HyExperts
Region AachenPLUS

Wasserstoffstudie für die Modellregion AachenPLUS

HyExperts

Region AachenPLUS

Gemeinsam:
Grenzen überwinden,
Strukturen wandeln,
Wissen schaffen.

HYEXPERTS
WASSERSTOFFREGIONEN IN DEUTSCHLAND

HyExperts Region AachenPLUS
Wasserstoffstudie für die Modellregion AachenPLUS

Auftraggeber:

Kreis Düren

stellvertretend für die Region AachenPLUS (StädteRegion Aachen, Stadt Aachen, Kreis Düren, Kreis Heinsberg, Kreis Euskirchen, Kolpingstadt Kerpen)

Erstellt durch:

umlaut Part of Accenture
Am Kraftversorgungsturm 3
52070 Aachen

BBH Consulting AG
Agrippinawerft 26-30
50678 Köln

BET Büro für Energiewirtschaft und technische Planung GmbH
Alfonsstraße 44
52070 Aachen

Gefördert durch:
Bundesministerium für Digitales und Verkehr

Koordiniert durch:
NOW-GMBH.DE

Projektträger:
Projektträger Jülich
Forschungszentrum Jülich

Autoren:

Dr. Martin Robinius, Patrick Wienert, Dr. Florian Nigbur, Dr. Simon Andres, Jonas Bonnet, Till Gerstein, Vincent Güttler, Dominic Nailis, Nikolas Beneke, Luisa Kamp, Thomas Hauler, Ole Krause, Sylvia Kalwa, Josef Riedl

Die Entwicklung der Region AachenPLUS als Wasserstoffregion wird im Rahmen des Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP2) mit insgesamt 400.000 Euro durch das Bundesministerium für Digitales und Verkehr gefördert. Die Förderrichtlinie wird von der NOW GmbH koordiniert und durch den Projektträger Jülich (PtJ) umgesetzt.

HYDROGEN HUB AACHEN

Inhaltsverzeichnis

1. Kurzzusammenfassung 1
2. Einleitung 7
3. Erzeugungspfade und -strukturen 9
   - 3.1. Daten zu EE-Potenzialen in der Region AachenPLUS 11
   - 3.2. Daten zum EE-Ausbau in der Region AachenPLUS 13
   - 3.3. Regionaler EE-Strom & Grüner Wasserstoff 18
     - 3.3.1. Einschränkungen aus Sicht der Elektrolyse 18
     - 3.3.2. Potenziale Grünen Wasserstoffs aus EE-Strom in der Region AachenPLUS 20
   - 3.4. Importmöglichkeiten für EE-Strom 21
4. Transmission und Distribution 22
   - 4.1. Technologiesteckbriefe der Transport- und Speicherinfrastruktur 23
   - 4.2. Wasserstoff aus dem H_2-Backbone: Zukunftsvisionen 25
   - 4.3. Status quo: H_2-Pipelineinfrastruktur in der Region AachenPLUS 28
   - 4.4. Technologiebausteine der H_2-Versorgungspfade 31
   - 4.5. Ergebnisse der Distributionsoptionen 32
5. Nutzung im Verkehr & weiteren Bereichen 36
   - 5.1. Mobilität und Verkehr 36
     - 5.1.1. Ist-Analyse 37
     - 5.1.2. Analyse der Fahrzeugentwicklung 39
     - 5.1.3. Analyse einzelner Streckenabschnitte 41
     - 5.1.4. Synthese und Handlungsempfehlungen 41
   - 5.2. Industrie 45
     - 5.2.1. H_2-Potenziale für Prozesswärme 46
     - 5.2.2. H_2-Potenziale für Raumwärme und Warmwasser 49
     - 5.2.3. H_2-Potenziale für die stoffliche Nutzung 51
     - 5.2.4. Deep Dive: Techno-ökonomische Analyse der Eignung von Wasserstoff in der Glasindustrie 52

5.3. Gebäude 60
5.3.1. Wasserstoff in Szenarien der Energiewirtschaft 61
5.3.2. Verteilinfrastrukturen als Voraussetzung für Wasserstoff in Gebäuden 61
5.3.3. Gebäude und Geräte 62
5.4. Forschung, Entwicklung und Implementierung 64
5.4.1. Definition und Abgrenzung der Akteure zu Projekten in der Region 65
5.4.2. Analyse der Akteure und Projekte in der Region 66
6. Well-to-Wheel-Analyse und Total Cost of Ownership 71
6.1. Vorgehen bei der Technologieauswahl 72
6.2. Methode der Well-to-Wheel-Analyse 73
6.3. Annahmen der Well-to-Wheel-Analyse 74
6.4. Ergebnisse der Well-to-Wheel-Analyse 76
6.4.1. Energieverbrauch 76
6.4.2. THG-Emissionen 77
6.5. Methode der TCO-Analyse 81
6.5.1. Technologiepfad „FCEV-Bus ländlicher Raum“ 82
6.5.2. Technologiepfad „BEV-Bus städtischer Raum” 86
6.5.3. Technologiepfad „FCEV-Zug“ 90
6.6. Vergleich der Mobilitätstechnologiepfade 93
7. Strategie mit Roadmap 96
7.1. Unsere Vision 96
7.2. Zukünftige Zusammenarbeit 97
7.3. Grenzüberwindende Aktivitäten 99
7.4. Erzeugungspfade und -strukturen 101
7.5. Transmission und Distribution 104
7.6. Mobilität und Verkehr 108
7.7. Industrie 111
7.8. Gebäude 115
7.9. Forschung, Entwicklung und Implementierung 116

Anhang 120
I. Wissensplattform und Kompetenzatlas 121
Ziel der Wissensplattform 122
Auswahl einer geeigneten Plattform 123
Überblick über existierende Plattformen 123
Konzept der Wissensplattform 126
Statische Landingpage auf Hydrogen Hub Aachen 127
Digitalplattform Hyperegio DIP 131
Konzept des Kompetenzatlas 132
Umsetzung der Wissensplattform und des Kompetenzatlas 133
II. Tabellen zu Kapitel 5.2 134
III. Abbildungsverzeichnis 135
IV. Tabellenverzeichnis 138
V. Abkürzungsverzeichnis 139
VI. Literaturverzeichnis 141

1. Kurzzusammenfassung

Die integrierte H_2-Strategie für die Region AachenPLUS: Ein sektorübergreifender Aktionsplan

Im vorliegenden Bericht wird die gemeinsame Strategie für die nachhaltige und zukunftssichere Energieversorgung der Region AachenPLUS erarbeitet und vorgestellt. Zum Betrachtungsraum zählen die Kreise Düren, Euskirchen, Heinsberg, die Kolpingstadt Kerpen und die StädteRegion Aachen sowie die Stadt Aachen. Für die ganzheitliche Strategieentwicklung werden die Sektoren Erzeugungspfade und -strukturen, Transmission und Distribution, sowie die H_2-Nutzung in Mobilität und Verkehr, Industrie, im Gebäudesektor und der Forschung, Entwicklung und Implementierung detailliert untersucht. Zudem wird eine Well-to-Wheel-Analyse[1] erstellt, eine Total Cost of Ownership Berechnung[2] durchgeführt und eine Wissens- und Vernetzungsplattform samt lokalem Kompetenzatlas konzipiert und vorgestellt. Die Erkenntnisse aus diesen Untersuchungen fließen in die gemeinsame, mit den Akteurinnen und Akteuren der Region entwickelte, Strategie ein und bilden das Fundament für die H_2-Roadmap. Neben den regionalen Analyseergebnissen und der entwickelten Strategie mit Roadmap liefert der vorliegende Bericht auch einen methodischen Werkzeugkasten, der auch von anderen Regionen angewendet werden kann.

Hintergrund und Motivation

Um eine nachhaltige Energiewende sicherzustellen, die Abkehr von fossilen Energieträgern zu fördern und zugleich die Abhängigkeit von anderen Staaten zu mindern, ist ein tiefgreifender Strukturwandel der europäischen sowie deutschen Energiepolitik erforderlich. Die Region AachenPLUS ist durch den Kohleausstieg besonders stark betroffen und durchläuft einen rasanten Transformationsprozess. Es gilt, die Energiewende so zu gestalten, dass die Wertschöpfung in der Region erhalten und gesteigert wird. Dabei wird Grüner Wasserstoff sektorübergreifend eine entscheidende Rolle für die klimaneutrale und gesicherte Energieversorgung spielen. Dazu organisiert sich die H_2-Region AachenPLUS, um gemeinsam entsprechend ihres Slogans Grenzen zu überwinden, Strukturen zu wandeln und Wissen zu schaffen.

Zielerreichung

In enger Abstimmung mit beteiligten Akteurinnen und Akteuren werden feingranulare Untersuchungen durchgeführt und zahlreiche Maßnahmen sowie Meilensteine für die H_2-Wertschöpfungskette formuliert. Zur Erreichung der ambitionierten Ziele der Bundesregierung bilden feingranulare Untersuchungen und zahlreiche definierte Maßnahmenpakete und Meilensteine die Grundlage für die Umsetzung in die Praxis. Diese wurden für die

[1] Analysemethode zur Untersuchung der gesamten energetischen Wirkungskette für die Mobilität, von der Gewinnung bis zum Verbrauch (vom Bohrloch bis zum Rad).

[2] Abrechnungsverfahren zur Bestimmung ständiger Kostenarten von Investitionsgütern. Berechnung von Anschaffungs- sowie laufender Kosten.

untersuchten Elemente der H_2-Wertschöpfungskette unter Einbindung aller Akteurinnen und Akteure formuliert. Einige übergeordneten Maßnahmen und Meilensteine sind nachstehend in Abbildung 1 und Abbildung 2 als Gesamtroadmap dargestellt. Für eine detaillierte Liste an Maßnahmen und Meilensteinen wird auf die einzelnen Sektorenroadmaps im Kapitel 7 verwiesen.

Resümee

An dieser Stelle werden die Kernaussagen und Ergebnisse aus den einzelnen Untersuchungsschwerpunkten zusammengefasst.

Erzeugungspfade und -strukturen

Der beschleunigte Ausbau von regionalen Wind- und Photovoltaik-Erzeugungskapazitäten ist zentral für eine erfolgreiche Energiewende, wobei deren Flächenverfügbarkeit den Ausbau in der Region AachenPLUS limitiert. Folglich steht die Direktelektrifizierung in Konkurrenz zur stromintensiven Elektrolyse. Da der prognostizierte H_2-Bedarf der Region nicht vollständig durch eigene H_2-Erzeugung gedeckt werden kann, ist ein H_2-Import in die Region erforderlich. Eine Anbindung an das europäische H_2-Netz ist daher zu forcieren.

Transmission und Distribution

Kurz bis mittelfristig wird die H_2-Versorgung der Region AachenPLUS durch dezentrale Erzeugung und die Verteilung über Inselnetze und Trailer erfolgen. Langfristig wird die Anbindung der Region AachenPLUS an das europäische H_2-Netz unter anderem durch den H_2-Pipelineneubau vom Grenzübergangspunkt Eynatten nach Porz und durch die Umstellung eines Teilstrangs einer bereits vorhandenen Erdgasleitung zwischen Weisweiler und Düren sowie gegebenenfalls durch eine Umstellung einer Anbindungsleitung von Düren an das Netz der Nordrheinischen Erdgastransportleitungsgesellschaft (noch in Prüfung) sichergestellt. Dadurch wird langfristig die Verfügbarkeit von Wasserstoff in Teilen der Region gewährleistet. Zudem erreichen bereits heute verschiedene H_2-Transporttechnologien – wie Druckspeicher, Trailer oder Pipelines – Technologiereife. Ausgehend von dezentralen H_2-Elektrolyseanlagen und bi- und multilateralen Versorgungsoptionen sind für den weiteren H_2-Hochlauf die Errichtung von H_2-Distributionshubs unter Einbezug sämtlicher marktreifer Transportoptionen rechtzeitig zu planen und zu implementieren. Langfristig kann eine Preiskonkurrenz zwischen importiertem und lokal produziertem Wasserstoff entstehen. Passende Geschäftsmodelle gewährleisten eine Konkurrenzfähigkeit von H_2-Erzeugern auch nach dem Anschluss der Region AachenPLUS an den europäischen H_2-Backbone.

Nutzung in Mobilität und Verkehr

Vor allem im ÖPNV und im Schwerlastverkehr liegen hohe Potenziale für den Einsatz von H_2-Technologien vor. Auf Grund des Knotenpunktes der Hauptverkehrsadern (Autobahnen A4, A61 und A44) ist zudem mit hohem Durchgangsverkehr und daraus resultierenden H_2-Bedarfen zu rechnen. Bis zum Jahr 2025 existieren in der Region AachenPLUS bereits vier H_2-Tankstellen. Für die erwartete Intensivierung der H_2-Mobilität ist der weitere strategische Ausbau der Tankstelleninfrastruktur notwendig und ist entsprechend in Kapitel 5.1 hergeleitet und skizziert. Demnach ist im Jahr 2035 mit 13 H_2-Tankstellen ein H_2-Bedarf von 4.376 t / a für die Nutzung in Mobilität und Verkehr zu decken.

Nutzung in der Industrie

Insbesondere energieintensive Unternehmen sind zwecks Defossilisierung der Industrie zu fokussieren. Als regionale Schlüsselbranchen werden die Glas- und Papierindustrie sowie die Metallverarbeitung identifiziert. Für den Einsatz von Wasserstoff werden vor allem Hochtemperaturprozesse herangezogen. Da die Temperaturniveaus in der Papierindustrie unter 500 °C liegen, könnte hier Direktelektrifizierung zur Defossilisierung beitragen, doch ist bei aktuellem Stand unsicher, wie hoch der tatsächliche Elektrifizierungsgrad sein kann. Hierzu bedarf es einer individuellen Einzelfallprüfung. In der Glas- und Metallverarbeitung Temperaturbereiche weit über 1000 °C erforderlich sind und eine Direktelektrifizierung technisch oder wirtschaftlich nicht rentabel ist. Diese beiden Branchen sind prädestiniert für den H_2-Einsatz, wobei Saint-Gobain mit zwei Produktionsstandorten in der HyExperts Region AachenPLUS besonders hohe Energiebedarfe aufweist. Für das Stützjahr 2025 wird für die Bereitstellung von Prozesswärme der drei genannten Schlüsselbranchen zusammen ein zu substituierender Energiebedarf von 617 GWh / a prognostiziert. Dieser steigt bis zum Jahr 2030 auf 1.534 GWh / a. Für das Stützjahr 2035 werden 2.460 GWh / a errechnet. Des Weiteren wird herausgestellt, dass die Bereitstellung von Raumwärme via Wasserstoff lediglich unter Auftreten von Synergieeffekten eine sinnvolle Option darstellt, was auf individuellen Einzelfallentscheidungen beruht. Für den stofflichen Einsatz von Wasserstoff wird in der Region AachenPLUS ein vergleichsweise geringer Bedarf ermittelt. Unternehmen müssen für sich Energiebedarfsprognosen erstellen und im Einzelfall über die Energieträger entscheiden.

