im Umland produziert, darüber hinaus bestehender H₂-Bedarf kann und wird über das European Hydrogen Backbone in die Region geliefert.



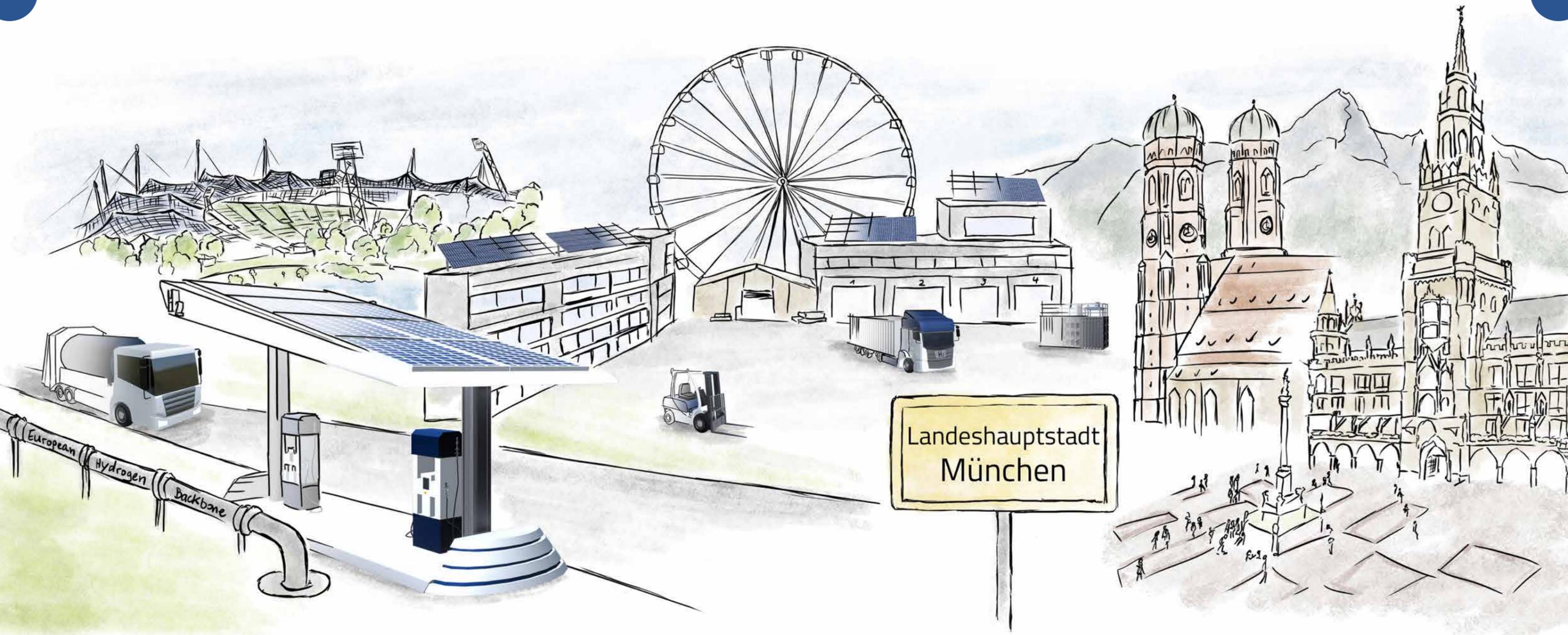


Abbildung 5: Die Vision 2030 – Optionen der Wasserstoffproduktion und der Wasserstoffanwendungen in der Landeshauptstadt München

H₂O

Übersicht

Für die Initiierung einer Wasserstoffwirtschaft in der LHM bedarf es Maßnahmen in den verschiedenen Handlungsfeldern, auf die im Folgenden näher eingegangen wird. Um einen Überblick über die Vielzahl von Projektideen zu gewinnen, wurde eine Übersicht der Planungs- und Um-

setzungsphasen in Form einer Roadmap (Abbildung 6) erarbeitet. Die folgende Abbildung benennt das jeweilige Themenfeld, die beteiligten Akteur*innen und beinhaltet zudem individuelle Zeitpläne, Meilensteine und Voraussetzungen.

Wo möglich, wurden Abhängigkeiten zwischen einzelnen Themen, wie auch mögliche Synergien zwischen den Projekten aufgenommen. Auf eine quartalscharfe Darstellung im Jahr 2023 und 2024 folgt die jährliche Perspektive bis 2030. Projektdetails sind den einzelnen H₂-Handlungsfeldern zu entnehmen. Die Zeiträume sind dabei als Richtwerte zu verstehen, da unerwartete Wider-

stände, politische Entscheidungen, Finanzierungen, Änderung von Projektpartner*innen, Lieferengpässe, aber auch beschleunigte Verfahren Abweichungen in der Planung wahrscheinlich machen. Darüber hinaus handelt es sich in einzelnen Themenfeldern um Projektideen, sodass die aufgeführte Roadmap keine Verpflichtung zur Umsetzung gegenüber den Akteur*innen darstellt.

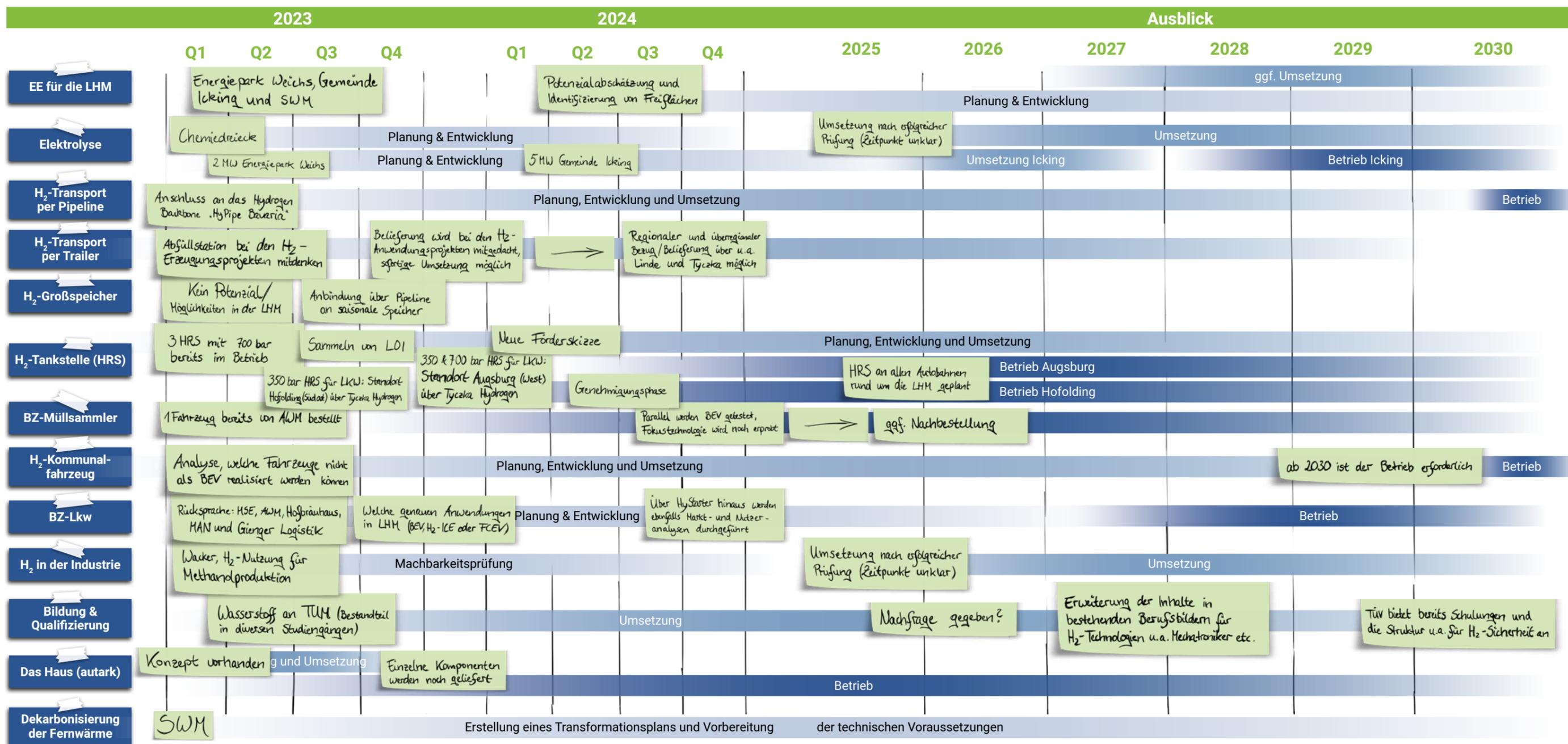


Abbildung 6: Roadmap für die Wasserstoffregion BMDV / EE ENERGY ENGINEERS GmbH

Regionales Technologiekonzept

Das Technologiekonzept bezieht sich bei der Gestaltung auf die von den HyStarter-Akteur*innen eingereichten Projektideen der LHM und ist separat zur Analyse des H2Scout zu betrachten. Unterschiede in den Zahlenangaben erklären sich dadurch, dass die Technologiekonzepte projektspezifisch sind, wohingegen sich der H2Scout auf die gesamte Region bezieht.

Aufgrund der eingereichten Projektideen wurde das Konzept sowohl von der Wasserstoffherzeugung als auch der -anwendung aus erarbeitet. Dieses umfasst insbesondere die Mobilität, autarke Gebäudeenergieversorgung als Insellösung, Einbindung einer Kläranlage sowie die Erzeugung von Methanol, welches stofflich verwendet wird. Anhand der ermittelten Gesamtbedarfe und dem

Erzeugungspotenzial aus erneuerbaren Energien wurden Mengenflüsse sowie das H₂-Versorgungsdefizit der Region berechnet.

Die beschriebenen Projektideen entlang der Wasserstoffwertschöpfungskette, die Bedarfe sowie die jeweiligen Technologien sind im Technologiekonzept für die LHM in der Abbildung 7 dargestellt. Im Folgenden werden die einzelnen Schritte der Wertschöpfungskette chronologisch von der Erzeugung über die Distribution bis zum

Verbrauch aufgezeigt sowie anschließend detailliert behandelt.