Nutzung im Gebäudesektor

Unter bestimmten Voraussetzungen kann Wasserstoff im Gebäudesektor geeignet sein, beispielsweise bei Quartierslösungen oder schwer zu dämmenden, denkmalgeschützten Gebäuden. Aus technischer Sicht ist die Verwendung möglich, jedoch stehen H_2-Heiztechnologien oft in Konkurrenz zu Technologien wie Wärmepumpen oder Fernwärme. Das derzeit noch in der Diskussion befindliche Heizungsgesetz wird einen bedeutenden Einfluss auf die Verwendung von H_2-Technologien im Gebäudebereich aufweisen. Bei der H_2-Nutzung im Gebäudebereich sind Einzelfallentscheidungen zu treffen, da eine flächendeckende Bereitstellung von Gebäudewärme durch Wasserstoff nicht zu erwarten ist. In der Umsetzung von Demonstrationsprojekten mit besonders guter Eignung für die H_2-Nutzung besteht eine sinnvolle Möglichkeit zur Erlangung erster Betriebserfahrungen.

Nutzung in Forschung, Entwicklung und Implementierung

Die Region AachenPLUS zeichnet sich insbesondere durch die hohe Dichte an Forschungs- und Entwicklungseinrichtungen aus, wie der RWTH Aachen, der FH Aachen, dem Forschungszentrum Jülich oder dem Helmholtz-Cluster. Beim Aufbau einer lokalen H_2-Wirtschaft sind Synergien zwischen den zahlreichen Forschungseinrichtungen und den umliegenden Technologieunternehmen verstärkt zu nutzen.

Well-to-Wheel-Analyse und TCO-Rechnung

Es stehen verschiedene Technologien zur Defossilisierung des Mobilitätssektors zur Verfügung. Im Fokus stehen batterieelektrische Fahrzeuge und Brennstoffzellenfahrzeuge. Die methodischen Vorgehensweisen der Well-to-Wheel Analyse und der TCO-Berechnung werden in Kapitel 6 angewandt. Zur Defossilisierung des Verkehrs werden sowohl batterieelektrische Fahrzeuge als auch Brennstoffzellenfahrzeuge eingesetzt werden. Die Kostenunterschiede zwischen Bussen beider Antriebstechnologien fallen gering aus. Die Auswahl, der am besten geeigneten Antriebstechnologie für die jeweilige Fahrzeugflotte, bleibt aber immer eine Einzelfallenscheidung des Flottenbetreibers und fußt auf individuellen Faktoren, wie Strombeschaffungsoptionen, der Nähe zur Betankungsinfrastruktur oder Anforderungen an Routen. Brennstoffzellenbetriebene Züge stellen die kostengünstigere Option zur Personenbeförderung dar und bieten insbesondere für nichtelektrifizierbare Bahnstrecken eine gute Defossilisierungsoption.

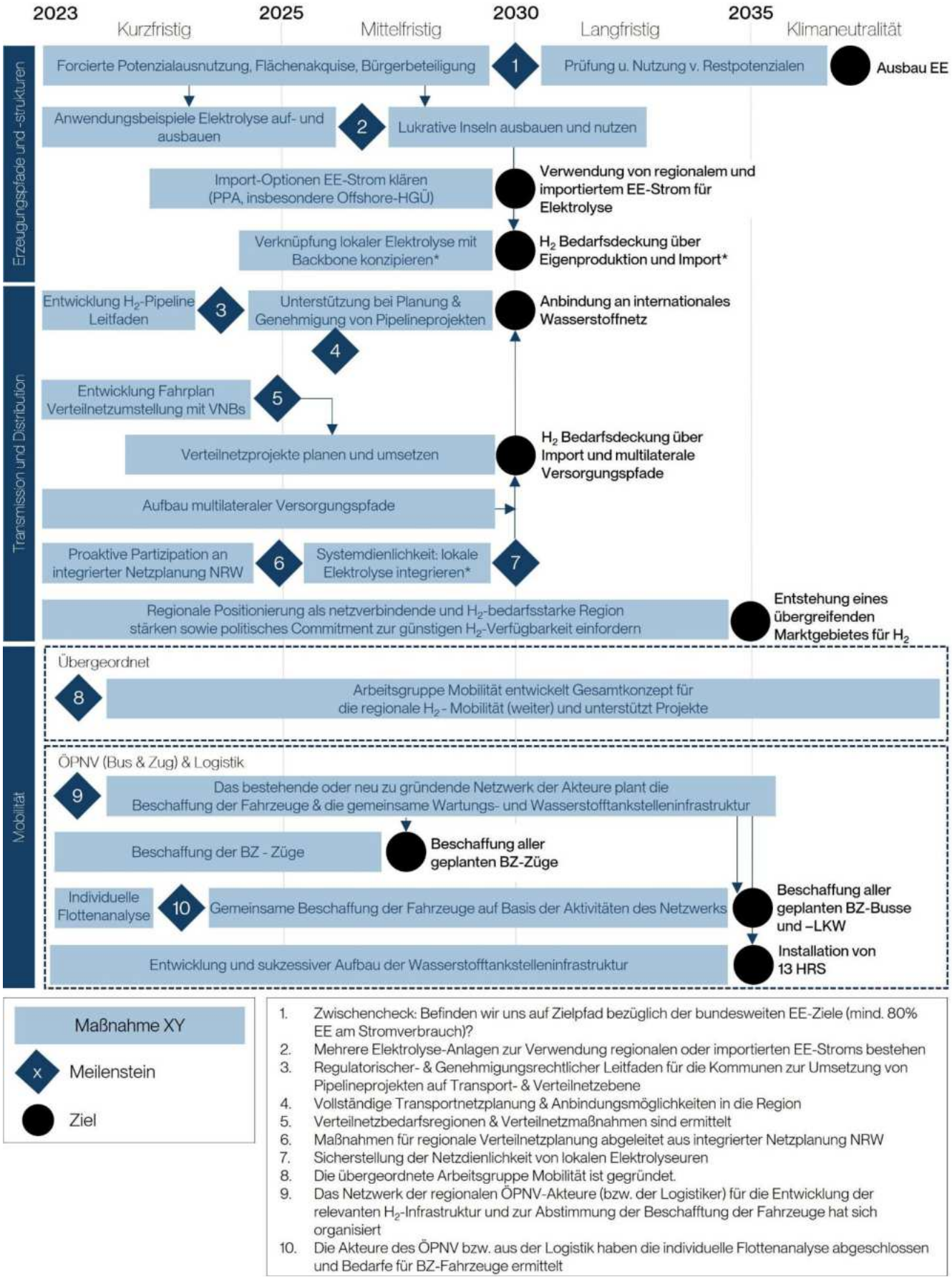
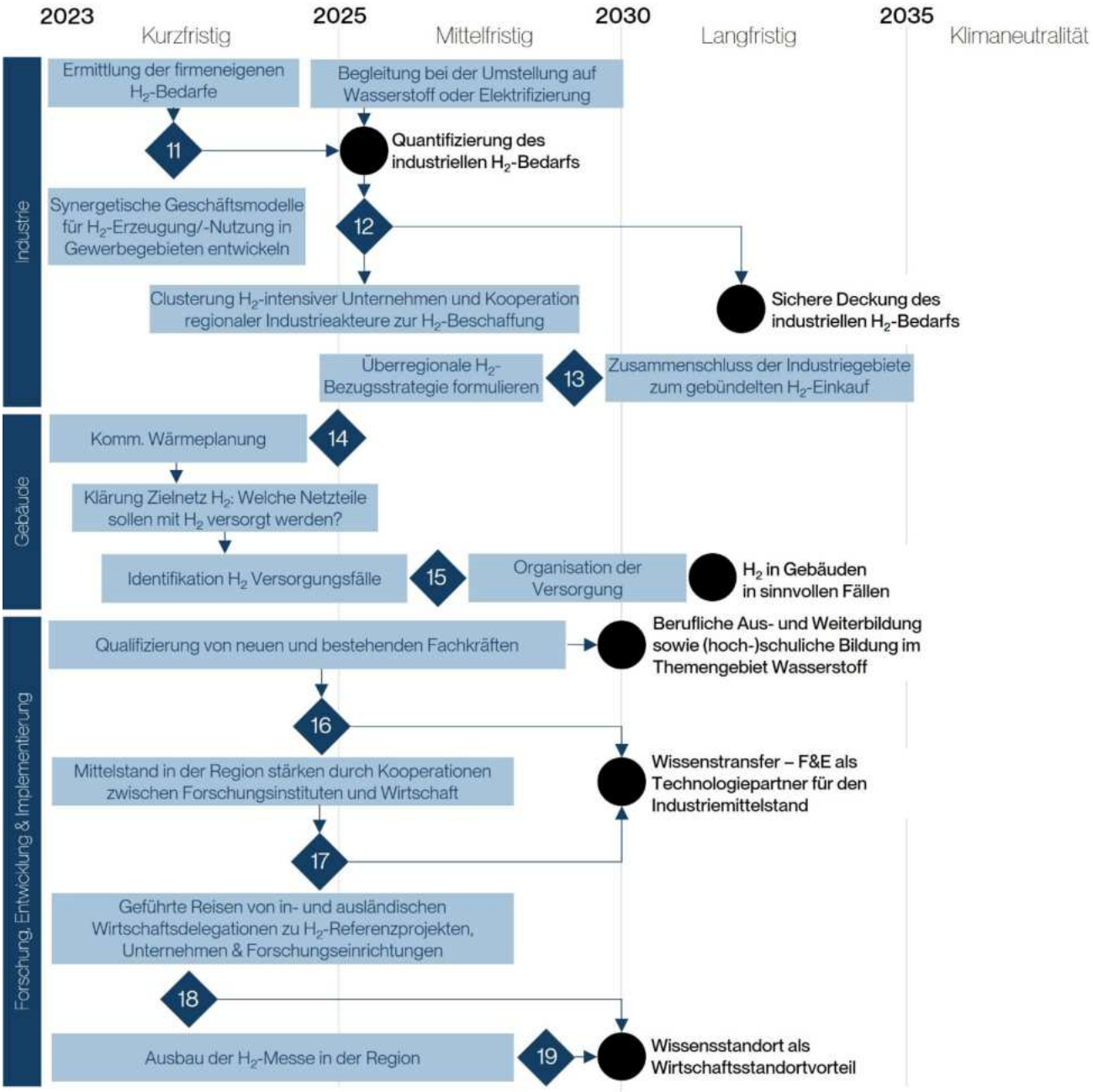


Abbildung 1: Gesamtroadmap Teil 1



Maßnahme XY

x Meilenstein

Ziel

11. Entscheidung über zukünftigen Energieträger & Energiebedarfsprognose
12. Gewerbe- & Industriegebiete, in denen die H_2-Versorgung gesichert ist, etwa über eigene Elektrolyseprojekte bzw. Gebiete oder langfristig aufgrund der Nähe zum H_2-Backbone, sind bekannt
13. Gemeinsame Bezugsstrategie zur überregionalen H_2-Beschaffung wurde entwickelt
14. Vorliegen der kommunalen Wärmeplanung in der Region AachenPLUS, idealerweise abgestimmt
15. H_2-Versorgungsfälle (vorläufig) identifiziert
16. Die ersten neuen Berufsbildungszentren und spez. Berufsschullehrgängen im Themengebiet Wasserstoff wurden initiiert
17. Mehrere neue anwendungsorientierte Umsetzungsprojekte unter Beteiligung von Forschung und regionalen Unternehmen gestartet
18. Erste inländische Wirtschaftsdelegation wurde durch die Region geführt und der Besuch einer Wirtschaftsdelegation aus der südkoreanischen Partnerstadt Ansan vorbereitet
19. Verdopplung der Ausstellerzahl auf auf mindestens 100

Abbildung 2: Gesamtroadmap Teil 2

2. Einleitung

Unsere Motivation

Der menschengemachte Klimawandel verdeutlicht die Notwendigkeit für einen disruptiven Strukturwandel in der globalen Energieversorgung. Zusätzlich verdeutlicht der Angriffskrieg Russlands die Notwendigkeit für eine rasche Abkehr von fossilen Energieträgern sowie die Bedeutung einer unabhängigen und klimaverträglichen Energieversorgung Europas. Die Region AachenPLUS ist besonders vom Kohleausstieg betroffen, was in der Aufgabe resultiert, dass die Energiewende klimafreundlich, nachhaltig und versorgungssicher gestaltet werden muss, wobei gleichzeitig die Wortschöpfung in der Region erhalten und gesteigert werden soll.

Im Zuge der langfristigen Energiewende setzt die Regierung der Bundesrepublik Deutschland auf Grünen Wasserstoff [1]. Als "Grün" bezeichnet man grundsätzlich den Wasserstoff, für dessen Produktion erneuerbarer Strom verwendet worden ist. In der EU werden darüber hinaus in den Renewable Energy Directives (RED II) und den dazugehörigen Delegated Acts (DAs) weitere Vorrausetzungen, wie beispielsweise die zeitliche und geographische Korrelation zwischen H_2-Produktion und erneuerbarer Stromproduktion, definiert [2]. Die ambitionierten Ziele der Europäischen Union zur Eindämmung der Klimaerwärmung und Erreichung der Klimaneutralität [2] stellen dabei Mitgliedsstaaten, Bundesländer und deren Kommunen vor eine enorme Herausforderung: Die versorgungssichere, wirtschaftliche und ökologische Transformation zu einer umweltfreundlichen Energieversorgung. Die Entwicklung einer holistischen H_2-Strategie bildet einen Baustein für den erfolgreichen Strukturwandel, wobei Grüner Wasserstoff eine zentrale Schlüsselfunktion als nachhaltiger Energieträger der Zukunft einnimmt.

Unsere Partner

Das Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) fördert im Rahmen des Programms „HyLand - Wasserstoffregionen in Deutschland" die Initiierung, Planung und Umsetzung von Konzepten mit H_2-Bezug. Der Wettbewerb beabsichtigt, Akteure in allen Regionen Deutschlands mit Konzepten zur Initiierung, Planung und Umsetzung zu motivieren [3]. HyExperts-Regionen sind demnach bereits mit dem H_2-Thema vertraut und verfügen über Akteure und Netzwerke, sodass Projektideen konkretisiert und so weit ausgebaut werden, dass eine praktische Umsetzung ermöglicht wird [4].

Die Region AachenPLUS ist eine der im HyLand-Programm geförderten Regionen. Als Regionenverbund setzt sich dieser zusammen aus der StädteRegion Aachen samt der Stadt Aachen, den Kreisen Düren, Euskirchen und Heinsberg sowie der Kolpingstadt Kerpen. Die Region beheimatet auf einer Gesamtfläche von 3.800 km^2 etwa 1,58 Mio. Menschen und zeichnet sich durch die besondere geografische Lage im Zentrum Europas am Dreiländereck zu Belgien und der Niederlande aus [4]. Neben einem wirtschaftsstarken und attraktiven Standort für die Industrie ist sie auch ein Ballungsraum für Institutionen aus Forschung und Wissenschaft. Zusätzlich ist die direkte Nähe zum geplanten

länderübergreifenden H_2-Pipelinenetz, dem sogenannten European Hydrogen Backbone, ein zukunftsweisender Standortvorteil.



Abbildung 3: Karte der HyExperts Region Aachen-PLUS

Um auf eine erfolgreiche Positionierung als H2-Modellregion hinzuarbeiten, den Markthochlauf von Wasserstoff voranzutreiben und eine breite Nutzung von H2-Technologien insbesondere in den Sektoren Mobilität und Transport, Industrie, Gebäude sowie Forschung, Entwicklung und Implementierung zu erwirken, wurde die gemeinsame Initiative „Hydrogen Hub Aachen" initiiert [5].

Unser Vorgehen

Die Region AachenPLUS verfolgt mit dieser Studie das Ziel, eine umfassende, regionale H_2-Strategie inklusive Roadmap zu entwickeln und damit den Grundstein für die Standorterhaltung und eine sichere sowie nachhaltige Zukunft zu legen. Dies erfordert, die Beschaffung und Erzeugung sowie die Verteilung und Nutzung von Energie auf Grünen Wasserstoff umzustellen und dabei Landkreise und Akteure aus den Sektoren Mobilität, Industrie, Gebäude und Forschung von Beginn an miteinzubeziehen.

In den nachfolgenden Kapiteln werden die Inhalte erarbeitet, welche im Anschluss als Grundlage zur Entwicklung der regionalen H_2-Strategie dienen. Dazu werden die Sektoren Erzeugungspfade und -strukturen, Transmission und Distribution, Mobilität und Verkehr, Industrie, Gebäude sowie Forschung, Entwicklung und Implementierung analysiert. Zur Konkretisierung werden zudem in Kapitel 6 eine Well-to-Wheel-Analyse sowie eine Total Cost of Ownership-Berechnung für verschiedene Mobilitätspfade und -szenarien durchgeführt. Auf dieser Methodik aufbauend erfolgt die Beschreibung der sektoralen Strategien und Roadmaps samt Formulierung der Vision. Des Weiteren wird zwecks zukünftiger Zusammenarbeit eine Wissensplattform inklusive Kompetenzatlas konzipiert. Die Beschreibung befindet sich im Anhang I.

3. Erzeugungspfade und -strukturen

Ausgangspunkt für die Analyse möglicher Erzeugung von Wasserstoff in der Region AachenPLUS aus regionalem regenerativ erzeugtem Strom ist das Potenzial der regional vorliegenden und nutzbaren erneuerbaren Energien (EE). Die Potenziale für EE werden aus Daten des Landesamts für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV) und des Szenariorahmens Strom abgeschätzt und ergeben für die Region AachenPLUS ca. 2,6 GW für Wind sowie 7,5 GW für Photovoltaik (PV) [6] [7] [8].

Hierbei sind Erhöhungen tendenziell möglich, da die Potenziale durch Nutzungsregelungen und EU-rechtliche Konventionen begrenzt sind (siehe Kapitel 3.2).

Hauptaussagen auf einen Blick

Der EE-Ausbau ist Kern der regionalen Energiewende
Die Region AachenPLUS bietet das Potenzial zum Ausbau der Erneuerbaren Energien im Bereich Wind und PV. Die in gängigen Studien ausgewiesenen Ausbaupfade können in der Region umgesetzt werden. Eine Beschleunigung des Ausbaus der EE ist dazu notwendig.

Nutzung von EE-Strom für Elektrolyse steht in Konkurrenz zur Direktnutzung
Auch bei Erreichung der Ausbaupfade wird EE-Strom ein knappes Gut bleiben: Bilanziell wird über das Jahr hinweg mehr Strom in der Region verbraucht als durch EE erzeugt wird. Die Anbindung von Offshore-Windparks über HGÜ-Leitungen in die Region verbessert diese Bilanz. Daher steht die Verwendung von Strom für Elektrolyse grundsätzlich in Konkurrenz zu direktelektrischen Anwendungen und bedarf besonders wettbewerbsfähiger Geschäftsmodelle.

Wasserstoff wird internationales Handels- und Transportgut
Auf übergreifender Ebene wird Wasserstoff zum Handels- und Transportgut. Die Anbindung an den internationalen Backbone scheint für Anfang der 2030er Jahre wahrscheinlich. Ab diesem Zeitpunkt wird die H_2-Versorgung auch über den Backbone erfolgen.

Der Aufbau von Elektrolysekapazitäten erfordert passende Geschäftsmodelle
Die signifikante Steigerung der EE-Erzeugung in der Region AachenPLUS stellt sich als no-regret Option heraus. Der zukünftige Bedarf an Wasserstoff muss aus einer Mischung von lukrativ lokal erzeugtem Wasserstoff und Importwasserstoff gedeckt werden.

Bedeutung für die Region AachenPLUS

Die EE-Erzeugungskapazitäten in der Region AachenPLUS müssen signifikant ausgebaut werden (no regret Option). Trotzdem wird die EE-Stromerzeugung nicht ausreichen, um auch den notwendigen H_2-Bedarf decken zu können. Der Import von Wasserstoff in die Region wird daher notwendig werden.

Um Ausbaupfade der EE abzuleiten, werden zunächst Möglichkeiten betrachtet, welche durch aktuelle bundesweite Systemstudien aufgezeigt werden (sogenannte „Big-Five-Studien") [9] [10] [11] [12] [13]. Diese sind durch den Szenariorahmen Strom gut repräsentiert. Eine Regionalisierung dieses Pfades auf die Region AachenPLUS wird durch eine Schlüsselbildung auf Basis der LANUV-Daten durchgeführt. Die resultierenden Ausbaupfade führen für Wind zu einem Zubau von ca. 1,5 GW und damit einer Ausschöpfung des zuvor ermittelten Potenzials von 2,6 GW. Bei PV wird das Potenzial durch den Zubau von 3,8 GW lediglich zu etwa der Hälfte ausgenutzt, sodass hier noch Steigerungsmöglichkeiten bestehen. Ob diese abgeschöpft werden, ist allerdings von diversen Randbedingungen abhängig, wie beispielsweise der Verfügbarkeit von Modulen oder Handwerksbetrieben. Aus den so ermittelten Ausbaukurven der EE werden Stromerzeugungsmengen abgeschätzt. Die Gegenüberstellung von Strommengen und die aus dem Szenariorahmen hergeleiteten Verbrauchsdaten der Region zeigen, dass auch in Zukunft der regionale Verbrauch nicht in Gänze aus regionalen EE-Quellen gedeckt werden wird. Vielmehr bleibt EE-Strom regional limitiert (siehe Kapitel 3.3).

Die Frage, ob Grüner Wasserstoff aus EE-Strom gewonnen werden kann, wird derzeit in verschiedenen Rechtsetzungsprozessen auf europäischer Ebene behandelt. Die EU-Kommission hat Ende Mai 2022 einen Entwurf für einen Delegierten Rechtsakt vorgelegt, der die EE-Richtlinie ergänzt und Kriterien für Grünen Wasserstoff enthält. Parallel verfolgt das Europäische Parlament den Ansatz, über eine umfassende Modernisierung der Renewable Energy Directive II (RED II) zu RED III Regelungen zur Definition des Grünen Wasserstoffs zu verankern. Noch ist nicht sicher, welcher der Ansätze sich durchsetzen wird, da derzeit (bis ca. Mitte 2023) eine Widerspruchsfrist für den verabschiedeten Delegierten Rechtsakt läuft. Als pragmatischer Ansatz wird daher angenommen, dass der Zubau der EE (also keine Bestandsanlagen) vertraglich gesichert wird und die EE-Produktion zeitgleich einer Elektrolyse zufließen kann. Dies trägt den Überlegungen beider Rechtsakte teilweise Rechnung.

Wie allerdings aus den vorherigen Überlegungen ersichtlich, steht der regional erzeugte EE-Strom vollständig in Nutzungskonkurrenz zwischen Elektrolyse und direktem Verbrauch. Die Frage der optimalen Dimensionierung der Elektrolyse in der Region weist folglich ein breites Spektrum von Möglichkeiten auf, abhängig vom jeweiligem Optimierungsziel. Wird der gesamte regional erzeugte EE-Strom[3] vollständig zur Elektrolyse genutzt, liegt die erforderliche Leistung des Elektrolyseurs bei etwa 7 GW. Werden andererseits übliche Vollbenutzungsstundenzahlen für den Elektrolyseur angestrebt (z. B. 4.000 h / a oder mehr, wie in der Nationalen H_2-Strategie [1] angesetzt sind), ist eine Elektrolyseleistung von ca. 2 GW ausreichend (siehe Kapitel 3.4). Ein Steigerungspotenzial für das Vorhandensein von EE-Strom in der Region bzw. nahe der Region ist durch Import über das Übertragungsnetz möglich. Hieraus folgt die systemische Frage nach Elektrolysestandorten in der Nähe der Erzeugungsanlagen des EE-Stroms zur Minimierung des Stromtransportes. Dies ist die Position des europäischen Gesetzge-

[3] Nach aktuellen EU-Vorgaben ist EE-Strom derjenige Strom

bers, der den Verbund von Erzeugung und Elektrolyse erleichtert.

Bezüglich geplanter Anschlussleitungen zur Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) der Offshore-Flächen in der Nordsee sind geplante Endpunkte in Rommerskirchen (außerhalb von AachenPLUS) sowie Oberzier zu verorten. Diese Leitungsprojekte werden nach heutigem Stand Anfang der 2030er Jahre jeweils ca. 5 TWh elektrische Energie bei einer Maximalleistung von 2 GW in die Region oder deren Nähe transportieren. Eine Verwendung nahe der HGÜ-Kopfstation ist denkbar (siehe Kapitel 4).

3.1. Daten zu EE-Potenzialen in der Region AachenPLUS

Ausgangspunkt der Analysen zur potenziellen H_2-Gewinnung und -Nutzung in AachenPLUS bildet die Betrachtung der möglichen Erzeugung von Strom aus Erneuerbarer Energie, da diese eine Voraussetzung für die lokale Erzeugung von Grünem Wasserstoff durch Elektrolyse darstellt. Die Potenziale der Energiequellen Wind und Sonne (PV) stellen eine Obergrenze möglicher EE-Stromerzeugung dar. Dabei ist die Bemessung des Potenzials von diversen Annahmen und Methoden abhängig. In unterschiedlichen Untersuchungen zu Potenzialen ergeben sich daher unterschiedliche Ergebnisse.

Zwei Quellen werden für diese Studie als Basis herangezogen und nachfolgend beschrieben. Das LANUV hat Potenzialstudien zu EE erarbeitet und veröffentlicht. Zu nennen sind insbesondere die Potenzialstudie Windenergie sowie die Potenzialstudie PV [6] [7]. Diese Quellen sind von hoher Relevanz, da die veröffentlichte Datengrundlage eine hohe regionale Auflösung aufweist und somit eine Aussage über die Region AachenPLUS bzw. eine Regionalisierung anderer Datenquellen auf AachenPLUS ermöglicht. Die zweite Datenquelle besteht aus Dokumenten zur Erstellung des Netzentwicklungsplans Strom (NEP), dem vorgelagert der Szenariorahmen (SzR) erarbeitet wird [8]. Der jüngste SzR wurde Anfang 2022 als Entwurf durch die Übertragungsnetzbetreiber vorgelegt. Dieser Entwurf enthält neben den bundesweiten Daten Potenzialaussagen über das Land NRW. Die Genehmigung des SzR durch die Bundesnetzagentur [14] erfolgte Mitte 2022 und ist damit eine verfügbare Quelle hoher Aktualität, was insbesondere für die Ausbaupfade relevant ist.

Im Folgenden werden die Potenziale der Windenergie in AachenPLUS beschrieben, die durch Aggregation bzw. Regionalisierung der Daten aus den genannten Quellen hergeleitet werden. Während aus den Potenzialstudien des LANUV ein Potenzial von 2,6 GW installierter Leistung ablesbar ist, ergibt die Auswertung der SzR-Daten eine Leistung von 3,2 GW. Aus dem Szenariorahmen wird als Obergrenze die fiktive Nutzung von 2 % der Landesfläche herangezogen.

Die Differenz der beiden Potenzialermittlungen wird mit 18 % des höheren Wertes beim Wind noch als gering eingestuft. Die Unterschiede sind durch die methodisch

verschiedenen Herleitungen[4] sowie der Regionalisierung der Daten aus dem Szenariorahmen gut begründbar. Zudem bestehen inhaltlich unter anderem Unterschiede in den zugrundeliegenden Parametrisierungen, zum Beispiel bezüglich der angesetzten Mindestabstände von Wohnbebauung (SzR 700 m im Innenbereich, 400 m im Außenbereich; LANUV 1000 m) oder der Verwendung einer Mindestflächengröße (SzR keine, LANUV 5 ha). Da die Annahmen des SzR zu einer Überschätzung der vorhandenen Potenziale unter heute absehbaren Gegebenheiten führen können, wird im Weiteren die konservative Potenzialabschätzung des LANUV verwendet.

Im Falle der Photovoltaik sind allerdings die auftretenden Differenzen zwischen SzR (7,5 GW) und LANUV (15,2 GW) weitaus deutlicher. Erklärbar ist dies ebenfalls durch differierende Methoden zwischen LANUV und SzR. So werden in der LANUV Studie Dachflächen aus repräsentativen Modellgebieten in NRW auf gesamt NRW hochskaliert, wohingegen im SzR eine Vollerhebung der Flächen durchgeführt wird. Weitere methodische Unterschiede liegen etwa in der Festlegung von minimalen Flächengrößen für Freiflächenanlagen oder der Berücksichtigung von Bodenqualitäten vor. Die unterschiedlichen Methoden und Parameter verursachen demnach einen signifikanten Unterschied zwischen den Ergebnissen. Für die weitere Verwendung im Rahmen dieser Untersuchung wird die Potenzialaussage des SzR für PV herangezogen.

Ausschlaggebend hierfür ist zum einen die Aktualität des SzR und zum anderen die differenziertere methodische Herangehensweise. Als drittes Argument kommt die Vorsicht hinzu, die Potenziale im Zweifel nicht zu überschätzen. Mit dieser Voranalyse ist der Rahmen möglicher Entwicklungen des EE-Ausbaus für die Region AachenPLUS eingegrenzt. Es bleibt zu bedenken, dass die Potenziale keine fixen Größen darstellen, sondern beispielsweise durch Senkung von Mindestabständen oder Freigabe weiterer Flächentypen erweitert werden können. Die LANUV-Daten werden weiterhin zur Schlüsselbildung im Rahmen der Regionalisierung der NRW-weiten SzR-Daten verwendet.