In der LHM kann grüner Wasserstoff vor allem im Umland der Stadt produziert werden. Alle eingereichten Projektideen verfolgen den Ansatz der elektrolytischen H₂-Produktion. Als Energiequellen dienen überwiegend PV-Anlagen, wie z. B. am Energieparks Weichs, aber auch der Grünstrombezug über PPA wird in den Projektideen der Wacker Chemie AG und in der Gemeinde Icking genannt.

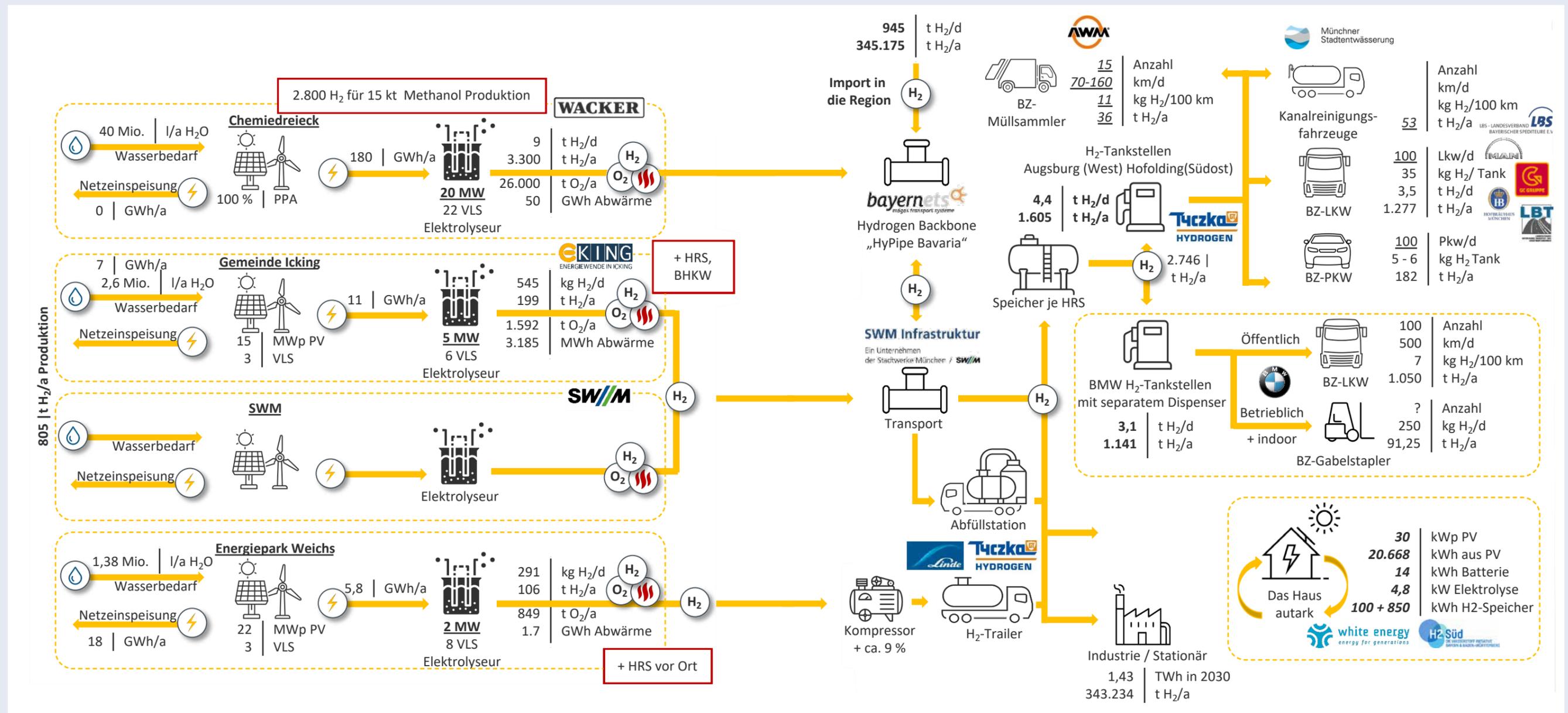


Abbildung 7: © BMDV / EE ENERGY ENGINEERS GmbH

Die SWM sind derzeit noch in der Standorterschließung, weshalb das Konzept keine Kapazitäts- und Mengenangaben für das Projekt enthält. Insgesamt weisen die eingereichten Projektideen ein H_2 -Erzeugungspotenzial von 805 t pro Jahr auf, wobei das Potenzial aufgrund der noch nicht bekannten Daten der SWM am Ende höher ausfallen wird. Neben dem produzierten Wasserstoff wird zusätzlich Sauerstoff und Abwärme generiert. Das Temperaturniveau der Abwärme liegt zwischen 55 und 60 Grad Celsius und kann als Grundlastabdeckung für verschiedene Anwendungen in unmittelbarer Umgebung des Elektrolyseurs genutzt werden, jedoch nicht für die Fernwärme. Der Sauerstoff und die Abwärme können sich positiv auf den Energieverbrauch im Klärwerk Gut Marienhof auswirken, weshalb die Errichtung eines zusätzlichen Elektrolyseurs am Klärwerk geprüft wird.

Bei der Betrachtung des H_2 -Bedarfs wird deutlich, dass Wasserstoff über die H_2 -Erzeugungsprojekte hinaus in die LHM importiert werden muss. Hierfür wird in dem Projekt „HyPipe Bavaria – The Hydrogen Hub“ der Grundstein für ein H_2 -Pipelinetz in Bayern gelegt. Dieses soll 2030 den Betrieb aufnehmen und eine Transportkapazität von 6 GW ermöglichen. Die H_2 -Lieferung von Übergabestationen des H_2 -Pipelinetzes oder H_2 -Erzeugungsprojekten, wie dem Energiepark Weichs, kann je nach Menge und Standort des Endanwendenden per Trailer erfolgen. Da Wasserstoff im Trailer mit einem Druck von 350 bis 500 bar transportiert wird, bedarf es nach der Elektrolyse eines Kompressors zur Gasverdichtung. Für die Verdichtung sind zusätzlich ca. 9 Prozent Energiebedarf zu berücksichtigen, die bei den hier durchgeführten Berechnungen bereits inkludiert sind. Zusätzlich sind am Elektrolyseur bzw. bei den H_2 -Anwender*innen entsprechende H_2 -Speicher zu errichten. Die Dimensionierung des H_2 -Speichers sollte auf mindestens der dreifachen Tagesmenge ausgelegt werden, um bei Störungen in der Abhollogistik den Elektrolyseur weiterbetreiben zu können.

Wasserstoff wird in dem Akteur*innennetzwerk der LHM in der Mobilität, im Industriebereich, bei der Dekarbonisierung der Fernwärme sowie zur autarken Gebäudeenergieversorgung an Inselstandorten verwendet. Im Technologiekonzept wurde ein H_2 -Bedarf von insgesamt 195.000 t pro Jahr ermittelt. Der Hauptverbrauch liegt dabei zukünftig in der Dekarbonisierung der Fernwärme gefolgt von der industriellen Anwendung sowie dem Mobilitätssektor. Für den H_2 -Einsatz in Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK) und Heizwerken ergaben erste Schätzungen einen H_2 -Bedarf von 1 bis 5 TWh bis zum Jahr 2045. In dem Konzept wurde der maximale Bedarf berücksichtigt, sodass die jährliche H_2 -Nachfrage 150.000 t beträgt. Für den Industriesektor wurde die prognostizierte H_2 -Menge aus dem Netzentwicklungsplan Gas 2022-2032 verwendet, in dem bis 2032 eine H_2 -Nachfrage von 1,4 TWh analysiert wurde. Dies entspricht einem jährlichen Bedarf von 42.904 t H_2 . Der H_2 -Bedarf der beiden stationären Anwendungen wurde mittels der gravimetrischen Energiedichte von Wasserstoff berechnet.

Der Anwendungsbereich mit den meisten Projektideen im HyStarter-Prozess der LHM ist der Verkehrssektor. Das dafür benötigte Tankstellennetz ist in der Region München verhältnismäßig gut ausgebaut, bereits Mitte 2023 sind drei HRS in der Stadt im Betrieb, jedoch nur mit der 700 bar Stufe. Zudem befindet sich eine 350 bar Tankstelle von der von der Hy2B Wasserstoff GmbH (die Akteurin Tyczka Hydrogen GmbH ist daran beteiligt) in Hofolding im Süden der LHM an der A8 bereits in der Errichtungsphase.

Das Nachfragepotenzial ist im Mobilitätssektor sehr hoch, bei den HyStarter-Akteur*innen wurde ein H_2 -Bedarf von 2.689 t pro Jahr ermittelt. Im Lkw-Sektor wurde der Einsatz von H_2 -Fahrzeugen bei der MSE, dem AWM, dem STAATLICHEM HOFBRÄUHAUS MÜNCHEN, der MAN Truck & Bus SE sowie Gienger Logistik KG diskutiert und geprüft. Hierfür wurde zunächst eine kumulierte Flotte von

100 Fahrzeugen für das Technologiekonzept angenommen, mit einem Jahresbedarf von 1.277 t Wasserstoff. Zusätzlich wurden der Pkw-Sektor sowie Brennstoffzellen (BZ)-Müllsammler und Kanalreinigungsfahrzeuge mit aufgeführt. BZ-Müllsammler wurden bereits von dem AWM, neben batterieelektrischen Varianten, bestellt. Bei Beibehaltung des aktuellen Verhältnisses zwischen Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeugen würden bei einer Umstellung der gesamten Flotte 15 Fahrzeuge zukünftig mit Wasserstoff betrieben werden. Dies ergibt bei dem vorliegenden Fahrprofil einen Bedarf von 36 t H_2 pro Jahr. Im Bereich der Kanalreinigungsfahrzeuge muss zunächst ein*e Fahrzeugumrüster*in gefunden werden, da solche Fahrzeuge noch nicht am Markt verfügbar sind. Der ermittelte H_2 -Bedarf liegt hier bei 53 Jahrestonnen.

Zusätzlich wurden von der BMW AG erste Überlegungen zum H_2 -Einsatz in München diskutiert. Ziel ist es, die eigene Lkw-Flotte auf Wasserstoff umzustellen und Kund*innen, Lieferant*innen sowie Dritten eine Tankmöglichkeit in Form einer 350 bar HRS zu bieten. Der hierfür ermittelte H_2 -Bedarf beträgt 1.050 t pro Jahr. Darüber hinaus wurde die Umstellung von Flurförderzeugen im Werk diskutiert. Aufgrund des 24/7 Einsatzes der Fahrzeuge eignet sich Wasserstoff als Antriebsart. Ein solches Konzept wurde im Leipziger BMW-Werk bereits umgesetzt. Für die Umstellung des Münchner Werks wurde seitens der BMW AG der H_2 -Bedarf auf 91 t geschätzt.