[4] Die Aggregation von Daten der LANUV Studie [8]

3.2. Daten zum EE-Ausbau in der Region AachenPLUS

Der EE-Ausbau bzw. Hochlauf unterscheidet sich vom EE-Potenzial aus Kapitel 3.1. Während das Potenzial bei gleichbleibenden Randbedingungen eine zeitliche Konstante darstellt, beschreibt der Ausbaupfad eine Zeitreihe, welche die wahrscheinliche Entwicklung der EE-Installationen bestmöglich abbildet. Um eine gute Anschlussfähigkeit an die energiepolitische Diskussion der jüngeren Vergangenheit im Zuge der Energiewende zu gewährleisten, werden fünf relevante Studien zur energiewirtschaftlichen Zukunft (Big-Five-Studien: dena „dena Leitstudie Abschlussbericht"; Agora „Klimaneutrales Deutschland 2045"; BDI „Klimapfade 2.0"; BMWK „Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland 3", sowie Ariadne „Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität") betrachtet [9] [10] [11] [12] [13]. Diesen werden die aktuellen Entwicklungen aus dem bereits beschriebenen Szenariorahmen und NEP-Prozess, also der Entwurf des SzR und die Genehmigung des SzR, gegenübergestellt. Die folgende Abbildung 4 zeigt den Vergleich des Windenergieausbaus an Land.

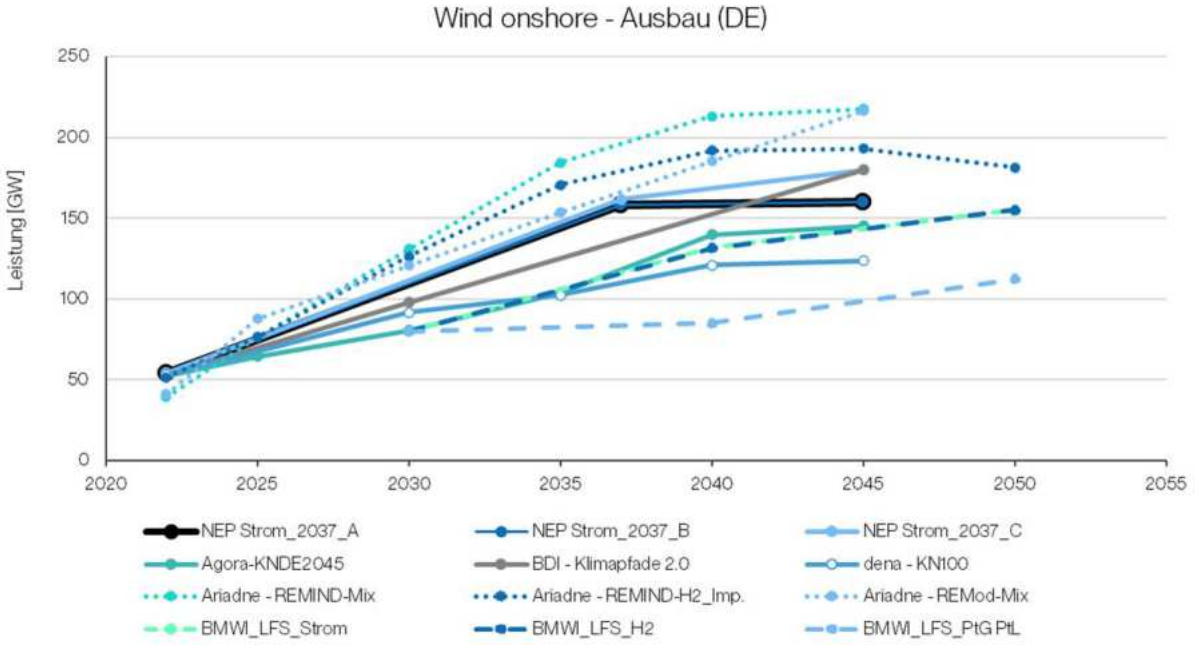


Abbildung 4: Vergleich zwischen Szenariorahmen und den „Big-Five-Studien": Onshoreausbau für Deutschland

Die gestrichelten Linien der Abbildung 4 stellen den Möglichkeitenraum, also die Bandbreite realistischer Szenarien, dar, der von den genannten Studien in Betracht gezogen wird. Die durchgezogenen Linien im Vordergrund des Diagramms repräsentieren die Annahmen des SzR[5]. Es ist zu beachten, dass hierbei zwei der drei Szenarien identische Verläufe aufweisen[6]. Die Bundesnetzagentur hat im Zuge der Genehmigung des SzR die Entwicklungspfade der EE nach oben korrigiert. Die durchgezogenen Graphen werden somit als aktuelle Darstellung der energiepolitischen Situation interpretiert. Zudem ist ersichtlich, dass die SzR-Graphen das Bündel der Studien im oberen Mittelfeld gut repräsentieren. Der „Knick" im Jahre 2037 ist dem Stützjahr des Szenarios geschuldet. Im weiteren Verlauf wird vor diesem Hintergrund das Szenario C des genehmigten SzR für den Ausbaupfad Wind Onshore verwendet[7]. Ein vergleichbares Bild zeigt Abbildung 5 bezogen auf Photovoltaik.

Anders als bei der Prognose des Ausbaus der Windenergie, gehen die SzR-Annahmen bezüglich des Ausbaus der PV in bestimmten Zeitpunkten über die Studienlage hinaus. Die Einschätzung zur Relevanz der politischen Bedeutung und die Tendenz zum notwendigen, raschen Ausbau der EE rechtfertigen die Annahme des Szenario C des SzR. Zudem führt diese Auswahl zu einem konsistenten Annahmen-Set bezüglich Stroms aus Wind und PV, da sich in diesem Fall alle Annahmen an derselben Quelle bzw. demselben

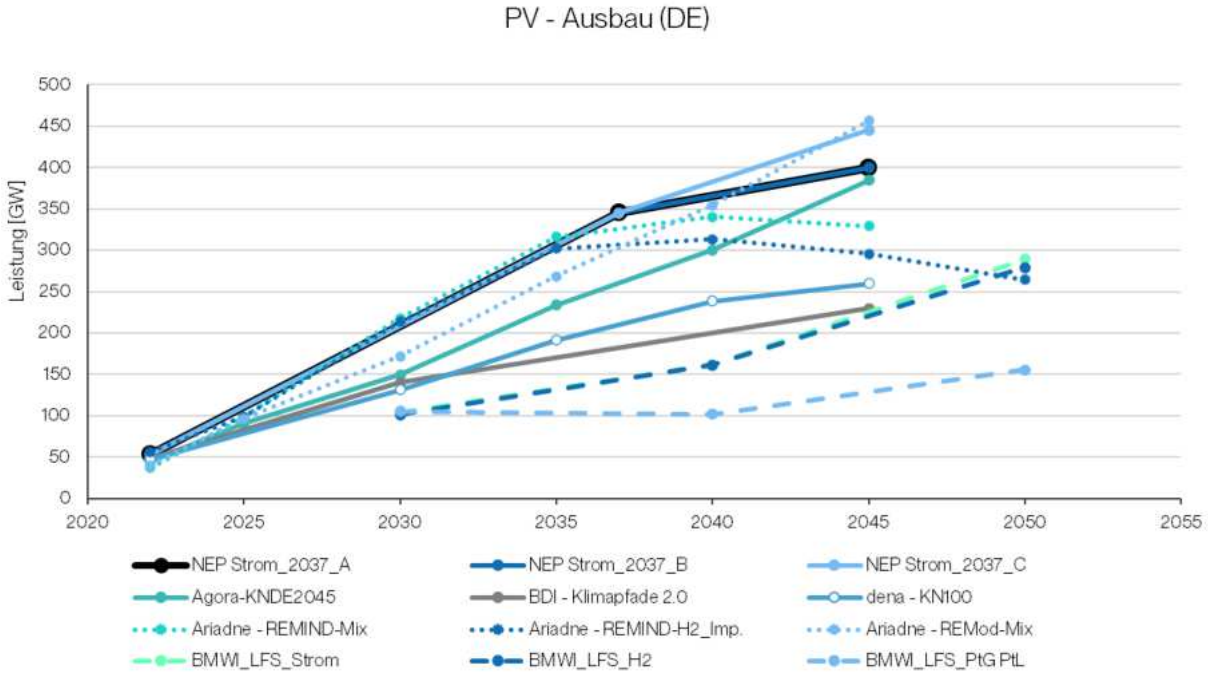


Abbildung 5: Vergleich zwischen Szenariorahmen und den „Big-Five-Studien": Photovoltaik

[5] Die zuvor dargestellten ÜNÜV Daten wurden zur Ableitung des Potenziale und zur Regionalisierung verwendet.

[6] Die Szenarien „NEP Strom 2037 A" und „NEP Strom 2037 B" verlaufen identisch.

[7] Die Ausbaupfade sind dabei nicht zu verwechseln mit den vorher beschriebenen Potenzialen. Beide Größen werden unabhängig von der Quelle auf die Region Aachen per US skaliert, also regionalisiert. Siehe das nachfolgende Kapitel.

Szenario orientieren. Gleichwohl ist festzuhalten, dass dies eine optimistische Annahme bezüglich der Zukunft der PV darstellt.

Um auf Basis der zuvor beschriebenen Sachverhalte und Annahmen eine fundierte Aussage über die Ausbaupfade in der Region AachenPLUS zu treffen, müssen die SzR-Annahmen zunächst skaliert werden. Die Annahmen des bestätigten SzR werden mit Hilfe des SzR-Entwurfes auf NRW projiziert. Diese aktualisierte Aussage wird als Basis verwendet, um unter Verwendung von regionalen Verteilungsschlüsseln aus den LANUV-Daten [6] [7] auf die EE-Ausbaupfade in AachenPLUS zu schließen. Im Weiteren ist die Übereinstimmung der Abschätzung des EE-Ausbaus mit den zuvor ermittelten Potenzialen relevant. Die nachstehende Abbildung 6 stellt die Potenziale und Ausbaupfade der Windenergie (Onshore) dar.

Der skalierte Ausbaupfad für die regionale Windenergie steigt im Betrachtungszeitraum auf bis zu 2,6 GW. Dies stimmt mit der vorherigen Aussage zum Potenzial der Region AachenPLUS überein. Es wird eine Potenzialausschöpfung bis zum Jahr 2045 angestrebt.

In diesem und dem folgenden Diagramm ist neben den Szenarien zu den Ausbaupfaden und den Potenzialen auch die sogenannte „Sterbelinie" ausgewiesen. Diese stellt den Anlagenbestand dar, der den Markt verlässt, beispielsweise, weil die Anlagen das Ende ihrer Lebensdauer erreichen. Im Einzelnen ist nicht bekannt, ob manche Anlagen trotz ihres Alterns nach ihrer Förderdauer entsprechend dem Erneuerbaren-Energien-Gesetz (EEG) noch betrieben werden. Daher wird die Förderdauer zur Ermittlung der Sterbelinie herangezogen. Die Sterbelinie ist relevant, da die Spanne zwischen der Sterbelinie und dem Ausbaupfad die Leistung des Neubau-Anlagenparks repräsentiert.

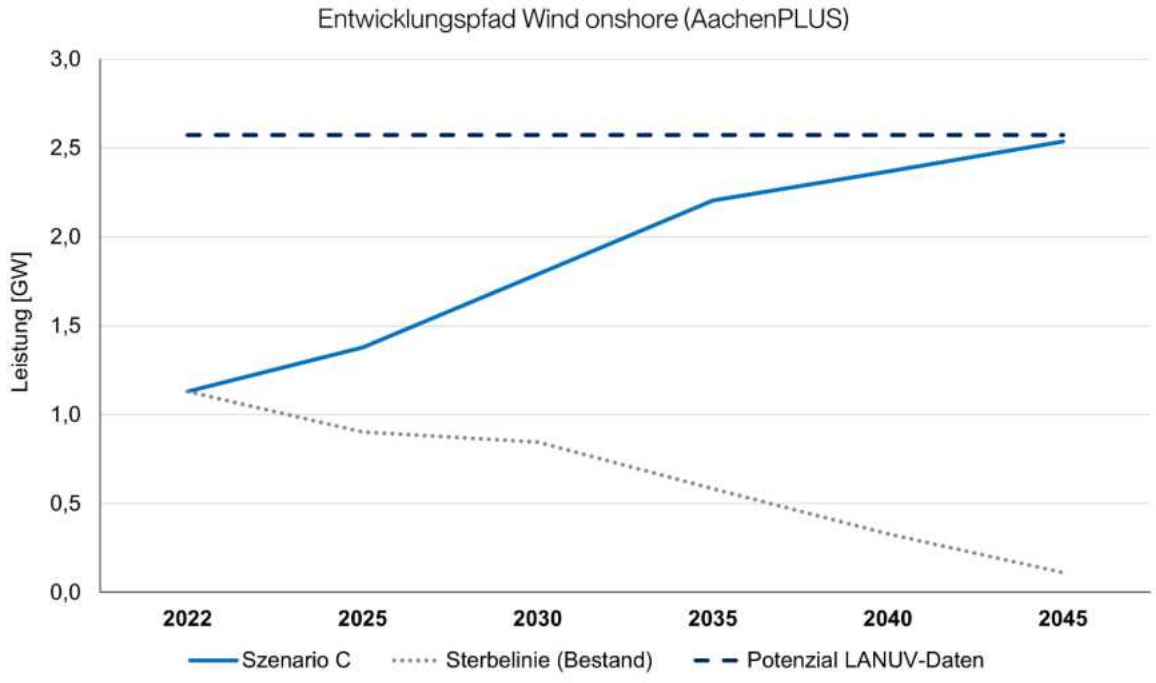


Abbildung 6: Potenzial vs. Ausbaupfad der Onshore-Windenergie in AachenPLUS

In Bezug auf PV wird ein anderer Verlauf prognostiziert (siehe Abbildung 7). Der als optimistisch eingestufte Ausbaupfad liegt im Jahr 2045 bei 4,4 GW, was das zuvor ausgewiesene Potenzial trotz der konservativen Annahmen nicht ausschöpft. Aus Sicht des Potenzials ist demzufolge ein stärkerer Ausbau der PV in der Region AachenPLUS möglich.

Hinweis: Die Grafiken sind unterschiedlich skaliert. Der Windausbau zeigt etwa halb so viel Leistung wie der PV-Ausbau.

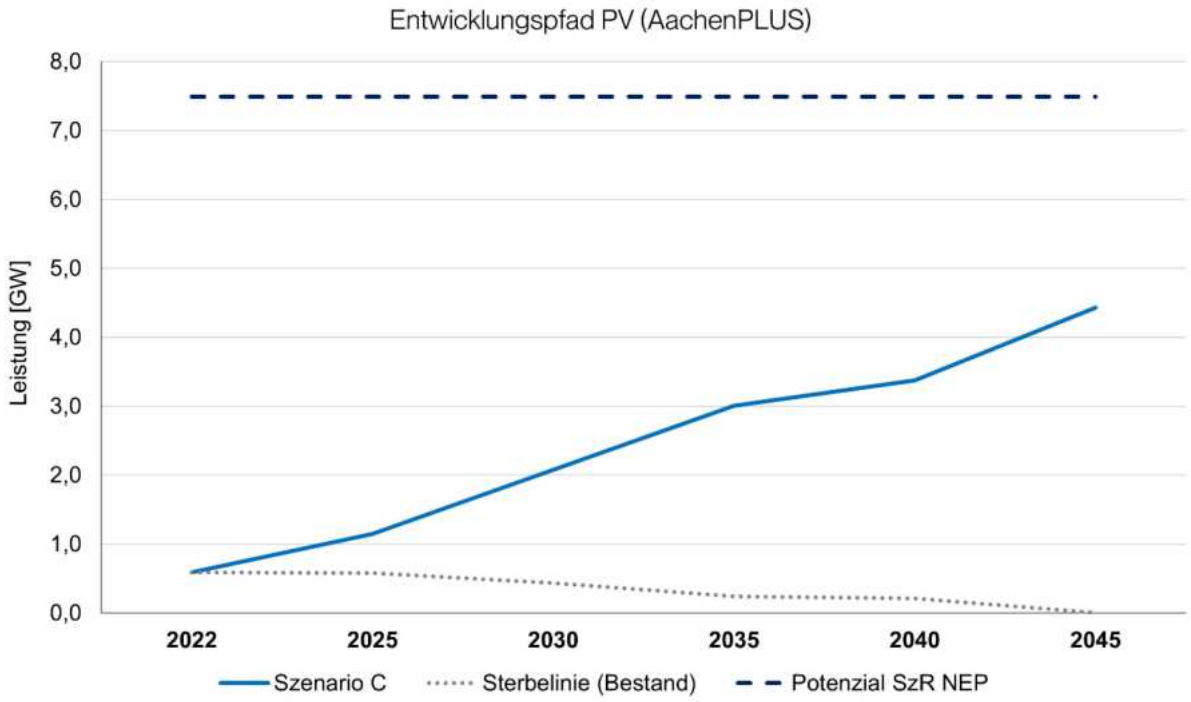


Abbildung 7: Potenzial vs. Ausbaupfad der PV in AachenPLUS

Ein weiteres Analyseergebnis ist beim Vergleich zwischen der Erzeugung aus EE und dem voraussichtlich auftretenden Stromverbrauch in der Region abzuleiten. Hierzu wurden die zuletzt diskutierten Ausbaupfade mit pauschalen Volllaststunden in Jahresarbeitserträge umgerechnet. Das heißt, es wurde aus der installierten Leistung in GW über die Charakteristik der Technologie die erzeugte Strommenge in GWh berechnet. Hierbei ist erkennbar, dass Windenergie zwar den kleineren Teil der installierten Leistung ausmacht, aber aufgrund der höheren Vollbenutzungsstunden den größeren Teil zur Arbeit beiträgt, wie in Abbildung 8 dargestellt.

Als Vergleichsgröße ist der prognostizierte Stromverbrauch der Region AachenPLUS visualisiert. Dieser wird aus den SzR-Daten über eine überschlägige Regionalisierung auf Basis der Bevölkerungszahlen und des verarbeitenden Gewerbes abgeschätzt. Die Basiszeitreihe des SzR enthält dabei den Gesamtstrombedarf, also nicht nur Zuwächse durch E-Mobilität, Wärmepumpen etc., sondern auch den Strombedarf der Elektrolyse. Dieser liegt bei über 11 % und ändert demnach die Gesamtaussage nicht. Diese Abschätzung macht deutlich, dass in der jeweiligen Jahresbilanz eines jeden Betrachtungsjahres die Region AachenPLUS absehbar keinen Überschuss an EE-Strom zu verzeichnen haben wird. Vielmehr besteht – regional betrachtet – ein Mangel an EE-Strom. Folglich konkurrieren alle elektrischen Anwendungen um dieses knappe Gut. Die gesamte EE-Stromerzeugung steht damit aus Systemsicht in einer Nutzungskonkurrenz zwischen Elektrolyse und diversen Arten von direktem elektrischem Verbrauch.

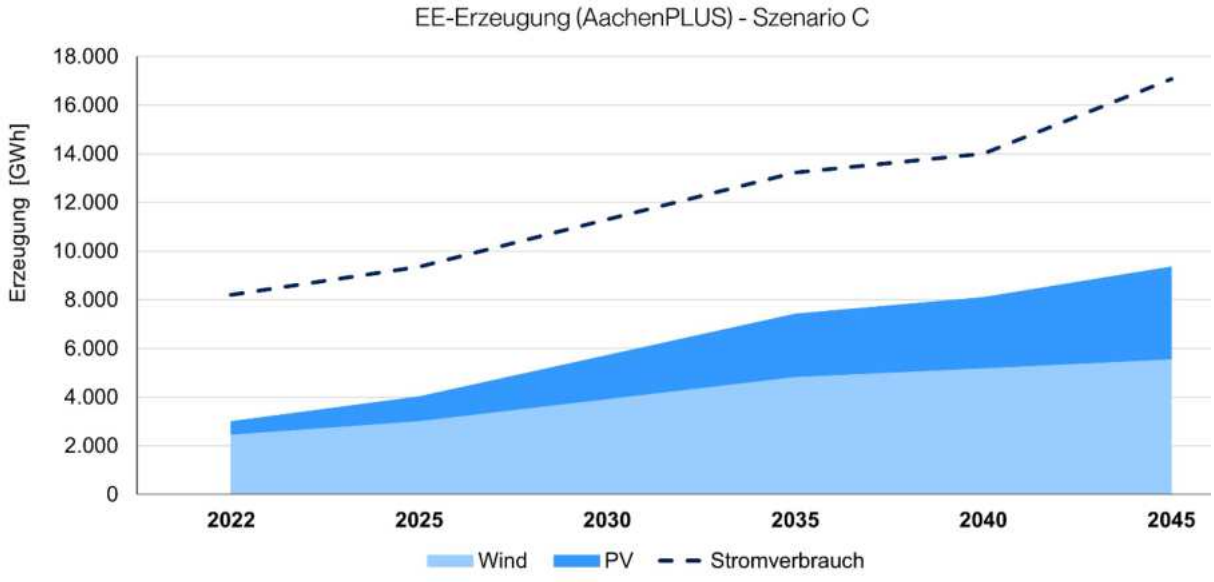


Abbildung 8: EE-Erzeugung vs. Stromverbrauch in AachenPLUS

3.3. Regionaler EE-Strom & Grüner Wasserstoff

Mit Blick auf die Erzeugung von Grünem Wasserstoff aus EE-Strom sind zwei aktuelle Legislativprozesse auf EU-Ebene zu betrachten. Einerseits hat die EU-Kommission Ende Mai 2022 den Entwurf eines „Delegated Act" (DA), übersetzt „Delegierter Rechtsakt", zur Festlegung von Regeln für die Produktion von erneuerbaren flüssigen und gasförmigen Kraftstoffen nicht biologischen Ursprungs veröffentlicht. Dieser ist inzwischen erlassen worden [15], damit aber noch nicht in Kraft getreten, da Parlament und Rat noch binnen vier Monaten ein Veto einlegen können. Der DA bezieht sich formal auf den Mobilitätsbereich. Allerdings wird eine Auswirkung auch auf andere Anwendungsfelder Grünen Wasserstoffs erwartet. Die Vorgaben, welche nach diesem Entwurf zu erfüllen sind, betreffen insbesondere die Fragen bereits erfolgter Förderung, der zeitlich und räumlich gekoppelten Erzeugung, des zeitlich gekoppelten Baus der Anlagen sowie der Power Purchase Agreements (PPAs[8]). Der DA ist insbesondere förderlich für EE-nahe Elektrolyse, wie beispielsweise in Norddeutschland.

Andererseits und parallel dazu sind Änderungen der RED II-Richtlinie durch das EU-Parlament in Arbeit. Hier werden geringere Schwellen als beim zuvor genannten DA vermutet: Insbesondere der Ausschluss bereits geförderter Anlagen (EEG) entfällt, sodass auch Strom aus bereits in Förderung befindlichen Anlagen zur Herstellung von Grünem Wasserstoff genutzt werden könnte. Durch den hohen Umfang einer Diskussion und Auswertung der aufgeführten Regelungen sowie durch die aktuelle Unsicherheit, welche Regularien sich – voraussichtlich um die Mitte des Jahres 2023 – durchsetzen werden oder ob sich eine Mischlösung etablieren wird, wird im Folgenden davon ausgegangen, dass der Zubau von EE in den Sparten Wind und PV über ein PPA gebunden und der Elektrolyse zugeführt werden kann. Dies gewährleistet die Erzeugung von Grünem Wasserstoff bei Zeitgleichheit von Nutzung und Erzeugung. Es kann also nicht der gesamte Anlagenbestand berücksichtigt werden, sondern nur der Zubau-Anteil.

3.3.1. Einschränkungen aus Sicht der Elektrolyse

Aus Sicht der Elektrolyse ergibt sich bedingt durch das Gebot der zeitgleichen Nutzung ein volatiles Dargebot an Energie. Im vorliegenden Fall wird von einem Ausbaupfad bis hin zu 4,43 GW_{PV} und 2,54 GW_{Wind} ausgegangen. Die Mischung dieses Portfolios determiniert die Nutzungsmöglichkeiten mit. Eine charakteristische Größe der beiden Einspeiseverhalten ist die Vollbenutzungsstundenzahl (Vbh). Für eine überschlägige Betrachtung wird diese mit 860 h / a für PV und 2.200 h / a für Windenergie veranschlagt. In der folgenden Abbildung 19 sind die Einspeisungen als geordnete Dauerlinien dargestellt. Dafür werden die Werte der einzelnen Stunden nach ihrer Leistung absteigend sortiert.

[8] PPA steht für „Power Purchase Agreement" und stellt einen [illegible] zwei Akteuren dar, meist einem EE-Stromproduzenten und einem Abnehmer.

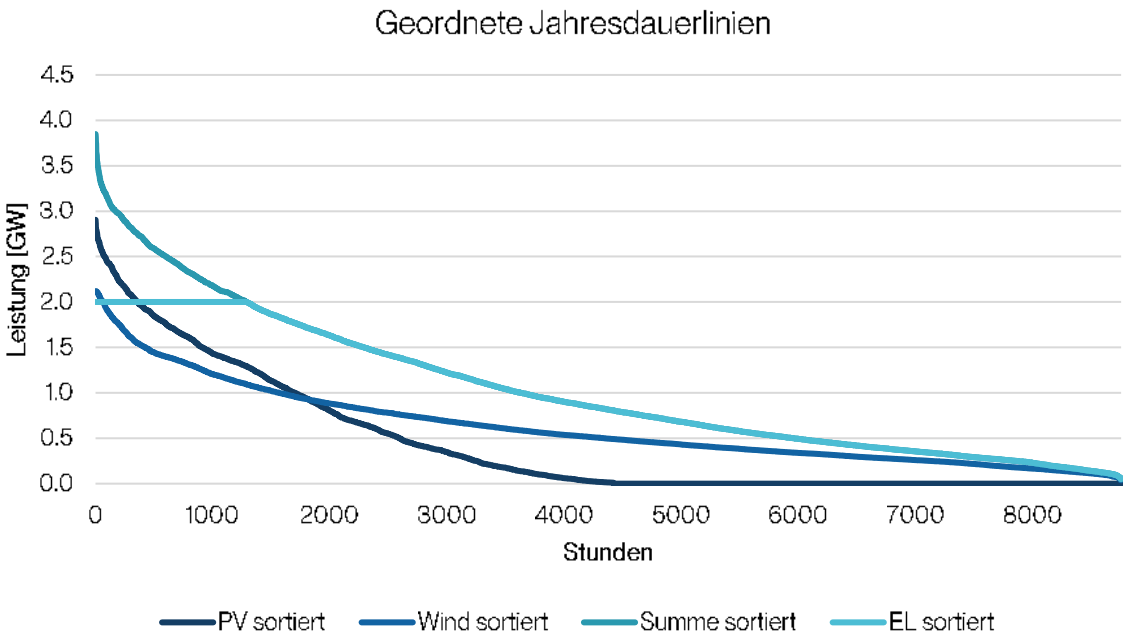


Abbildung 9: Auswahl der Leistung eines Elektrolyseurs

In den Jahresdauerlinien werden die verschiedenen Charakteristika der Einspeisungen und des Portfolios deutlich. Die PV-Linie mit der niedrigsten Vbh-Zahl von 860 h / a fällt steil ab und erreicht bei Stunde 4426, also etwa der Hälfte der Stunden des Jahres, die Nulllinie. Die Nachtstunden liegen rechts davon. Die Wind-Linie hat eine höhere Vbh-Zahl (2.200 h / a) und ist damit fülliger. Stunden, in denen gemittelt über ein größeres Gebiet kein Wind weht, sind selten. Eine Mischung ist die Linie aus der additiven Kombination der beiden Einspeisungen, die das Gesamtportfolio darstellt. Sie weist eine Vbh-Zahl von ca. 1.300 h / a auf[9].

Nach dem fachlichen Ansatz wird der verfügbare EE-Strom der Region AachenPLUS über PPAs gebunden und der Elektrolyse zugeführt. Welche Vbh-Zahl eine solche potenzielle Elektrolyse ermöglicht, hängt primär von ihrer Bemessungsleistung ab. Bei einer hohen Bemessungsleistung, also zum Beispiel die Summe der EE, ist es möglich, die vollständige EE-Erzeugung der Elektrolyse zuzuführen. Es gibt keinen Überschuss. Zugleich weist der Elektrolyseur eine niedrige Vbh-Zahl auf, sodass ein wirtschaftlicher Betrieb unwahrscheinlich ist. Wird die Elektrolyseleistung hingegen geringer bemessen, steigt die Vbh-Zahl. Es sind jedoch Überschüsse aus der EE-Erzeugung zu verzeichnen. Um zu den üblicherweise angesetzten Vbh-Zahlen jenseits der 4.000 h / a zu gelangen, wird die Leistung des Elektrolyseurs zum Beispiel mit 2 GW festgelegt. Daraus resultiert eine Vbh-Zahl von etwa 4.300 h/a. Die Leistung des Elektrolyseurs ist demnach abhängig vom Optimierungsziel. Daran gekoppelt ist die Menge des Grünen Wasserstoffs, der in der

[9] Diese Vbh-Zahl lässt sich nicht direkt aus der Graphik ablesen sondern ist ein Rechenergebnis, das die Fläche des Graphen beschreibt.

Region mit EE-Strom aus der Region erzeugt werden kann.

Zum Vergleich: Die nationale Wasserstoffstrategie sprach 2020 noch von 5 GW Elektrolyseleistung im Jahr 2030. Die bundesweite Planung laut „Eröffnungsbilanz" liegt bundesweit bei 10 GW Elektrolyse im Jahr 2030. Der genehmigte Szenariorahmen Strom spricht in seinem Szenario B von 26 GW im Jahr 2037. Im Endausbau (2045) sollen je nach Szenario 55 bis 80 GW errichtet worden sein. Zu bedenken ist allerdings, dass ein Investor primär nach einem lukrativen Business Case sucht und nicht die Menge des Wasserstoffs maximieren möchte.