Neben den genannten Projekten, die sich jeweils in einem anderen Glied der Wertschöpfungskette befinden, wird Wasserstoff in einem Inselsystem bereits angewendet. Ein Bestandswohngebäude in Icking wurde zu einem autarken Gebäude umgebaut, welches Wasserstoff produziert und saisonal für Spitzenlasten, Dunkelflauten und den Winter speichert. Laut der white energy GmbH, dem Besitzer des Hauses, könnte ein solches System auf weitere Gebäude übertragen werden.

Das urbane Stadtbild der LHM erfordert einen hohen Energiebedarf in verschiedenen Sektoren. Die Stadt bietet wenig Fläche für eine grüne Strom- und H_2 -Produktion. Es handelt sich daher um eine H_2 -Importregion. Die LHM verfügt mit der örtlichen Nähe zum European Hydrogen Backbone über ausgezeichnete Möglichkeiten zum H_2 -Import via Pipeline, die den berechneten Bedarf mehr als ausreichend decken würde. Für die Dekarbonisierung sowie die Substitution von Erdgas und weiteren Kraftstoffen kann Wasserstoff damit eine signifikante Rolle bei der Energiewende der LHM spielen.

Die einzelnen Projektideen der HyStarter-Akteur*innen werden im Folgenden nach dem jeweiligen H_2 -Sektor entlang der Wertschöpfungskette näher erläutert.



Wasserstoff-Erzeugung aus erneuerbaren Energien

Zur grünen H₂-Produktion in und um die LHM wurden mehrere Akteur*innen und Projekte identifiziert. In diesem Kapitel werden die Projektideen des Energieparks Weichs in Icking sowie erste Überlegungen für das Klärwerk Gut Marienhof und der SWM aufgeführt.

In Weichs, ca. 30 km nördlich des Zentrums der LHM, ist die Errichtung eines 2 MW Elektrolyseurs in Kombination mit einer PV-Freiflächenanlage der Energiepark Weichs H2 GmbH & Co. KG (100-prozentige Tochter der GP JOULE GmbH) geplant. Die Errichtung der PV-Anlage wird bereits umgesetzt, der Elektrolyseur kann voraussichtlich ab 2024 die H₂-Produktion aufnehmen. Der produzierte Wasserstoff soll im Verkehrssektor eingesetzt werden, weshalb derzeit noch ein HRS-Standort lokalisiert wird.

Die Energiegenossenschaft Icking befindet sich bereits im Übergang zur Projektplanung. In der Gemeinde Icking sind insgesamt 15 MWp PV-Leistung installiert und weitere Anlagen befinden sich in der Konzeption. Geplant ist die elektrolytische H₂-Produktion mittels PV-Strom. Dieser soll zur Versorgung des Verkehrssektors (insbesondere des Schwerlastverkehrs) bereitgestellt und gegebenenfalls für die Rückverstromung in einer lokalen KWK-Anlage genutzt werden, um Stromlücken zu schließen sowie Wärme zu erzeugen. Ferner könnte der Wasserstoff zur Vermarktung über die Einspeisung in das ESB-HD-Gasnetz bereitgestellt werden.

Erste Überlegungen für den Bau und Betrieb eines Elektrolyseurs werden ebenfalls von der MSE am Klärwerk Gut Marienhof angestellt. Eine noch zu errichtende PV-Anlage würde den Elektrolyseur mit Strom versorgen. Anfallende Nebenprodukte wie der Sauerstoff könnten für die Belüftung der Belebungsbecken und/oder für die

Ozonierung in einer vierten Reinigungsstufe verwendet werden. Die Abwärme ließe sich in der Prozesskette bzw. für die Gebäudewärmeversorgung vor Ort nutzen. Eine interne Verwendung des grünen Wasserstoffs wird angestrebt, Überschüsse sollen am Markt veräußert werden. Derzeit werden intern die möglichen Synergieeffekte mit der Abwasserreinigung geprüft und die Wirtschaftlichkeit betrachtet, bevor eine Studie als Entscheidungsgrundlage erstellt werden soll.

Die SWM berücksichtigen bei der H₂-Produktion ebenfalls netzdienliche Aspekte. Durch den Zubau von PV-Anlagen wird oftmals in Flächennetzgebieten mehr Strom erzeugt als verbraucht. In bestimmten Situationen kann es zu Überkapazitäten im Stromnetz und damit zu Engpässen in der Leitungskapazität verschiedener Netzebenen kommen. Um möglichst viel erneuerbare Energie nutzbar zu machen, soll die Elektrolyse eingesetzt werden, um den überschüssigen PV-Strom vollständig einzusetzen und eine Abregelung zu vermeiden. Der auf diese Weise produzierte Wasserstoff soll regional genutzt werden und vielen Akteur*innen vor Ort einen Einstieg in die H₂-Wirtschaft ermöglichen. So sollen regionale H₂-Quellen und Verfügbarkeiten geschaffen werden und die Bereitstellungszeit von grünem Wasserstoff aus überregionalen Pipelines verkürzt werden. Für die Projektumsetzung finden derzeit Flächensondierungen und -sicherungen potenzieller Standorte statt. Zusätzlich sollen mögliche H₂-Abnehmer*innen identifiziert werden.

Über die Projektideen in München hinausgehend wird die elektrolytische H₂-Produktion der Wacker Chemie AG im Kapitel „Einsatz von Wasserstoff in der Industrie“ separat beschrieben, da dort der Wasserstoff direkt vor Ort verwendet wird.



Regionale Herausforderungen

EE-Anlagen befinden sich im Umland der LHM, jedoch nicht in der Stadt selbst. Aus diesem Grund ist die LHM auf EE-Kapazitäten außerhalb der Stadt angewiesen

Energiepark Weichs:

- Akquirierung von Fördermitteln.
- Identifikation von potenziellen H₂-Großabnehmer*innen in der Mobilität.

Icking:

- Power Purchase Agreements (PPA) sind für den wirtschaftlichen Betrieb des Elektrolyseurs gegebenenfalls notwendig.
- Identifikation von Nachfrager*innen für die garantierte Abnahme des überschüssigen Wasserstoffs.

Klärwerk Gut Marienhof:

- Verwendung der „Nebenprodukte“ Sauerstoff und Wärme als Synergieeffekt.
- Gesamtwirtschaftlichkeit.
- Abnahme des überschüssigen Wasserstoffs durch Dritte.

SWM:

- Schaffung von Akzeptanz und Akquirierung von Flächenverfügbarkeiten für die Erzeugung von erneuerbaren Energien und zur H₂-Produktion.
- Hoher Wettbewerbsdruck um Flächen aufgrund konkurrierender Nutzungsmöglichkeiten.
- Verfügbarkeit von (Strom-) Netzanschlussleistung (zur Ein- und Ausspeisung) an dezentralen Erzeugungsstandorten.
- Zeitliche Verfügbarkeit des PV-Stroms voraussichtlich nicht ausreichend für wirtschaftlichen Betrieb des Elektrolyseurs.
- Flächenverfügbarkeit eher an dezentralen Standorten, dort allerdings in der Regel keine Nachfrage nach Abwärme und Sauerstoff.
- Bisher bietet Verkauf des Stroms höhere Erlöse als der Verkauf von H₂.
- Barrieren für den Einstieg in die Wasserstoffnutzung, da Verfügbarkeit nicht gesichert erscheint und Versorgungssicherheit durch redundante Erzeugungsstandorte gefordert wird.

Lösungsansätze

Energiepark Weichs:

- Netzwerk/Tool/Plattform für H₂-Nachfrage und -Angebot.
- Sofern keine Abnehmer*innen identifiziert werden können, könnte die H₂-Einspeisung in das Erdgasnetz eine Notlösung darstellen.

Icking:

- Netzentlastung aufgrund lokaler Strom- und Wärmebereitstellung.
- Belieferung einer Raststätten-HRS zur Steigerung der Abnahmemengen.
- Belieferung eines lokalen Futtermittelbetriebs zur Erdgassubstitution.

Klärwerk Gut Marienhof:

- Machbarkeitsstudie und Wirtschaftlichkeitsanalyse zur Entscheidungsfindung wird durchgeführt.
- Fortlaufender Austausch mit Projektpartner*innen bereits in Planung befindlicher Projekte anderer Kommunen, wie z. B. Mainz-Mombach.

SWM:

- Perspektivisch ist der Anschluss an eine H₂-Pipeline oder die netzgebundene Belieferung von Großkund*innen denkbar. Bis dahin ist eine Abholung per Trailer möglich.
- Erweiterung der Betriebszeiten der Elektrolyse durch weitere Stromerzeugungsquellen, wie z. B. Windkraft.
- Aufbau von einem regionalen Netzwerk zur ortsnahe Erzeugung und Verwendung des Wasserstoffs; dies reduziert Transportwege und -kosten.
- Beteiligungsmöglichkeiten initiieren, um eine Akzeptanz für den Ausbau erneuerbarer Energien zu schaffen.
- Versorgungssicherheit durch mehrere Standorte herstellen und somit die „Henne-Ei-Problematik“ durchbrechen.



Externer Unterstützungsbedarf sowie geplante Vernetzungen mit anderen Aktivitäten in der Region

Die Linde GmbH und die Tycza Hydrogen GmbH bieten an, den H₂-Transport per Trailer beim Energieparks Weichs zu übernehmen.

Potenzielle Abnehmer*innen für den überschüssigen Wasserstoff könnten durch die Vernetzung im HyStarter-Prozess gefunden werden, z. B. AWM, MSE sowie Logistiker.

Technologiekonzept und Umsetzungsstrategie

In der LHM liegt der Fokus auf der elektrolytischen H₂-Produktion aus erneuerbaren Energien. Insbesondere PV-Anlagen, aber auch Windkraft wurden im Rahmen der HyStarter-Projektideen genannt. Ebenfalls können zur grünen H₂-Produktion Laufwasserkraftwerke genutzt werden, die in diesem Bericht jedoch nicht weiter benannt werden. Es empfiehlt sich in der Regel, weitere Erzeugungspotenziale durch den Abschluss von PPAs zu heben sowie Hydro-Hubs zur Vernetzung der Akteur*innen zu gründen. Aufgrund der Projektvielfalt werden hier die grundlegenden Eigenschaften der benötigten Technologien beschrieben.