3.3.2. Potenziale Grünen Wasserstoffs aus EE-Strom in der Region AachenPLUS

Als Zwischenfazit werden aus den bisherigen Analysen folgende Erkenntnisse festgehalten:

- Bezieht man die bundesweiten Pläne zum Ausbau der EE auf die Region Aachen PLUS ist festzustellen, dass die hiesigen Potenziale diesen Ausbau ermöglichen. Sogar ein „Mehr ausbauen" ist vom Potenzial her denkbar, stößt aber in der Umsetzung möglicherweise auf erhebliche Schwierigkeiten. Zu prüfen wären hierfür insbesondere Flächen (Dächer, Freiflächen) für PV sowie bisher nicht berücksichtigte Flächen für Windkraft.
- Es gibt bilanziell keinen EE-Strom-Überschuss in der Region.
- Die EU definiert „Grünen Wasserstoff". Allerdings ist noch nicht abschließend geklärt, wie dieser rechtlich definiert wird.
- Elektrolyse benötigt attraktive Vollbenutzungsstunden, damit ein Geschäftsmodell resultiert. Ein potenzieller Investor schaut vorrangig auf dieses Geschäftsmodell. Wenn ein H_2-Backbone-Anschluss in der Region existiert, konkurriert die Elektrolyse (indirekt) mit den Weltmarktpreisen.
- Die Rolle und Bemessung der Elektrolyse in der Region muss an diesen Eckpunkten ausgerichtet werden.

3.4. Importmöglichkeiten für EE-Strom

Als Importmöglichkeit für EE-Strom stehen unterschiedliche Pfade zur Verfügung. Zunächst kann EE-Strom über das Übertragungsnetz innerhalb Deutschlands und grundsätzlich auch aus dem Ausland in die Region transportiert werden. Eine vertragliche Bindung der Erzeuger über PPAs ist möglich. Bezüglich möglicher Netzengpässe ist festzuhalten, dass die Region AachenPLUS nördlich der üblicherweise diskutierten, strukturellen Engpässe liegt. Diese treten typischerweise etwa in Höhe der Mainlinie bei Nord-Süd-Transport auf. Die Region AachenPLUS liegt mithin tendenziell im Bereich des EE-Stromüberschusses. Zudem ist durch die Standorte der Braunkohlekraftwerke innerhalb und nahe der Region eine gute Anbindung an das europäische Verbundsystem anzunehmen. Sofern der EE-Strom, welcher zur Elektrolyse verwendet werden soll, nicht oder nicht ausschließlich aus der Region stammt, ist ein Import über das Übertragungsnetz prinzipiell denkbar. Gleichwohl wirft dies die Frage auf, ob in der systemischen Betrachtung eine Elektrolyse nahe der EE-Erzeugung zu bevorzugen ist, da dies zu geringeren Belastungen im Stromnetz führt. Eine weitere Option besteht in der Verwendung von Offshore-Windenergie, die über direkte Anbindungsleitungen in oder zumindest in die Nähe der Region AachenPLUS geleitet wird. Die folgende Karte gibt einen Überblick über den Planungsstand. Der aktuelle Netzentwicklungsplan Strom (NEP 2035, Bestätigung aus Januar 2022) weist die Vorhaben "Nor x 2" und "Nor-x-4" als „erforderlich" aus [8]. Beide werden die küstenferne „Offshore-Zone 4" anbinden.

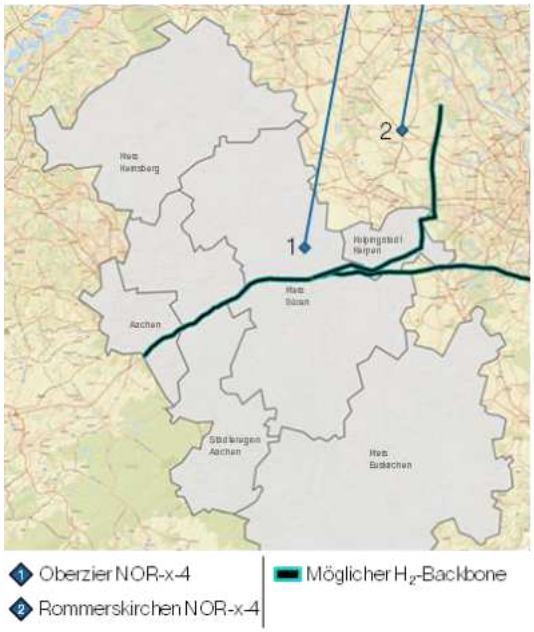


Abbildung 10: Anschlusspunkte der Offshore-Anbindung gemäß NEP Strom (ungefähre Lage)

Die heute avisierten Endpunkte der HGÜ-Leitungen sind Oberzier und Rommerskirchen. Oberzier liegt in der Region AachenPLUS, und Rommerskirchen befindet sich in direkter Umgebung. Die Leistung der Anbindungen liegt jeweils bei 2 GW. Bei einer angenommenen Volllaststundenzahl von 3.700 h / a (nach SzR) ergibt dies einen Import von je 5,4 TWh / a. Die Fertigstellung ist für den Zeitraum ab 2036 bzw. 2038 geplant. Die Nähe zu einem potenziell entstehenden H_2-Backbone kann eine Elektrolyse begünstigen. Auch wenn die Fertigstellungsdaten dieser Projekte außerhalb des Betrachtungsfokus dieser Studie liegen, werden die Importe von erheblichen Mengen der EE-Produktion aus der Nordsee als Steigerungspotenzial für die Region angesehen. Für eine tatsächliche Nutzung in der Elektrolyse ist eine vertragliche Bindung mittels PPA aus heutiger Einschätzung heraus eine Voraussetzung.

4. Transmission und Distribution

Für den Hochlauf der H_2-Wirtschaft sind regionale Transportmöglichkeiten zur Sicherstellung einer ausreichenden Verfügbarkeit von Wasserstoff von entscheidender Bedeutung. Das Kapitel adressiert die Importmöglichkeiten von Wasserstoff via Pipeline durch Anbindung an den Hydrogen-Backbone sowie die Transport- und Verteilmöglichkeiten innerhalb der Region. Im Zuge dessen sind verschiedene Speicher- und Distributionsmöglichkeiten zur Versorgung der Sektoren Industrie und Mobilität zu betrachten. Dabei ist neben bestehenden Infrastrukturen, wie etwa dem H_2-Transport via Trailer, zukünftig von einer größeren Bandbreite an Transportoptionen auszugehen. Basierend auf einer Darstellung möglicher Speicher- und Transporttechnologien für Wasserstoff und der Analyse der existierenden und geplanten H_2-Infrastruktur in der Region, werden verschiedene regionale Distributionskonzepte entwickelt. Dabei werden die techno-ökonomischen Rahmenbedingungen analysiert und hinsichtlich ihrer Eignung zur mittel- und langfristigen H_2-Versorgung untersucht.

Hauptaussagen auf einen Blick

Viele H_2-Technologien befinden sich im Übergang zur Technologiereife
Die Technologiereife vieler H_2-Technologien wie Druckspeicher, Trailer oder Pipeline ist bereits erreicht oder befindet sich im Übergang. Dadurch erhöht sich mittelfristig der Optionenraum für Distributionspfade in der Region.

Anbindung an das überregionale H_2-Netz verändert die Rahmenbedingungen
Die gemeldeten Infrastrukturprojekte in der Region sehen einen pipelinegebundenen Anschluss der Region bis 2030 vor. Der Zugang zu importiertem Wasserstoff wirkt sich auf die regionalen Wertschöpfungsketten aus. So wird langfristig eine Preiskonkurrenz für lokal erzeugten Wasserstoff entstehen. Mittelfristig wird dies Investitionsentscheidungen der regionalen H_2-Erzeugung beeinflussen.

Kosten der Versorgung betragen im Schnitt 27 % der Gesamtkosten
Der Einfluss des Versorgungspfades auf die Kosten der gesamten Wertschöpfungskette ist signifikant. Der Versorgungskostenanteil der langfristigen Importszenarien ist dabei im Schnitt größer als bei den mittelfristigen Versorgungskonzepten. Grund dafür sind unter anderem die geringeren H_2-Importkosten.

Aufbau von Distributionshubs zur Versorgung der regionalen Industrie
Entlang der entstehenden Pipelineinfrastruktur ist es notwendig, den Wasserstoff an die Tankstellen und die Industrie zu verteilen. Der Ausbau des Verteilnetzes für die Nutzung von H_2, insbesondere im Mittelstand, spielt eine besondere Rolle. Im Zuge des Hochlaufs ist der Betrieb von H_2-Distributionshubs an Verdichterstationen der Transportpipelines eine Möglichkeit zur flächendeckenden H_2-Versorgung.

Bedeutung für die Region AachenPLUS

Die Anbindung an das H_2-Transportnetz wird die Verfügbarkeit von H_2 in der Region erhöhen. Für die Verteilung in der Region ist der Aufbau von Verteilinfrastrukturen entlang der möglichen Ausspeisemöglichkeiten im Transportnetz erforderlich.

4.1. Technologiesteckbriefe der Transport- und Speicherinfrastruktur

Zur Bestimmung der geeigneten Technologien der Transport- und Verteilinfrastrukturen wurden relevante Technologien hinsichtlich ihrer Spezifikationen und technischen Reife analysiert und in Steckbriefen dokumentiert. Zur Bestimmung der technischen Reife wird das Technology Readiness Level (TRL, Technologiereifegrad) verwendet [16]. Die Einteilung in die TRL 1 bis 9 bietet die Möglichkeit der Einordnung von Technologien gemäß ihrem Entwicklungsstand von wissenschaftlicher Grundlagenforschung (TRL 1) bis hin zum kommerziellen Betrieb (TRL 9). Neben den technischen Details sind den Steckbriefen Informationen zu relevanten regionalen wie überregionalen Herstellern sowie Herausforderungen zur Erreichung der Technologiereife beigefügt. Abbildung 11 zeigt einen exemplarischen Steckbrief für H_2-Druckspeicher vom Typ II-IV (je TRL 9) [17]. Die Bestandsaufnahme der H_2-Technolgien dient als Grundlage für die Auswahl von Distributionskonzepten für die Region AachenPLUS. Zur Bewertung der Eignung der Speicher- und Infrastrukturtechnologien für die Region sind neben den spezifischen regionalen Rahmenbedingungen vor allem die Faktoren Kosten und technische Reife zu berücksichtigen. Die Einordung der verschiedenen Technologien in Abbildung 12 zeigt die große Bandbreite der Kosten und des Technologiereifegrades, in der sich die verschiedenen Technologien bewegen.

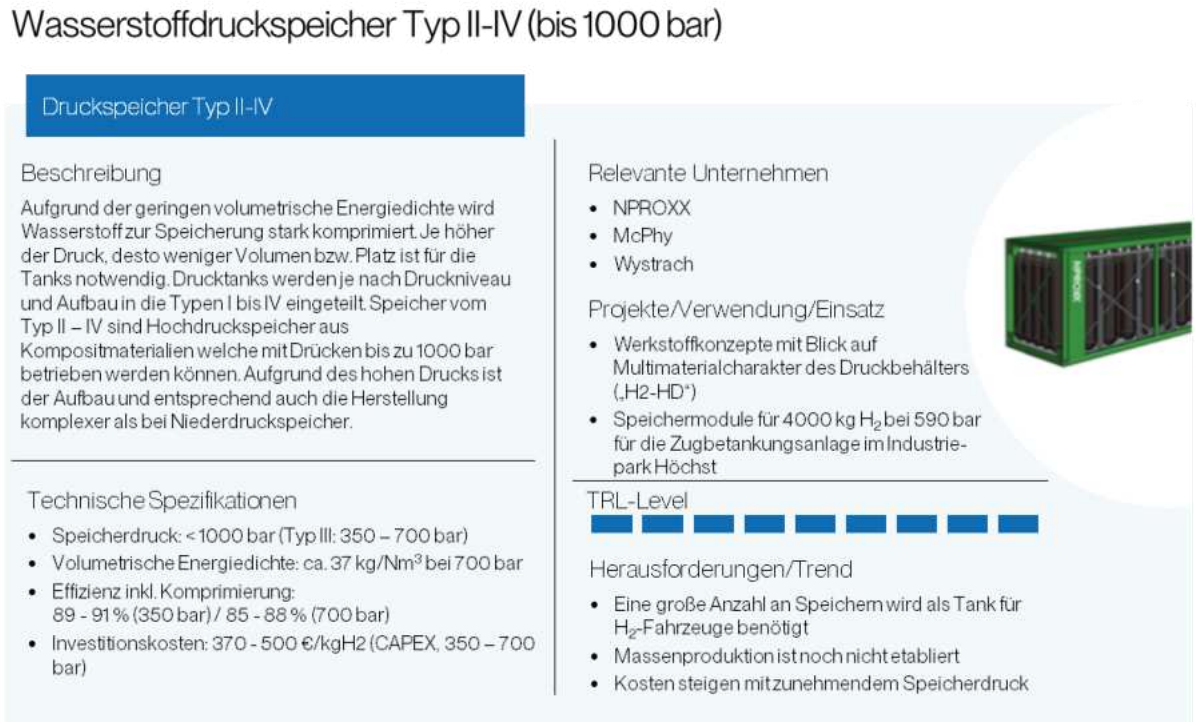


Abbildung 11: Technologiesteckbrief am Beispiel H_2-Druckspeicher

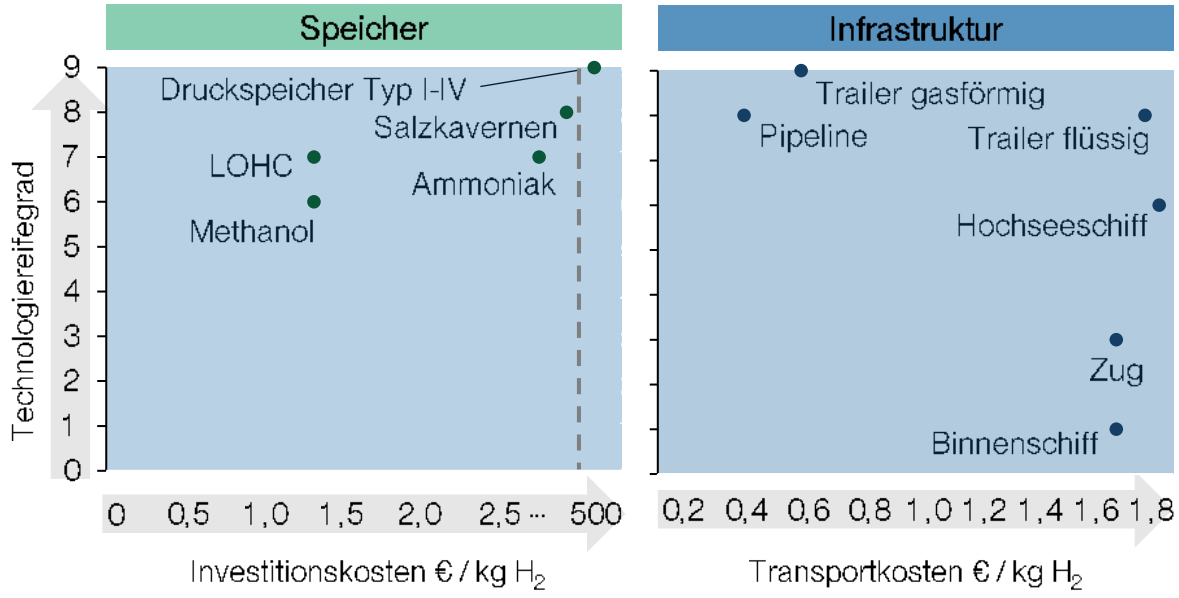


Abbildung 12: Vergleich von Kosten und technischer Reife von Speicher- und Infrastrukturtechnologien nach [18]–[25]

Die energieintensive Herstellung von Wasserstoffderivaten wie Ammoniak (NH_3) oder Methanol (CH_3OH) oder auch die Speicherung des Wasserstoffs in so genannten Liquid Organic Hydrogen Carrier (LOHC) dient primär der Verbesserung der Transportfähigkeit des Wasserstoffs beispielweise für Hochseeschiffe als auch der direkten Nutzung der Derivate. Großskalige Anlagen zum Beispiel zum Cracken von Ammoniak oder zur Umwandlung von LOHC werden in erster Linie an zentralen Importpunkten entstehen. Im Rahmen der Betrachtungen der lokalen Speicher- und Distributionsoptionen liegt daher der Fokus auf den herkömmlichen Druckspeicherformen. Die in Abbildung 12 dargestellten Investitionskosten der Speichertechnologien zeigen einen deutlichen Kostensprung zwischen Druckspeichern vom Typ I-IV und der Speicherung von Wasserstoff in Derivaten. Der Grund hierfür ist in erster Linie die Menge an Wasserstoff, welche sich in den jeweiligen Speichertypen speichern lässt. So ist die verfügbare Speicherkapazität für LOHC, Methanol, Ammoniak oder auch in Salzkavernen deutlich größer als bei der Speicherung von gasförmigem Wasserstoff im Druckspeichertank. Im Bereich des Transportes von Wasserstoff ist der Transport von gasförmigem Wasserstoff via Trailer am weitesten verbreitet. Der Transport von flüssigem Wasserstoff via Trailer wird aufgrund seiner hohen Energiedichte ebenfalls in Betracht gezogen. Da die Verflüssigung von Wasserstoff jedoch kostenintensiv und energieaufwändig ist, kommt der Transport von flüssigem Wasserstoff insbesondere bei einer anschließenden Nutzung des Wasserstoffs in flüssiger Form in Frage. Eine Besonderheit stellt der Transport von Wasserstoff via Binnenschiffe dar. Dieser wird aufgrund der geografischen Nähe der Region zum Rhein – und damit der Verbindung zu dem künftigen Importknotenpunkt Rotterdam – im Zuge der Distributionskonzepte in Kapitel 4.5 analysiert. Insbesondere dem Transport von Wasserstoff via Pipelines wird künftig eine große Bedeutung zukommen, da auf diese Weise große Mengen Wasserstoff zu niedrigen Kosten transportiert werden können (vergleiche Kapitel 4.2).

4.2. Wasserstoff aus dem H_2-Backbone: Zukunftsvisionen

Die Rolle der Gasnetze in der Energiewende ist derzeit Gegenstand kontroverser Diskussionen. Auf Verteilnetzebene ist insbesondere strittig, auf welche Weise die Raumwärme beim Endkunden bereitgestellt werden soll. In allen Defossilisierungsszenarien kann dies mittel- und langfristig nicht mit fossilem Erdgas erfolgen. Fraglich ist, zu welchen Anteilen die entstehende Energielücke durch Elektrifizierung (elektrische Wärmepumpen), Verdichtung und Erweiterung von Grüner Fern- und Nahwärme, synthetisches Methan, Biogas oder durch Grünen Wasserstoff geschlossen werden kann. Die Antwort auf diese richtungsweisende Frage fällt regional und lokal verschieden aus.

Auf der Ebene der Transportnetze ist die Tendenz klarer. Wasserstoff wird im defossilisierten Energiesystem als Energieträger und -speichermedium benötigt und muss weiträumig transportiert werden, da er nicht in ausreichendem Maße am Ort des Endverbrauchs erzeugt werden kann. Der Transport zu den Verbrauchsschwerpunkten kann von Anlandungspunkten an der Küste oder von Großelektrolyseuren – tendenziell im Norden Deutschlands – erfolgen. Als zukünftige H_2-Verbraucher werden unter anderem Kraftwerke und energieintensive Industriezweige genannt. Es wird demnach mit hoher Wahrscheinlichkeit einen Aufbau eines H_2-Backbones insbesondere durch Umwidmung redundanter Erdgaspipelines und Neubau einzelner Leitungen geben.

Sowohl im Inland als auch bei den europäischen Nachbarn ist die Notwendigkeit von Wasserstoff im Energiesystem sowie als transportierbarer Energieträger erkannt. Gleichwohl sind die Pläne für den Ausbau des H_2-Backbones aktuell noch unkonkret, da auf Absatz- wie auf Aufkommensseite noch große Unsicherheiten bestehen.

Aktivitäten und Statements aus Benelux

Vorhaben der Gasunie

Der niederländische Ferngas-leitungsnetzbetreiber Gasunie plant den Aufbau eines H_2-Netzes in den Niederlanden mit vier Netzkopplungspunkten nach Deutschland. Die folgende Abbildung 13 zeigt den geplanten Ausbaustand im Jahr 2030. Eine direkte Betroffenheit der Region AachenPLUS ist nicht gegeben, allerdings soll der unweit von Aachen (Nähe Sittard-Geleen) gelegene Chemiepark „Chemelot" angebunden werden. Eine Ausweitung bis AachenPLUS gilt als vorstellbar.

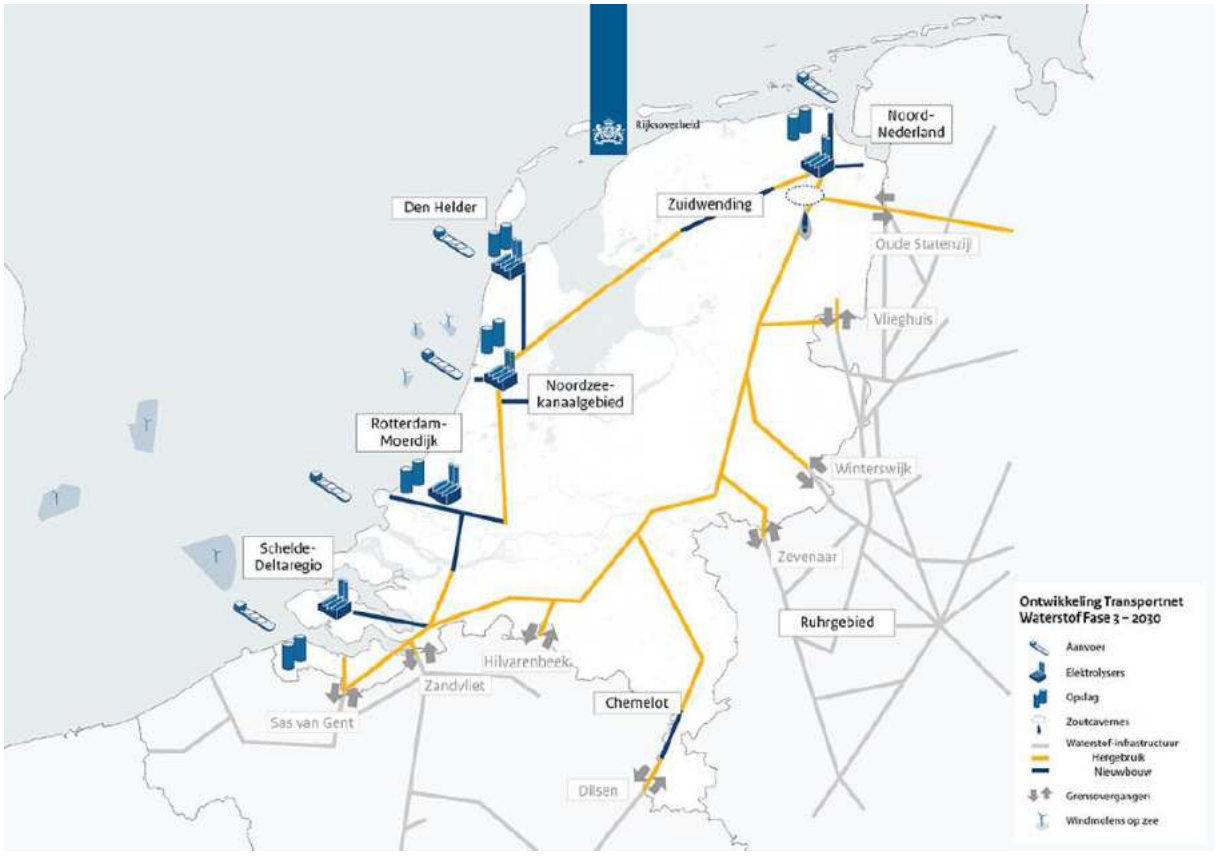


Abbildung 13: H_2-Netze Gasunie in 2030 [19]

Delta Rhine Corridor

Initiiert vom Port of Rotterdam wird das Projekt „Delta Rhine Corridor“ vorangetrieben [26]. Dieses Vorhaben hat zum Ziel, den Hafen von Rotterdam mit dem Chemiestandort Chemelot und dem Rheinland zu verbinden (siehe Abbildung 14). Das Zieljahr ist 2030. Aus diesem Projekt lässt sich ebenfalls keine direkte Implikation für AachenPLUS ableiten. Die Aktivitäten werden jedoch als weitere Chance angesehen, die Region mit einem (internationalen) H_2-Backbone und mögliche Stichleitungen zu verbinden.



Abbildung 14: Netzausbauvisionen des Port of Rotterdam: Der „Delta-Corridor“ [20]

4.3. Status quo: H_2-Pipelineinfrastruktur in der Region AachenPLUS

Bei der Auswahl geeigneter Distributionsoptionen zur Versorgung der Region mit Wasserstoff sind die lokalen Gegebenheiten, wie etwa die Verfügbarkeit umrüstbarer Erdgaspipelines, geplante H_2-Pipelineprojekte auf Transport- und Verteilnetzebene oder die Nähe zu Wasserstraßen zu berücksichtigen. Dabei sind mögliche Verknüpfungen zu überregionalen H_2-Infrastrukturen im Hochlauf essenziell. Weiterhin sind lokale H_2-Quellen und Bedarfszentren sowie bestehende und in Planung befindliche Projekte im Bereich der Mobilität mit einzubeziehen. Der Status quo der für Wasserstoff potenziell nutzbaren Infrastruktur ist in nachfolgender Abbildung dargestellt und wird im Folgenden erläutert. Des Weiteren sind die in diesem Kapitel vorgestellten Planungen zu möglichen neu zu errichtenden H_2-Pipelines im Folgenden mit aufgenommen.

Die Region AachenPLUS verfügt über eine umfassende Anbindung an das Erdgastransportnetz. Nördlich und südlich der Stadt Aachen befinden sich mit den Grenzübergangspunkten Bocholtz und Eynatten zwei zentrale Importknotenpunkte für Erdgas aus den Niederlanden bzw. aus Belgien zur Einspeisung in das deutsche Transportnetz. Eynatten und Bocholtz sind die Ausgangspunkte für vier Erdgastransportpipelines mit Nenndurchmessern (DN) von 800 mm – 1.000 mm, welche die Region in nördlicher, südlicher und östlicher Richtung durchlaufen.

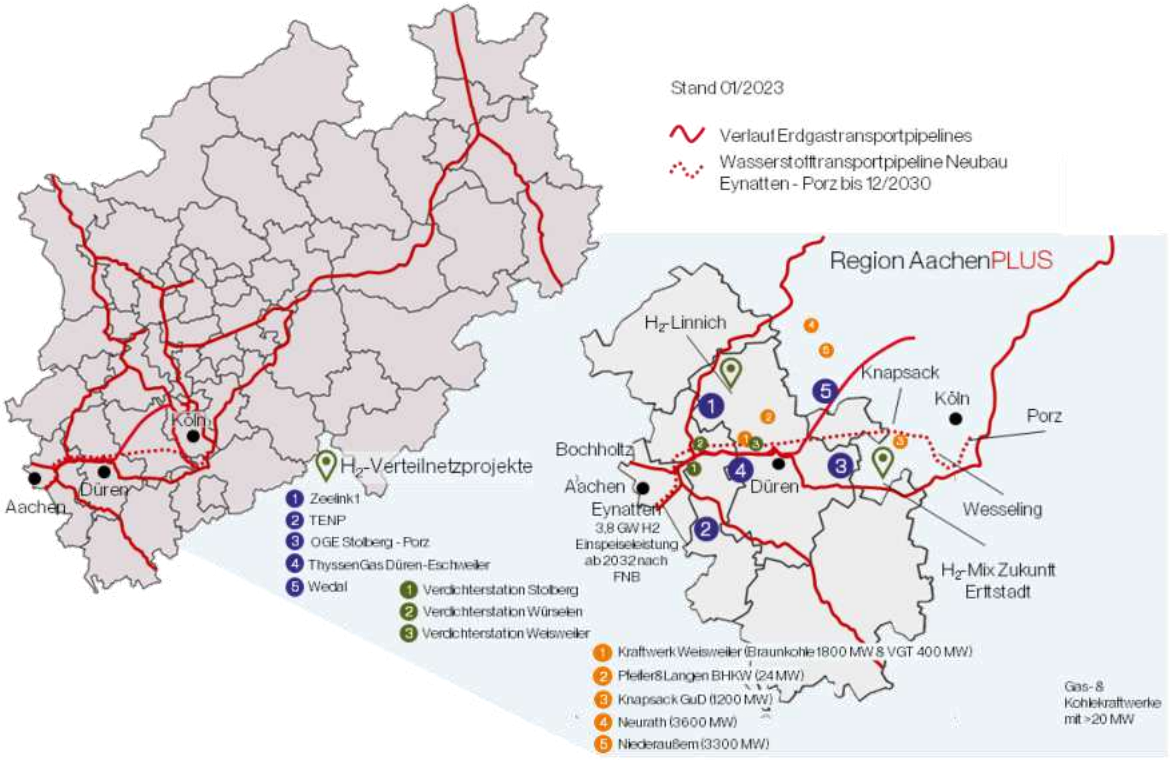


Abbildung 15: Status quo potenziell nutzbarer H_2-Infrastrukturen (eigene Abbildung)

Tabelle 1 zeigt die Pipelines des Erdgastransportnetzes in der Region sowie erreichbare Kapazitäten für den Transport von Erdgas und berechneten potenziellen Kapazitäten für den Transport von Wasserstoff.

Eine vollständige Umstellung aller Pipelines auf Wasserstoff ist jedoch nicht zu erwarten.