Zur Wasserstoffproduktion aus fluktuierenden Energiequellen eignen sich aufgrund ihrer Skalier- und Modulierbarkeit insbesondere Polymer-Elektrolyt-Membran (PEM) sowie alkalische (AEL) Elektrolyseure. Elektrolyseanlagen mit einer Leistung zwischen 250 kW und 10 MW werden in der Praxis in einer Containerbauweise zur Verfügung gestellt, sodass die eigentliche Installation einfach zu realisieren ist. Größere Anlagen werden freistehend errichtet. Technologiebedingt sind AEL-Elektrolyseure tendenziell von den Anschaffungskosten günstiger als PEM-Elektrolyseure. Abhängig von der Technologie und der installierten Leistung liegen für größere Anlagen die spezifischen Kosten zwischen 1.000 und 1.300 € pro kW. Dies inkludiert die Kosten für Beratung, Installation, Netz- und Wasseranschluss sowie die benötigte Peripherie. In Abhängigkeit von der Auslastung des Netzanschlusspunktes ist gegebenenfalls die Ertüchtigung einer Trafostation zu berücksichtigen. Zur Wasserstoffproduktion mittels Elektrolyse wird deionisiertes, vollentsalztes Wasser benötigt. Entsprechende Entsalzungsanlagen werden bei der Planung eines Elektrolyseurs berücksichtigt.

Bei der Errichtung und dem Anschluss des Elektrolyseurs müssen der Wasser- und Netzanschluss sowie regulatorische Rahmenbedingungen wie das Genehmigungsverfahren nach Bundesimmissionsschutzverordnung (BImSchV), die Störfallverordnung, die Industrieemissionsrichtlinie (IE-Richtlinie), Netzentgelte, Stromsteuer und weitere Aspekte beachtet werden. Bei dem Wasseranschluss genügt in der Regel die Einhaltung der Qualitätsanforderungen gemäß der Trinkwasserverordnung (TrinkwV 2020 | EU-Richtlinie 2020/2184-EU). Die EEG-Umlage wurde ab dem 1. Juli 2022 ausgesetzt und entfällt seit dem 1. Januar 2023 dauerhaft.

Je nach Anwendungsgebiet kann der Wasserstoff direkt nach der Produktion aus der Elektrolyseanlage verwendet werden oder muss aufgereinigt werden. Die Wasserstoffqualität beträgt nach der Elektrolyse 99,9 Prozent (3.0) und kann beispielsweise direkt in Verbrennungsmotoren (z. B. in üblichen Blockheizkraftwerken (BHKW) sowie in Fahrzeugen mit Verbrennungsantrieb) oder als Prozessgas für die Industrie genutzt werden. Für Brennstoffzellenanwendungen ist hingegen oft eine Reinheit von 99,999 Prozent (5.0) erforderlich, wobei manche Fahrzeughersteller mittlerweile nur noch die Qualität 3.7 einfordern. Um diese Qualität zu erreichen, wird zusätzlich eine Trocknungsanlage benötigt, um den verbleibenden Wasserdampfanteil im Wasserstoff zu entfernen. In der Regel wird diese der Elektrolyseanlage nachgeschaltet. Sofern der Wasserstoff in Bündelflaschen abgefüllt werden soll, bedarf es ebenfalls einer Trocknungsanlage, da die Druckluftflaschen aufgrund von möglicher Korrosion keine Feuchtigkeit vertragen. Gleiches gilt auch für die Speicherung in Stahltanks sowie für Kompressoren.

Neben dem produzierten Wasserstoff wird zusätzlich Sauerstoff und Abwärme generiert. Das Temperaturniveau der Abwärme liegt bei den genannten Elektrolyseurtypen zwischen 55 und 60 Grad Celsius und kann als Grundlastabdeckung für verschiedene Anwendungen in unmittelbarer Umgebung des Elektrolyseurs genutzt werden. Sauerstoff kann u. a. für die Belebungsbecken oder die vierte Reinigungsstufe (Ozonierung) in Kläranlagen oder nach einer zusätzlichen Aufreinigung für medizinische Zwecke genutzt werden. Für den Sauerstoffeinsatz in der Ozonierung bedarf es eines Katalysators und einer Trocknungsanlage, um den restlichen Wasserstoff sowie die Restfeuchtigkeit aus dem Sauerstoff zu reduzieren. Es empfiehlt sich, H₂-Erzeugung und -Anwendung – wenn möglich – in lokaler Nähe zu errichten, insbesondere bei Klärwerken können Synergien bezüglich aller Elektrolyseprodukte genutzt werden.

Wasserstofftransport

Die LHM ist zukünftig u. a. aufgrund ihrer urbanen Strukturen auf H₂-Importe angewiesen. Strategisch ist sie gut und nahe des European Hydrogen Backbones gelegen. Mit dem Projekt „HyPipe Bavaria – The Hydrogen Hub“ wird der Grundstein für ein H₂-Startnetz in Bayern bis 2030 gelegt. Das H₂-Netz wird dabei mit bis zu 95 Prozent durch die Umstellung der in der Region vorhandenen bestehenden Erdgasleitungen realisiert. Mit rund 300 km ist „HyPipe Bavaria – The Hydrogen Hub“ ein wichtiger Teil des

European Hydrogen Backbones und verbindet u. a. die LHM sowie weitere Wasserstoffbedarfsregionen mit zahlreichen potenziellen Erzeugungsregionen im In- und Ausland. Die Pipeline bietet ab 2030 eine Importkapazität von über 6 GW.

Über den H₂-Import in die Region hinaus kann Wasserstoff der vorgenannten Erzeugungsprojekte ebenfalls über regionale Akteur*innen wie der Tycza Hydrogen GmbH oder der Linde GmbH per Trailer zur Endanwendung geliefert werden.

Regionale Herausforderungen

- Gewährleistung der Bedarfsdeckung und Versorgungssicherheit für die regionalen Abnehmer*innen.
- Ermöglichung einer ganzjährigen übersaisonalen und überregionalen Versorgung und Teilnahme an künftigen liquiden H₂-Märkten.
- Versorgungswechsel von Erdgas auf Wasserstoff hinsichtlich der Infrastruktur sowie der Anwendungsbereiche.
- Verfügbarkeit von grünem Wasserstoff.

Lösungsansätze

- Europäische Anbindung an die Wasserstoff-Transportinfrastruktur: Bestandteil des European Hydrogen Backbone.
- Erschließung von Importrouten mit dem Fokus Nordafrika-Italien und Osteuropa.
- Deckung des H₂-Bedarfs in der Region bereits im Jahr 2030 mit bezahlbarem und erneuerbarem Wasserstoff.
- Beitrag zu den Zielen der Dekarbonisierung von Sektoren mit schwer bzw. nicht vermeidbaren Emissionen.
- Ertüchtigung bzw. Umstrukturierung der bestehenden Infrastruktur, kein kompletter Neubau notwendig.
- Einsatz von bewährten Belieberttechnologien für Wasserstoff auf Basis modernster Kompositsteichertechnik.

Externer Unterstützungsbedarf sowie geplante Vernetzungen mit anderen Aktivitäten in der Region

Die Linde GmbH und die Tycza Hydrogen GmbH bieten u. a. den H₂-Transport per Trailer an.

Technologiekonzept & Umsetzungsstrategie

Je nach Projekt und Standort des Elektrolyseurs kann der Wasserstoff direkt vor Ort gespeichert und genutzt werden, sodass eine Speicherung erforderlich ist, jedoch kein zusätzlicher Transport. Bei kleineren Erzeugungsmengen, fehlender Pipelineinfrastruktur oder der Belieferung von unterschiedlichen Endanwender*innen kann Wasserstoff per Trailer transportiert werden. Hierfür bedarf es an der H₂-Produktionsstätte einer Abfüllstation mit Kompressor, da der Speicherdruck im Trailer 500 bar beträgt. Pro Trailer können 900 bis 1.200 kg Wasserstoff transportiert werden. Trailer könnten für die H₂-Erzeugungsprojekte Energiepark Weichs und Icking sowie für die Belieferung der noch zu errichtenden HRS eingesetzt werden. Zusätzlich sind je nach Projekt am Standort der H₂-Produktion und / oder -anwendung Speicher zu errichten. Hier können nach Platzbedarf und Rahmenbedingungen Hochtanks, Röhrenspeicher oder Wechselbrücken zum Einsatz kommen.

Neben der On-Site H₂-Produktion oder dem H₂-Transport per Trailer kann Wasserstoff auch per Pipeline transportiert werden. Die folgende technische Ausführung ist für ein H₂-Pipelinennetz allgemeingültig und bezieht sich nicht explizit auf das European Hydrogen Backbone. Für den Anschluss an das Pipelinennetz wird eine Einspeisestation mit Gasdruckregelung benötigt. Sofern der Elektrolyseurausgangsdruck (meist 30 bar) und Pipelinedruck übereinstimmen, kann auf einen Verdichter verzichtet werden. Bei der Umsetzungsdauer einer neu zu errichtenden Pipeline entfällt der dominierende Anteil auf die verschiedenen Genehmigungsverfahren. Hier sind mehrere Jahre einzukalkulieren, je nach Verlegungsstrecke und örtlicher Genehmigungsbehörde kann die Dauer deutlich geringer ausfallen. Für die Umwidmung bestehender Erdgas-Pipelines auf Wasserstoff ist mit ca. drei Jahren zu planen.

Ausbau der Wasserstofftankstelleninfrastruktur

Im Großraum München treffen sich sieben Autobahnen, was die Region zum Umschlagpunkt für straßengebundenen Verkehr und insbesondere den Schwerlastverkehr macht. Die hohe Bevölkerungs- und Industriedichte in Südbayern bringt eine hohe Verkehrsdichte mit sich, was einer flächendeckenden HRS-Infrastruktur bedarf. Derzeit sind drei öffentliche HRS mit einer 700 bar Druckstufe an der Wilhelm-Hale-Straße, Ottobrunner Straße (Zufahrt auch für Schwerlastfahrzeuge geeignet) und Kreillerstraße im Betrieb.

Es bestehen ideale Bedingungen dafür, die Region als eine initiale Drehscheibe für den Einsatz von H₂-Lkw zu etablieren

und HRS für Nutzfahrzeuge (NFZ) zu errichten. Erste NFZ-HRS sind in der Umsetzung, u. a. zwei autobahnahe Projekte unter der Beteiligung von der Tyczka Hydrogen GmbH. Eine 350 bar HRS befindet sich in Hofolding im Süden der LHM durch die Hy2B Wasserstoff GmbH bereits in der Realisierung und eine weitere 350 und 700 bar HRS ist in Augsburg (Güterverkehrszentrum) geplant. Ab 2026 sollen HRS an allen sieben Autobahnen errichtet werden, um insbesondere den Schwerlastverkehr mit Wasserstoff versorgen zu können. Somit bietet die Region München im deutschlandweiten Vergleich zukünftig eine hervorragende Infrastruktur zur Nutzung von H₂-Fahrzeugen verschiedener Fahrzeugklassen.

Regionale Herausforderungen

- Die Ermittlung von geeigneten Standorten und die Prüfung der Voraussetzungen müssen erfolgen.
- Überwindung der wirtschaftlichen und technischen Risiken.
- Fördermöglichkeiten für Fahrzeuge und weitere Tankstellen.
- Ausreichende Versorgung mit grünem Wasserstoff.
- Eine gesicherte Wasserstoffabnahme ist für die Entscheidungsfindung vieler Betreiber*innen von HRS und gängiger Förderprogramme unverzichtbar.
- Verfügbarkeit von geeigneten Fahrzeugen, Akteur*innen starten mit ersten Fahrzeugen erst ab 2024.
- Die Dauer der Umsetzung sollte mit der Beschaffung der Fahrzeuge abgestimmt werden.
- Viele Akteur*innen des HyStarter-Netzwerks der LHM möchten BZ-Fahrzeuge einsetzen, Nachfragepotenzial ist gegeben.
- Abschätzung von Wasserstoffbedarfsmengen, gegebenenfalls über eine Machbarkeitsstudie.
- Prüfung von Finanzierungs- und Fördermöglichkeiten, z. B. über das Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV).

Externer Unterstützungsbedarf sowie geplante Vernetzungen mit anderen Aktivitäten in der Region

- Die Unternehmen, die grüne Logistikdienstleistungen einkaufen, müssen an Bord geholt werden, um den Mehrwert einer nachhaltigen Lieferkette bis zum Endkunden abzubilden.
- H₂-Abnahme durch Flottenbetreiber, wie u. a. die HyStarter-Akteur*innen MSE, AWM, STAATLICHES HOFBRÄUHAUS MÜNCHEN, MAN Truck & Bus SE, Gienger Logistik KG, ARTHUR BUS GmbH.
- Kontakt zu weiteren Flottenbetreibern durch die Verbände LBT und LBS.

Lösungsansätze

- Durchführung einer Analyse des Nachfragepotenzials, um konstante Abnehmer*innen zu identifizieren.
- Einholung sog. Letter of Intent (LOIs) potenzieller Abnehmer*innen als Entscheidungsgrundlage für die Wahl des Standorts, der Dimensionierung und Druckstufe(n).
- Gemeinsame Planung von Tankstellenaufbau, Mobilitätsanwendungen mit Wasserstoff und regionaler Erzeugung von grünem Wasserstoff.

Technologiekonzept & Umsetzungsstrategie

Die LHM verfügt über ein starkes HyStarter-Akteur*innen-Netzwerk, die u. a. auf die Errichtung, den Betrieb und die Versorgung von HRS spezialisiert sind und diese bereits realisieren. Einzelne Aspekte der Genehmigungsverfahren sind nicht bundesweit einheitlich und somit regional unterschiedlich. Allerdings hat die Bayerische Staatsregierung kürzlich einen Genehmigungsleitfaden veröffentlicht, der das Verfahren vereinfachen und beschleunigen soll. Zudem wurden in der LHM bereits mehrere HRS realisiert, sodass die Behörden Erfahrung mit dem Genehmigungsprozess haben, was die Umsetzung beschleunigen kann.

Während der HyStarter-Dialoge wurden jedoch wiederkehrende Hürden und Herausforderungen genannt, weshalb im Folgenden essenzielle Attribute der Standortwahl einer HRS prioritär aufgeführt werden:

1. Vernetzung und Bündelung von Akteur*innen an einem Standort, um die Nachfrage zu sichern.
2. Grundstück bzgl. Flächenbedarf, Baugenehmigungen und Sicherheitsabständen prüfen.
3. Zugang bzgl. Zufahrtsmöglichkeit der jeweiligen Fahrzeugklassen und ggf. öffentlichen Zugang prüfen.
4. Wasserstoffverfügbarkeit (On-Site-Produktion, Nähe zu Produktionsstandorten, Platz für Trailerwechsel und Vor-Ort-Speicher, Backupsysteme, ggf. auch Pipelineanbindung, Redundanz der Anlieferung) abwägen.

Eine Standortbewertung sollte die oben genannten Kriterien unter Berücksichtigung der Interessen der jeweiligen Betreiber*innen sowie die Anforderungen der Nutzer*innen beinhalten. Beim betrieblichen Einsatz von BZ-Fahrzeugen ist eine nahegelegene Tankstelle Voraussetzung, um Anfahrtswege und damit Arbeitszeitaufwände gering zu halten. Eine Zusammenarbeit von mehreren Beteiligten zur Erhöhung der Auslastung der Tankstelle ist sinnvoll. Aufgrund der geographischen Verteilung der Akteur*innen müssen mehrere geeignete Standorte an Knotenpunkten erschlossen werden. Weitere Aspekte der Planung sind Beschaffungsfenster für Fahrzeuge auf Seiten der Logistiker und weiterer beteiligter Unternehmen, die Lieferzeiten der Fahrzeuge und die Tankstellengenehmigung, der -aufbau sowie die -inbetriebnahme. Die Dimensionierung der Tankstelle erfolgt auf Basis angenommener Fahrzeugeinsätze pro Jahr und Standort. HRS können nachträglich erweitert werden, nicht alle Komponenten sind jedoch modular ausbaufähig. Hochdruckspeichertanks (400/900 bar), Kompressoren sowie Kühlaggregate

müssen gegebenenfalls ersetzt werden. Den zusätzlichen Platzbedarf für diesen Ausbau gilt es von Anfang an einzuplanen. Der Wasserstoffvorratsspeicher (50 / 200 / 300 bar) sowie die Zapfsäule (350 / 700 bar) können in der Regel modular erweitert werden.

Darüber hinaus müssen bei einer Vergrößerung der HRS gewisse Genehmigungsverfahren u. a. die BImSchV, das Störfallrecht, die Baugenehmigung und weitere neu beantragt werden. Zu beachten sind bestimmte Schwellenwerte bei der H₂-Speicherung vor Ort: ab 3 t greift die 4. BImSchV, ab 5 t die 12. BImSchV. Aus diesen Gründen empfiehlt es sich hinsichtlich des richtigen Genehmigungsverfahrens frühzeitig auf die finale H₂-Tankstellengröße hin zu planen. Neben diesen bundeseinheitlich geregelten Genehmigungen kommen zum Teil landesspezifische und örtliche Richtlinien hinzu, die mit den Behörden vor Ort geklärt werden müssen. Da bereits mehrere HRS in der LHM erfolgreich errichtet wurden, zeigt, dass die genannten lokalen Prozesse bereits erfolgreich durchgeführt werden konnten.

Ist eine Errichtung der Tankstelle in einer Halle gewünscht, so müssen gewisse Sicherheitsmaßnahmen getroffen werden. Dies kann beispielsweise durch die konstruktive Auslegung des Hallendaches geschehen (Neubau) oder durch Nachrüstung von Lüftungseinrichtungen und H₂-Sensoren. Zudem sind Explosionsschutz-Richtlinienkonforme (ATEX-Richtlinie) Einrichtungen (z. B. Beleuchtung) zu installieren. Die Kosten für die genannten Umbaumaßnahmen sind bei der Gesamtinvestition jedoch vernachlässigbar, da sie im niedrigen fünfstelligen Bereich liegen. Eine Gefährdungsbeurteilung gemäß Betriebssicherheitsverordnung ist grundsätzlicher Bestandteil des Genehmigungsverfahrens.

Um eine zukunftsfähige HRS in der LHM zu dimensionieren, müssen auch zukünftig zu erwartende Verkehre bei der Berechnung der Tagesumsätze eingebunden werden. Eine 350 bar Druckstufe wird derzeit in der Region etabliert, die 700 bar Druckstufe ist bereits an den drei öffentlichen HRS vorhanden. Für Fördermittelzuschüsse ist außerdem der Nachweis von Nachfragemengen über Bereitschaftserklärungen (eng: Letter of Intent) erforderlich. Diese geben auch den Betreiber*innen der Tankstelle Planungssicherheit bei der Erstdimensionierung sowie bei zukünftigen Ausbaustufen.

Im Vergleich zu anderen Regionen in Deutschland ist die H₂-Infrastruktur der LHM mit führend und erfolgversprechend.

Einsatz von Wasserstoff in der Logistik

Der Einsatz von klimaneutralen Antrieben in der Logistikbranche ist ein entscheidendes Kriterium für das Erreichen der Klimaziele sowie der Imagepflege der Unternehmen. Logistik-Unternehmen oder industrielle und gewerbliche Akteur*innen mit großen NFZ-Fuhrparks benötigen alternative Antriebstechnologien. Wasserstoff eignet sich insbesondere bei langen Distanzen, anspruchsvollen Profilen, Notwendigkeit kurzer Betankungsdauern und besonderen Anforderungen wie z. B. dem Gütertransport. In der LHM prüfen und planen verschiedene Unternehmen die Umstellung ihrer Fahrzeuge auf alternative Wasserstoffantriebe in Form von BZ- oder H₂-Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor.

Im Bereich der Logistik wird der Einsatz von H₂-Lkw bei den Akteur*innen MSE, AWM, STAATLICHES HOFBRÄUHAUS MÜNCHEN, MAN Truck & Bus SE und Gienger Logistik KG diskutiert und geprüft.

Ebenfalls erwägt die BMW AG eine öffentliche HRS für die Logistik am Münchener Werk zu errichten. BMW muss für die Anforderungen der Werkslogistik auch die Nutzung von Wasserstoff als Energieträger bewerten. Täglich fahren viele hundert Lkw zum Werk am BMW Vierzylinder in die Stadt München. Eine öffentliche HRS könnte betriebswirtschaftlich am geeigneten Standort, trotz hoher Investitionen, schnell lukrativ sein und eine Signalwirkung für weitere Tankstellen und Flottenbetreiber schaffen.

Über Schwerlastfahrzeuge hinaus wurden von der BMW AG ebenfalls erste Überlegungen zum H₂-Einsatz im Bereich Flurförderzeuge diskutiert. Hier könnte der Konzern von eigenen Erfahrungen aus dem BMW Werk Leipzig profitieren. Die Gabelstapler befinden sich im 24/7 Einsatz, was mit einer batterieelektrischen Alternative aufgrund der Ladezeiten oder einer Batteriewechselstation zeitliche bzw. räumliche Einschränkungen mit sich bringt. Für dieses Vorhaben wird zusätzlich eine HRS auf dem Betriebsgelände benötigt.

Regionale Herausforderungen

- Fahrzeuge mit alternativen Antrieben sind mit erheblich höheren Investitionskosten verbunden als konventionelle Fahrzeuge. Zusätzlich zur Anschaffung muss auch die Bereitstellung von grünem Wasserstoff sowie der Service und die Wartung berücksichtigt werden.
- Der Stadtrat hat die Klimaneutralität der Stadtverwaltung bis zum Jahr 2030 beschlossen.
- Klimaneutralität des Fuhrparks unter Berücksichtigung möglichst geringer Kosten, derzeit sind die Anschaffungskosten für einen BZ-Lkw um ein vielfaches höher.
- Wirtschaftlichkeit und Genehmigung bei einer Betriebshoftankstelle.

Lösungsansätze

- Das Sammeln von Erfahrungen und die Senkung der Investitionskosten können durch Leasing-Modelle schnell und unkompliziert erfolgen. Wenn es um langfristige Pläne und größere Flottenumrüstungen geht, kann es sinnvoll sein, sich zunächst mit einem Fahrzeug-Leasing und Vertragstankstellen mit der neuen Technologie vertraut zu machen, bevor die Investition in eine eigene Infrastruktur getätigt wird.
- Definition der passenden Technologie je Anwendungsgebiet.
- Neben BZ-Fahrzeugen werden von Herstellern auch H₂-Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren angeboten bzw. darauf umgebaut.
- Prüfung von Finanzierungs- und Fördermöglichkeiten.

Externer Unterstützungsbedarf sowie geplante Vernetzungen mit anderen Aktivitäten in der Region

Identifikation weiterer H₂-Abnehmer*innen für die Errichtung einer Betriebshof HRS.

Technologiekonzept & Umsetzungsstrategie

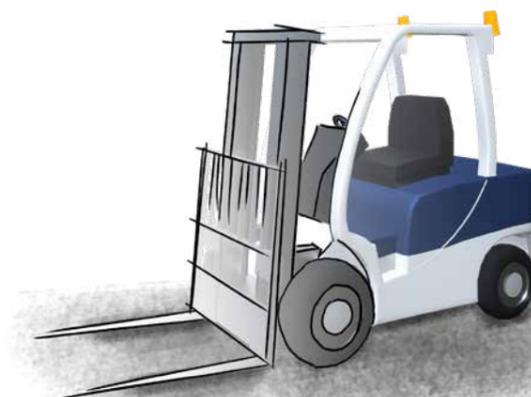
In der LHM besteht ein hohes Bestreben zum Einsatz von H₂-Lkw von verschiedenen Akteur*innen. Das liegt u. a. daran, dass im Schwerlastbereich der Fokus eher auf BZ-Lkw statt auf batterieelektrischen Lkw liegt, aufgrund der geringeren Speichergewichte, der damit verbundenen höheren Nutzlast, der längeren Reichweiten sowie der kürzeren Tankdauer. Deutsche Lkw-Hersteller erwägen auch den Einsatz von Wasserstoffverbrennungsmotoren oder bei der Speicherung Flüssigwasserstoff anstelle von gasförmigem Wasserstoff. Letzteres erfordert jedoch spezielle Flüssigwasserstofftankstellen. BZ-Lkw sind in der Serienreife jedoch bislang nur von wenigen Herstellern verfügbar, sodass mit langen Lieferzeiten gerechnet werden muss. Eine Erweiterung der Modellauswahl wurde bereits von einigen Hersteller*innen angekündigt bzw. vorgestellt.

BZ-Lkw werden vorerst überwiegend mit 350 bar betankt. Für den langfristigen Umstieg auf Wasserstoff in der Flotte benötigen Logistikbetriebe eine HRS mit 350 bar Druckstufe, die von ihren Leistungsdaten für die Lkw-Betankung geeignet ist. Öffentliche HRS sind meist auf den Pkw-Verkehr ausgelegt und verfügen nur über eine 700 bar Druckstufe sowie teilweise eingeschränkte Zufahrtsmöglichkeiten für Schwerlastfahrzeuge. Bestehen diese baulichen Einschränkungen nicht, sollen viele der öffentlichen HRS um eine 350 bar Druckstufe erweitert werden. Da manche Lkw-Hersteller auch bereits die Verwendung von 700 bar Speichertanks in Erwägung ziehen, könnte es auf längere Sicht nötig sein, diesen Druck auch an den Lkw-Tankstellen anzubieten. Das würde andere Kompressoren und Drucktanks nötig machen. Auch die bisherigen 700 bar HRS für Pkw müssten wegen der höheren Abgabemengen mit entsprechender Technik nachgerüstet werden.

Im industriellen Einsatz bieten BZ-Gabelstapler eine sinnvolle Alternative zu Benzin- oder Gasfahrzeugen. Während des Betriebs werden keine Schadstoffe freigesetzt, wodurch sie sich insbesondere für Lagerhallen und geschlossene Gebäude eignen. Darüber hinaus sinkt auch die Lärmemission der Fahrzeuge deutlich. Aufgrund der kurzen Betankungszeiten eignen sie sich gerade für den Mehrschichtbetrieb. Denn im Vergleich zu batterieelektrischen Gabelstaplern kann die Ladezeit und somit der Stillstand des Fahrzeugs vermieden und zudem auf eine platzintensive Batteriewechselstation verzichtet werden.

Sofern die Fahrzeuge nicht im Mehrschichtbetrieb eingesetzt werden, empfiehlt sich allerdings der Einsatz von batterieelektrischen Gabelstaplern aufgrund des höheren Wirkungsgrads und der einfacher zu errichtenden Infrastruktur. Sofern neben einer öffentlichen HRS am BMW Werk München zusätzlich eine HRS für Flurförderzeuge auf dem Gelände geplant ist, bedarf es lediglich eines weiteren Dispensers. Die wesentlichen Komponenten (Verdichter, Speicher) können jedoch für die öffentliche und die indoor oder outdoor HRS der Flurförderzeuge genutzt werden. Auch aus förderrechtlichen Gründen kann ein separater Dispenser nötig sein, wenn z. B. die Förderung der Tankstelle sich auf nicht-öffentliche Tankstellen beschränkt (vgl. KSNI-Richtlinie). Dieser separate Dispenser wäre dann gegebenenfalls ohne Förderung zu finanzieren. Falls die Flurförderfahrzeug-HRS nicht an eine bestehende HRS gekoppelt werden soll, sind die Investitionskosten deutlich geringer. Dies liegt daran, dass durch kleine Tankmengen (ca. 1 kg pro Flurförderfahrzeug) auf große Vorkühler verzichtet werden kann und für die Speicherung bzw. Anlieferung H₂-Flaschenbündel ausreichen können.

Zusätzlich zu den Schwerlastfahrzeugen und Flurförderzeugen wurden in den Strategiedialogen ebenfalls BZ-Pkw genannt. Anwendungsfälle sind insbesondere Flotten, bei denen eine hohe zeitliche Auslastung gegeben ist, oder Fahrzeuge, die weite Strecken am Stück zurücklegen und lange Ladezyklen dementsprechend nicht realisierbar sind. Charakteristisch für betrieblich genutzte Pkw-Flotten sind beispielsweise Außendienstfahrzeuge. Derzeit sind am Markt zwei Fahrzeuge von Toyota und Hyundai in der Serienreife verfügbar, jedoch startete die BMW AG mit der Auslieferung einer Kleinserie des iX5 Hydrogen.



Einsatz von Wasserstoff in Sonderfahrzeugen

Im Bereich der Sonderfahrzeuge werden Müllsammelfahrzeuge des AWM sowie Kanalreinigungsfahrzeuge der MSE betrachtet.

Die MSE betreibt einen Fuhrpark von ca. 20 Großfahrzeugen zur Reinigung von Kanälen innerhalb der LHM. Derzeit werden sämtliche Fahrzeuge mit einem Diesel-Verbrennungsmotor betrieben. Vor dem Hintergrund des Beschlusses zur Klimaneutralität der Stadtverwaltung durch den Stadtrat müssen für diese Fahrzeuge alternative Antriebslösungen umgesetzt werden. Aufgrund der hohen Leistungsanforderungen und dem Energiebedarf scheint die Umsetzung als vollbatterieelektrisches Fahrzeug aktuell nicht sinnvoll möglich, weshalb

der Einsatz von H₂-Fahrzeugen geprüft werden soll. Vor ähnlichen Herausforderungen steht der AWM. Der Fuhrpark umfasst fast 200 Müllsammelfahrzeuge mit unterschiedlichen Streckenprofilen. Der Streckenumlauf liegt zwischen 70 bis 160 Tageskilometern und der Diesel- bzw. Gasverbrauch auf 100 km schwankt teils über 85 Prozent. Aus diesem Grund werden Alternativpfade von dem AWM umgesetzt. Je nach Streckenprofil eignen sich batterieelektrische Fahrzeuge, für gewisse Routen werden jedoch BZ-Fahrzeuge benötigt. Dementsprechend bestellte der AWM bereits beide Antriebsarten, um diese auf die unterschiedlichen Anforderungen zu testen.

Regionale Herausforderungen

- Fahrzeugverfügbarkeit von Müllsammel- und Kanalreinigungsfahrzeugen.
- Volatilität in der Leistungsanforderung, generell hohe Antriebsleistung im Stand.
- Klimaneutralität des Fuhrparks bis zum Jahr 2030 unter Berücksichtigung möglichst geringer Kosten.
- Wirtschaftlichkeit und Genehmigung bei einer Betriebshoftankstelle.

Lösungsansätze

- Umbau bestehender Fahrzeuge auf BZ oder H₂-Verbrennungsmotor.
- Definieren der passenden Technologie je Anwendungsgebiet.
- Weitere H₂-Abnehmer*innen für die Errichtung einer Betriebshof HRS sind zu identifizieren.

Externer Unterstützungsbedarf sowie geplante Vernetzungen mit anderen Aktivitäten in der Region

- Technologische Synergien mit anderen Anwender*innen von Sonderfahrzeugen mit hohen Leistungs- und Energieanforderungen. Zur Durchführung des Projekts sollte zumindest ein*e Hersteller*in von Kanalreinigungsaufbauten beteiligt werden.
- Kontaktaufnahme zu Anbieter*in oder Umrüster*in von Lkw auf H₂-Antrieb.

Technologiekonzept & Umsetzungsstrategie

Der AWM möchte für die unterschiedlichen Leistungsanforderungen sowohl batterieelektrische als auch BZ-Müllsammelfahrzeuge einsetzen. Beide Antriebsarten wurden bereits bestellt und befinden sich im Einsatz. Hersteller*innen setzen bei BZ-Müllsammelfahrzeugen meist auf BZ-REX (Range Extender), womit das Fahrzeug über eine entsprechende Wasserstofftank- und Batteriekapazität verfügt. Durch das ständige Anfahren und Bremsen lassen sich bis zu 40 Prozent der benötigten Energie rekuperieren. Die Fahrzeuge sind je nach Hersteller*innen mit einem 350 oder 700 bar Tank ausgestattet, sodass sie auch an öffentlichen HRS, sofern die Zufahrtsbedingungen es ermöglichen, getankt werden können. Aufgrund des REX-Konzepts muss auf dem Betriebshof auch eine Ladeinfrastruktur errichtet werden.

Noch nicht verfügbare H₂-Fahrzeugklassen, wie z. B. Kanalreinigungsfahrzeuge, stellen u. a. die MSE vor Herausforderungen, insbesondere hinsichtlich der fristgerechten Anforderungserfüllung an die CVD-Richtlinie. Noch nicht verfügbare Fahrzeugklassen können meist in kleiner Stückzahl von Fahrzeug-Umbauer*innen bezogen werden, wie z. B. Paul Nutzfahrzeuge. Je nach Anwendungsgebiet eignet sich aufgrund der Robustheit und der geringen Komplexität ein H₂-Verbrennungsmotor. Bei konventionellen Verbrennern ist auch die Umrüstung von Dieselfahrzeugen auf H₂-Verbrennungsmotoren möglich.

Einsatz von Wasserstoff in der Industrie inkl. Erzeugung

In Burghausen, ca. 90 Kilometer östlich vom Stadtzentrum der LHM, wird das Projekt RHYME Bavaria von der Wacker Chemie AG geplant. In dem Projekt ist die Erzeugung von grünem Wasserstoff zur Produktion von grünem Methanol angedacht. Der dafür benötigte Kohlenstoff ist in Form von CO₂ als Nebenprodukt am Standort verfügbar, sodass für die Methanolproduktion keine zusätzliche Anlieferung von Ausgangsstoffen notwendig ist. Das Methanol kann in

weiteren Produktionsverfahren vor Ort verwendet werden. Für die grüne Wasserstoffproduktion soll ein 20 MW Elektrolyseur in der Region Burghausen errichtet werden. Überschüssige Mengen an Wasserstoff könnten Projekten der LHM bereitgestellt werden, z. B. über das European Hydrogen Backbone oder per Trailer. Auch die Bereitstellung von grünem Methanol wäre denkbar.

Regionale Herausforderungen

- Umwidmung der Erdgasleitung (Genehmigung).
- Abnahme des Wasserstoffs in der LHM.

Lösungsansätze

- Strombezug über PPA, um die Volllaststunden / Betriebsstunden des Elektrolyseurs zu erhöhen.
- Transport zunächst über Trailer und wenn möglich über das Pipelinenetz des European Hydrogen Backbone.
- Methanolproduktion aufgrund der Kohlenstoffquelle bei Wacker Chemie AG.

Externer Unterstützungsbedarf sowie geplante Vernetzungen mit anderen Aktivitäten in der Region

- H₂-Transport: Linde GmbH, Bayernets GmbH, Bayergas GmbH, Tyczka Hydrogen GmbH.
- H₂-Abnahme: Akteur*innen in und im Umkreis der LHM.

Technologiekonzept & Umsetzungsstrategie

Die grüne H₂-Produktion wurde bereits im Kapitel „Wasserstoff-Erzeugung aus erneuerbaren Energien“ detailliert aufgeführt. Die Wacker Chemie AG möchte den erzeugten Wasserstoff primär für die Methanolproduktion verwenden, überschüssiger Wasserstoff könnte über die Anbindung an das European Hydrogen Backbone Abnehmer*innen in der LHM zur Verfügung gestellt werden. Bei der Herstellung wird grüner Wasserstoff mit unvermeidbaren Kohlenstoffdioxid in Methanol umgewandelt. Eine Kohlenstoffquelle ist in der Prozesskette vor Ort gegeben, und auch das Methanol wird stofflich für weitere Prozessschritte benötigt.

Gegebenenfalls kann die Wacker Chemie AG auch Methanol an Dritte veräußern. Methanol weist eine hohe Energiedichte auf und lässt sich als Flüssigkeit einfach transportieren. Darüber hinaus lässt sich Methanol in Direkt-Methanol-Brennstoffzellen (DMFC) oder Verbrennungsmotoren einsetzen. Bei der Anwendung wird nur die zugeführte Menge an Kohlenstoffdioxid wieder in die Atmosphäre zurückgeführt. Es ist auch möglich, durch eine Reformierung aus dem Methanol wieder Wasserstoff zurückzugewinnen und diesen in PEM-Brennstoffzellen oder H₂-Verbrennungsmotoren einzusetzen. Beide Pfade weisen jedoch einen sehr geringen Wirkungsgrad auf. Zudem können bei unvollständiger Reformierung Methanolreste den Katalysator in den PEM-Brennstoffzellen „vergiften“ und die Brennstoffzelle damit beschädigen. In beiden Fällen könnten die Abnehmer*innen in der LHM von der Lieferung beider Energieträger profitieren, was die Wacker Chemie AG zu einem wichtigen Akteur der H₂-Wertschöpfungskette macht.



Autarke Gebäudeenergieversorgung mittels Wasserstoff

Ein Bestandswohngebäude aus den 1960er Jahren in Irschenhausen wurde mit modernster Gebäudetechnik von einer analogen, auf fossilen Brennstoffen basierenden Energieversorgung hin zu einer digitalen, vernetzten und auf erneuerbaren Energien basierten Energieversorgung umgerüstet. Wasserstoff wird in dem System

zur saisonalen Energiespeicherung eingesetzt. Aus dem überschüssigen Strom der PV-Anlage wird mittels Elektrolyse Wasserstoff produziert. Dieser kann bei Bedarf, insbesondere während der Winterzeit, in Wärme und Strom umgewandelt werden. Das Projekt „DAS HAUS“ wurde von der white energy GmbH umgesetzt.

Regionale Herausforderungen

- Das System ist auf ca. 80 Prozent der Bestandsgebäude in Deutschland übertragbar.
- Größtenteils keine Autarkie innerhalb der LHM möglich, jedoch am Stadtrand.

Lösungsansätze

- Das Projekt wird 2023 vollständig den Betrieb aufnehmen.
- Entlastung des öffentlichen Stromnetzes.
- Umfassendes Energiemanagementsystem.
- Einbindung der Ladeinfrastruktur am Haus für batterieelektrische Fahrzeuge.

Externer Unterstützungsbedarf sowie geplante Vernetzungen mit anderen Aktivitäten in der Region

- Das Projekt wurde von der white energy GmbH umgesetzt, welche bei Folgeprojekten in Wohngebäuden oder Gewerbeimmobilien gerne unterstützen.
- Das System kann auf weitere Objekte, Energiegemeinschaften oder Energiegenossenschaften übertragen werden, wodurch zusätzliche Energienutzungspotenziale gehoben werden können und eine Kostensenkung sowie Stromnetzentlastung erreicht werden können.

Technologiekonzept & Umsetzungsstrategie

„DAS HAUS“ wurde von der white energy GmbH realisiert. Es umfasst folgende Komponenten: PV-Anlage (30 kWp), Batteriespeicher (14 und 15 kWh), Wärmepumpe (bis zu 13,4 kW), eine H₂ready Gastherme, Warmwasser-Pufferspeicher mit Heizstab, Brennstoffzelle, Elektrolyseur (4,8kW), H₂-Flaschenbündel (100 kWh bei 35 bar und 850 kWh bei 300 bar) sowie ein geeignetes Monitoring

und Energiemanagementsystem. Darüber hinaus wurde ebenfalls Ladeinfrastruktur mit der Option des bidirektionalen Ladens errichtet. Die white energy GmbH kann das System auch auf weitere Objekte übertragen. Im Folgenden werden zunächst die grundlegenden technischen Voraussetzungen und Bestandteile eines Inselsystems beschrieben.

Beim Einsatz von Wasserstoff in Standortkonzepten für die Gebäudeenergieversorgung sind verschiedene Technologielösungen möglich. So kann die Wärmebereitstellung sowohl verbrennungsmotorisch im H₂-BHKW, in einer Brennstoffzelle oder über die Abwärmenutzung des Elektrolyseurs erfolgen. Bei der Produktion von 1 kg H₂ entstehen 16 kWh Abwärme mit einem Temperaturniveau von 50 bis 60 Grad Celsius. Das erzeugte Abwärmeniveau des Elektrolyseurs oder auch der Brennstoffzelle eignet sich besonders für die Wärmeversorgung von energieeffizienten Gebäudetypen (Aktiv-/Energieplus, Passivhäusern etc.). Bei diesem Temperaturniveau muss der Elektrolyseur jedoch in der Nähe der Anwendungsstätte errichtet werden. Für die Einspeisung ins Fernwärmenetz eignet sich die Wärmeauskopplung lediglich für kalte Nahwärmenetze. Der für die Elektrolyse benötigte Strom wird meist über eine PV-Anlage produziert. Die PV-Anlage ist ebenfalls für die Stromversorgung des Hauses und die Strombereitstellung der Komponenten wie u. a. der Wärmepumpe zuständig. Zur Realisierung von autarken bzw. Inselsystemen ist die kurzfristige Speicherung mittels stationärem Batteriesystem sowie die saisonale H₂-Speicherung in Flaschenbündeln oder Tanks vor Ort notwendig. Für die Energieversorgung, insbesondere im Winter, ist ein stationäres Brennstoffzellensystem zu errichten, das den gespeicherten Wasserstoff in Strom und Wärme umwandelt. Vollautarke Systeme sollten aus Kostengründen nur, wenn unbedingt erforderlich, realisiert werden, ein Netzanschluss ist aus Redundanzgründen zur Sicherstellung der Energieversorgung immer sinnvoll.

Dekarbonisierung der Fernwärme

Von den SWM wird derzeit ein Transformationsplan erstellt, der den Dekarbonisierungspfad für Fernwärme bis 2045 beschreibt. Die Grundlast der Fernwärmeversorgung wird durch die Erschließung tiefer geothermaler Quellen gewährleistet. Großwärmepumpen werden ebenfalls stark zum Einsatz kommen. Im Zuge des Geothermie- und Großwärmepumpenausbaus wird sukzessive der Einsatz

fossiler Energieträger reduziert. In heutigen Schätzungen gehen die SWM davon aus, dass zukünftig ein Anteil der Fernwärmeerzeugung auch durch Wasserstoff bereitgestellt wird. Erste Abschätzungen zum Einsatz von Wasserstoff an den zentralen Erzeugungsstandorten (KWK-Anlagen und Heizwerken) ergaben einen H₂-Bedarf bis zum Jahr 2045 von 1 bis 5 TWh.

Regionale Herausforderungen

- Verfügbarkeit von pipelinegebundenem Wasserstoff muss versorgungssicher gewährleistet sein.
- Umbau der Heizwerke und Heizkraftwerke auf Wasserstoff.

Lösungsansätze

- Überregionale Versorgung über „HyPipe Bavaria“ (European Hydrogen Backbone).
- Analyse von Leitungsabschnitten durch die SWM Infrastruktur GmbH und Co. KG zur Weiterleitung des Wasserstoffs an zentrale Erzeugungsstandorte.
- Identifikation der notwendigen Maßnahmen zur Umstellung an zentralen Standorten.

Externer Unterstützungsbedarf sowie geplante Vernetzungen mit anderen Aktivitäten in der Region

- Klare gesetzliche Regelungen, um Planungssicherheit zu gewährleisten, z. B. sind politische Diskussionen (Wasserstoff Netzgesellschaft etc.) nicht abgeschlossen.
- Anbindung an das Projekt „HyPipe Bavaria“.



Technologiekonzept & Umsetzungsstrategie

In der LHM soll die Fernwärme über einen Erzeugungsmix bereitgestellt werden. Ein dominierender Anteil wird über tiefe Geothermie bereitgestellt, zusätzlich wird Wärme über Großwärmepumpen, Müllverbrennungs- sowie Biomasseanlagen bereitgestellt. In bestehenden KWK-Anlagen sowie in Heizwerken soll der Erdgasanteil mittels Wasserstoffs substituiert werden, was einen Umbau der Anlage erforderlich macht (je nach Anlagentyp betrifft dies im Wesentlichen den Brenner oder die Gasturbinen). Neben der hieraus gewonnenen CO₂-neutralen Fernwärme tragen die Heizkraftwerke auch zu einem sicheren und zuverlässigen Betrieb des Stromübertragungsnetzes und zu einer lokalen Stromversorgung der LHM bei.¹ Zur Dekarbonisierung der Fernwärme sind die nächsten Schritte wie folgt:

- Finalisierung des Transformationsplans zur Fernwärmeversorgung.
- Flächensicherung, Projektierung und Ausbau der Erzeugungsstandorte für tiefe Geothermie und Großwärmepumpen.
- Untersuchung der notwendigen Maßnahmen zur Sicherstellung einer H₂ readiness in Heizwerken und Heizkraftwerken.
- Leitungsgebundener Anschluss an ein überregionales Pipelinennetz.
- Sukzessive Substitution der fossilen Energieträger durch Wasserstoff.

¹ <https://www.tennet.eu/de/news/aktuelle-studie-zeigt-wasserstoffkraftwerke-sichern-kuentig-stromversorgung-sued-deutschland>

Weitere Informationen zu den aktuellen Wasserstofftechnologien (Verfügbarkeit, Reifegrad, Funktionsweise, Hersteller u. v. m.), eine Übersicht zu den rechtlichen und regulatorischen Rahmenbedingungen sowie Informationen zu aktuellen Förderprogrammen finden Sie unter den nachfolgenden QR-Codes.

Aktuelle Förderprogramme



- Förderprogramme auf EU-Ebene
- Förderprogramme auf Bundes-Ebene

Gesetze und Regulatorik



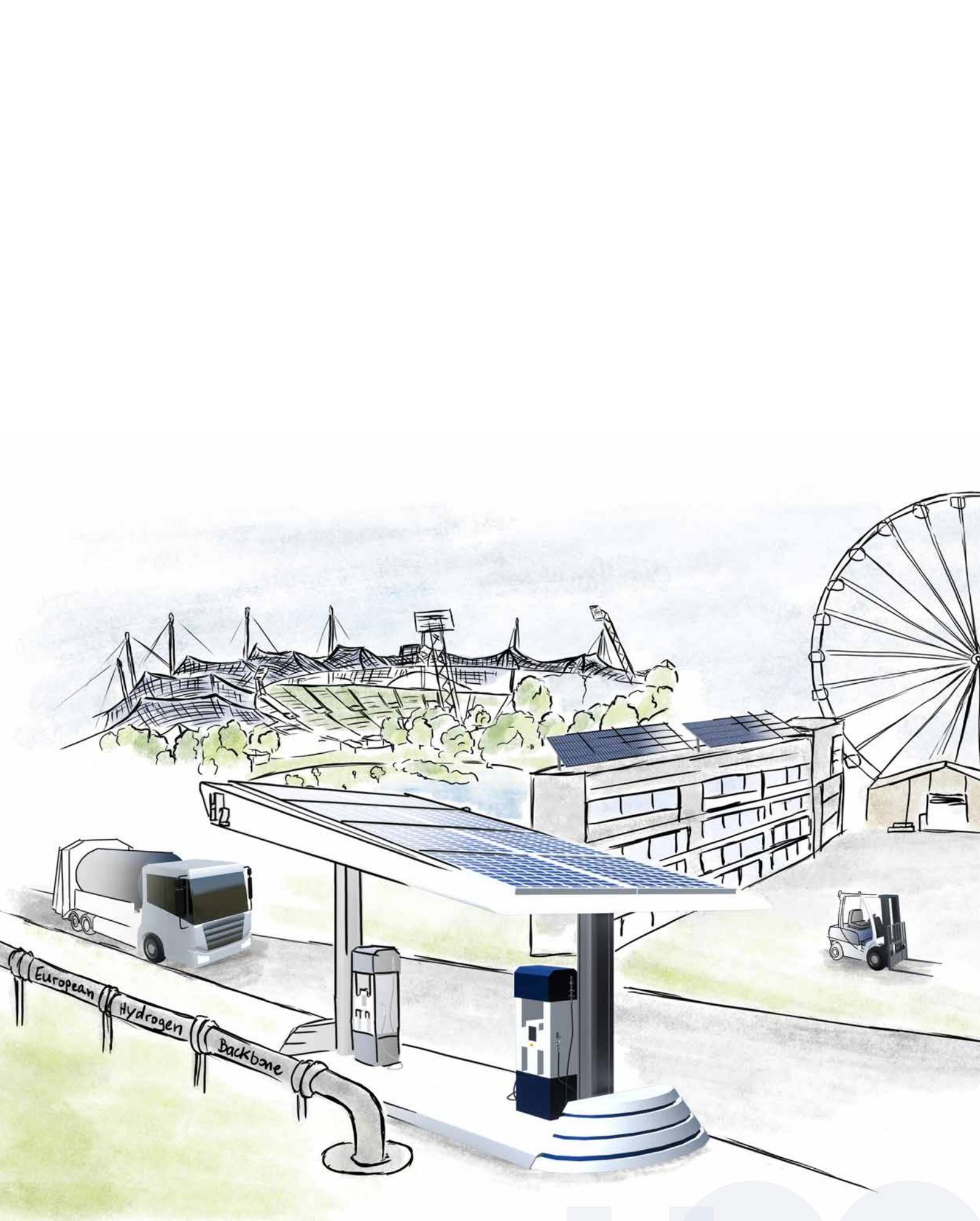
- Gesetzeslandkarte zu nationalen Gesetzen und Verordnungen

Wasserstoffanwendungen



- Straßenfahrzeuge mit Brennstoffzellenantrieb
- Weitere mobile Anwendungen
- Gebäude- und Standortenergieversorgung
- Wasserstoffproduktion
- Wasserstofftransport und -abgabe

AEL	Alkalischer Elektrolyseur
AWM	Abfallwirtschaftsbetrieb München
BEV	Battery electric vehicle
BHKW	Blockheizkraftwerk
BImSchV	Bundesimmissionsschutzverordnung
BMDV	Bundesministerium für Digitales und Verkehr
BZ	Brennstoffzelle
CVD	Clean Vehicles Directive
DMFC	Direkt-Methanol-Brennstoffzellen
EE	Erneuerbare Energien
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
ESB-HD	Energie Südbayern Hochdruck-Gasnetz
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle (Brennstoffzellenfahrzeuge)
H₂	Wasserstoff
HRS	Hydrogen Refueling Station (Wasserstofftankstelle)
ICE	Internal combustion engine
IE-Richtlinie	Industrieemissionsrichtlinie
KsNI	Förderprogramm für Klimaschonende Nutzfahrzeuge und Infrastruktur
KWK	Kraft-Wärme-Koppelung
LHM	Landeshauptstadt München
LOI	Letter of Intent
MSE	Münchener Stadtentwässerung
NFZ	Nutzfahrzeuge
NIP	Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie
NOW	Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie
O₂	Sauerstoff
OEM	Original Equipment Manufacturer
PEM	Polymer-Elektrolyt-Membran
PPA	Power Purchase Agreements
PTJ	Projektträger Jülich
PV	Photovoltaik
SWM	Stadtwerke München GmbH
TrinkwV	Trinkwasserverordnung
VLS	Volllaststunde



H₂