Tabelle 1: Transportpipelines in der Region und potenzielle H_2-Kapazitäten

#	Pipeline	Kapazität Erdgas	Kapazität $H_{2\,(potenziell)}$
1	Zeelink (OGE/ThyssenGas) – DN1.000	100 TWh / a	88 TWh / a
2	TENP (OGE/Fluxys) 2 strängig – DN900-1.000	160 TWh / a	142 TWh / a
3	OGE – DN800	- TWh / a (DN800)	56 TWh / a
4	Wedal – DN1.000	100 TWh / a	88 TWh / a

Netzentwicklungsplan Gas

Für die Beurteilung der Umstellung von Erdgaspipelines auf H_2-Betrieb und den Neubau von H_2-Pipelines im Zuge des H_2-Backbones bestehen verschiedene Konzepte. Als Markteinschätzung relevant ist in Deutschland insbesondere der Netzentwicklungsplan Gas der Ferngasleitungsnetzbetreiber (FNB). Dessen aktuelle Version (NEP Gas 2022-32) befindet sich in der Finalisierung [27]. Ein mit „Zwischenstand" betiteltes Dokument zeigt die aktuellen Überlegungen. Hierbei wird vorrangig das Erdgasnetz betrachtet, jedoch behandelt ein eigenes Kapitel den Ausbau einer H_2-Infrastruktur. Basierend auf einer Marktumfrage nach H_2-Erzeugung und -bedarf haben die Ferngasleitungsnetzbetreiber (FNB) für eine Anzahl von Projekten ein Memorandum of Understanding (MoU) abgeschlossen. Für die Stützjahre 2027 und 2032 wird auf Basis der so erhobenen Angebots- und Bedarfsermittlung ein H_2-Transportbedarf und daraus die Notwendigkeit von Umwidmung und Zubau von Pipelines abgeleitet. Die folgende Abbildung 16 (links) zeigt die Einschätzung bezüglich des Raumes um AachenPLUS für das Stützjahr 2027. Die Abbildung 16 (rechts) zeigt die Einschätzung bezüglich des Raumes um AachenPLUS für das Stützjahr 2032.

Die gemeldete Last-Einspeisesituation empfiehlt nach heutiger Einschätzung der FNB einen Neubau einer H_2-Leitung von der Rheinschiene durch die Region AachenPLUS nach Eynatten / Raeren. (bezeichnet als: Maßnahme 222, Eynatten-Porz, IBN 2030). Der Bedarf für das Jahr 2027 wird noch nicht gesehen, jedoch für das Jahr 2032. Der Pipelineverlauf des von der Open Grid Europe (OGE) geplanten Vorhabens orientiert sich an der Trasse der bestehenden OGE-Erdgaspipeline. Die angekündigte H_2-Pipeline ist Teil des nationalen Infrastrukturprojektes H2ercules und wird somit von westlicher nach östlicher Richtung quer durch die Region AachenPLUS laufen und soll eine Kapazität von bis zu 10 GW haben. Hintergrund des Pipelineneubaus ist die strategische Anbindung des nationalen H_2-Netzes an den Importknotenpunkt Eynatten, an dem Importkapazitäten von 3,8 GW zu erwarten sind [27].



Abbildung 16: H_2-Netze nach NEP Gas 2022-32 in 2027 (links) und 2032 (rechts), Einfärbung nach Einspeisung [21]

Hinweis zu Abbildung 16: Der Abzweig in den Rhein-Erft-Kreis quert nicht die Region AachenPLUS. Er dient augenscheinlich dem möglichen Anschluss einer für Rommerskirchen, Rhein-Kreis Neuss, vorgesehenen Elektrolyse an der Kopfstation der Offshore-Wind-HGÜ (bezeichnet als: Maßnahme 246 des NEP Strom 2035). Auch für den Raum Oberzier, Kreis Düren, ist eine Offshore-Kopfstation angenommen (bezeichnet als: Maßnahme 247 des NEP Strom). Dies kann ebenfalls zu einer entsprechenden Planung von Elektrolyse und folglich einem Erzeugungspotenzial von Wasserstoff führen.

Auf Ebene des Verteilnetzes sind vereinzelte Projekte zur Umstellung oder Beimischung von Wasserstoff pilotiert. Im Projekt H2Linnich ist eine Wärmeinsel bestehend aus einer 130 Meter langen H_2-Pipeline und einem H_2-Brennwertkessel seit dem Jahr 2022 in Betrieb und dient als Nukleus für die Umstellung weiterer Teile des regionalen Verteilnetzes [28]. Die Firma Thyssengas plant die Umstellungen von einem Pipelinestrang zwischen Weisweiler und Düren bis 2027, wobei die endgültige Umstellung stark von einem Rückgang der Erdgasbedarfe der angeschlossenen Kunden abhängen wird. Weiterhin bestehen Überlegungen der Firma Thyssengas den Pipelinestrang zwischen Düren und Köln umzustellen, um so eine Anbindung an das überregionale H_2-Netz zu verwirklichen.

Die Analyse des Status quo der Pipelineinfrastruktur der Region verdeutlicht den Bedarf an H_2-Wertschöpfungsketten zur Verteilung des Wasserstoffs auf regionaler Ebene. Dazu zählen kurz- und mittelfristig die Transportoptionen via Trailer zur Vernetzung lokaler Erzeugungsstandorte mit Industrien und Tankinfrastruktur. Langfristig wird durch die Skalierung des Marktes sowohl auf

Angebots- als auch Bedarfsseite eine Pipelineinfrastruktur und die Anbindung an das europäische Pipelinenetz erforderlich sein. Für die Analyse der Wertschöpfungsketten ist daher eine mittelfristige und langfristige Sichtweise notwendig, um den Markthochlauf in der Region zu ermöglichen. Für die weiteren Aktivitäten innerhalb der Region AachenPLUS ist es vielversprechend, auf die weiteren Arbeiten im NEP Gas einzuwirken. Sofern Bedarfe oder Angebote aus der Region an die FNB gemeldet werden, können diese als Anforderung an die Netzplanung aufgenommen und berücksichtigt werden. Die Nennung der Neubau Pipeline im NEP ist diesbezüglich vielversprechend. Darüber hinaus lässt die Lage zwischen Rheinland, Chemelot und Küste im Dreiländereck die internationale Einbindung als Chance mit hoher Eintrittswahrscheinlichkeit erscheinen.

4.4. Technologiebausteine der H_2-Versorgungspfade

Kapitel 4.4 behandelt die Rahmenbedingungen für den Aufbau einer zukünftigen H_2-Versorgung. Im Zuge dessen werden einzelne Technologiebausteine zum Aufbau von H_2-Wertschöpfungsketten betrachtet und hinsichtlich ihrer technischen Reife sowie den spezifischen Kosten analysiert. Die betrachteten Technologiebausteine sind in Abbildung 17 dargestellt. Durch die Kombination verschiedener Bausteine können individuelle H_2-Versorgungspfade erstellt werden. Mit Hilfe dieser Bausteinlogik werden verschiedene Versorgungskonzepte in der Region AachenPLUS analysiert. Versorgungspfade, wie beispielsweise die Trailer-Versorgung mit gasförmigem Wasserstoff, werden dargestellt. Aufgrund der modularen Methodik sind bei der Kombination der Bausteine und der Anwendung auf spezifische Versorgungspfade mehrere Randbedingungen zu berücksichtigen. Zum einen ist die Skalierbarkeit der einzelnen Bausteine nur bedingt möglich, da deren techno-ökonomische Betrachtung in der Regel lediglich für eine verarbeitete H_2-Menge von 5-20 t/d ausgelegt ist. Weiterhin werden in der techno-ökonomischen Analyse Kosten auf Basis der aktuellen Literatur verwendet. Es werden keine Annahmen zu möglichen Margen entlang der Wertschöpfungskette inkludiert. Darüber hinaus ist die Kombinierbarkeit der einzelnen Technologiebausteine von der individuellen Anwendung, wie etwa der betrachteten Menge oder der betrachteten Transportdistanz, abhängig.



Abbildung 17: Verwendete Technologiebausteine für die Distributionskonzepte

4.5. Ergebnisse der Distributionsoptionen

Auf Grundlage der in Kapitel 4.1 analysierten Technologiebausteine und des in Kapitel 4.3 ermittelten Status quo werden in diesem Kapitel Distributionspfade für die Versorgung der Region AachenPLUS mit Wasserstoff ermittelt und hinsichtlich der aktuellen sowie zukünftigen Kosten analysiert. Dabei wird auf Basis der Informationen zur technologischen Reife der einzelnen Technologiebausteine und des Status quo in der Region eine Unterteilung in zwei Szenarien vorgenommen. Im mittelfristigen Szenario mit Umsetzungshorizont bis maximal 2030 ist vor allem der Transport von gasförmigem und flüssigem Wasserstoff via Trailer berücksichtigt. Langfristig erhöht sich der Optionenraum durch die technische oder räumliche Verfügbarkeit von H_2-Pipelines und der Möglichkeit des Transportes über Flüsse. Das langfristige Szenario setzt das Entstehen eines nationalen und europäischen H_2-Pipelinenetzes sowie die technische Verfügbarkeit von Binnenschiffen zum H_2-Transport voraus. Abbildung 18 zeigt die für die Region analysierten möglichen mittel- und langfristigen Distributionsoptionen.

Im Folgenden werden für die Region anhand von fünf Fallbeispielen verschiedene Distributionskonzepte analysiert, welche in nachfolgender Abbildung dargestellt sind. Für die mittelfristigen Szenarien, also den Trailertransport von gasförmigem oder flüssigem Wasserstoff, wird die Route zwischen einer dezentralen Erzeugungseinheit im Brainergy Park Jülich und einer H_2-Tankstelle in Düren gewählt. Die Transportdistanz beträgt in diesem Distributionskonzept ca. 20 km und stellt somit eine rein regionale Wertschöpfungskette dar. Für die Produktion des Wasserstoffs am Standort wurden optimistische Kosten in Höhe von 5 € / kg Wasserstoff angenommen. Langfristig wird der Import von Wasserstoff in die Region eine Rolle spielen. Analysiert werden drei verschiedene

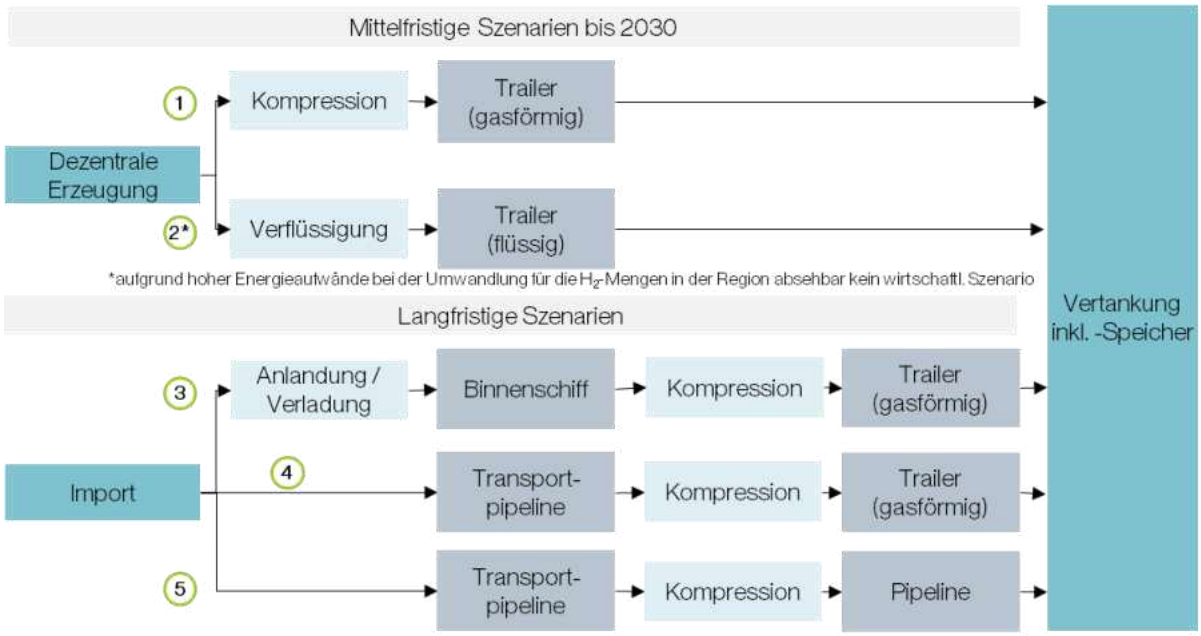


Abbildung 18: Mittel- und langfristige Distributionsoptionen für die Region AachenPLUS

Optionen für den Import. Für diesen wird basierend auf einer internen Berechnung ein Preis in Höhe von 4,16 € / kg Wasserstoff prognostiziert. Die erste Option stellt den Import via Binnenschiff dar. In diesem Distributionskonzept landet der Wasserstoff im Rotterdamer Hafen an, wo er auf Binnenschiffe umgeladen wird. Mit diesen wird der Wasserstoff über den Rhein bis in den Neusser Hafen transportiert. Anschließend erfolgt der Transport des Wasserstoffs in die Region mit Hilfe von Trailern. Das zweite Importkonzept umfasst den pipelinegebundenen Import von Wasserstoff in Kombination mit einem Trailertransport. In diesem Konzept wird Wasserstoff über das entstehende H_2-Netz bis nach Köln transportiert, von wo der Weitertransport via Trailer in die Region AachenPLUS erfolgt. Das dritte Importkonzept setzt eine direkte Anbindung der Region AachenPLUS über eine H_2-Transportpipeline voraus. Der importierte Wasserstoff wird in diesem Fall verdichtet und anschließend via Pipelines direkt zum Endabnehmer transportiert.

In nachfolgender Abbildung werden die resultierenden Ergebnisse mitsamt möglichen Kostensenkungspotenzialen in Folge von Lerneffekten durch erhöhte Produktions- und Transportkapazitäten dargestellt. Es ist erkennbar, dass für den Transport via Trailer die Kosten für gasförmigen Wasserstoff für die betrachteten täglichen Transportmengen und die gewählte Distanz im Fallbeispiel am geringsten sind. Im Zuge von Lerneffekten sind bis 2025 deutliche Kostensenkungspotenziale zu erkennen. Der Trailertransport von gasförmigem Wasserstoff bleibt jedoch die kostengünstigste Variante. Ab dem Jahr 2030 erhöht sich der Optionenraum für den Bezug von Wasserstoff. Durch Erreichen der technologischen Reife für den Transport von Wasserstoff auf Binnenschiffen und Umsetzung von H_2-Pipelineprojekten auf europäischer (European Hydrogen Backbone) und regionaler (u. a. OGE H_2-Pipeline Eynatten-Porz) Ebene, besteht die Möglichkeit weitere Wege für den großskaligen H_2-Bezug zu schaffen. Es ist davon auszugehen, dass die neu entstehenden Optionen in direkter Preiskonkurrenz

Transportform	Route	Distanz	Verbindende Sektoren
Trailer (flüssig)	Brainergy Park – Düren	20 km	Dezentrale Elektrolyse – Abnehmer
Trailer (gasförmig)	Brainergy Park – Düren	20 km	Dezentrale Elektrolyse – Abnehmer
Binnenschiff + Trailer (gasförmig)	Import – Neuss – Düren	50 km (Trailer)	Import – Abnehmer
Pipeline + Trailer (gasförmig)	Import – Köln – Düren	50 km (Trailer)	Import – Abnehmer
Pipeline	Import - Düren	100 km	Import – Abnehmer

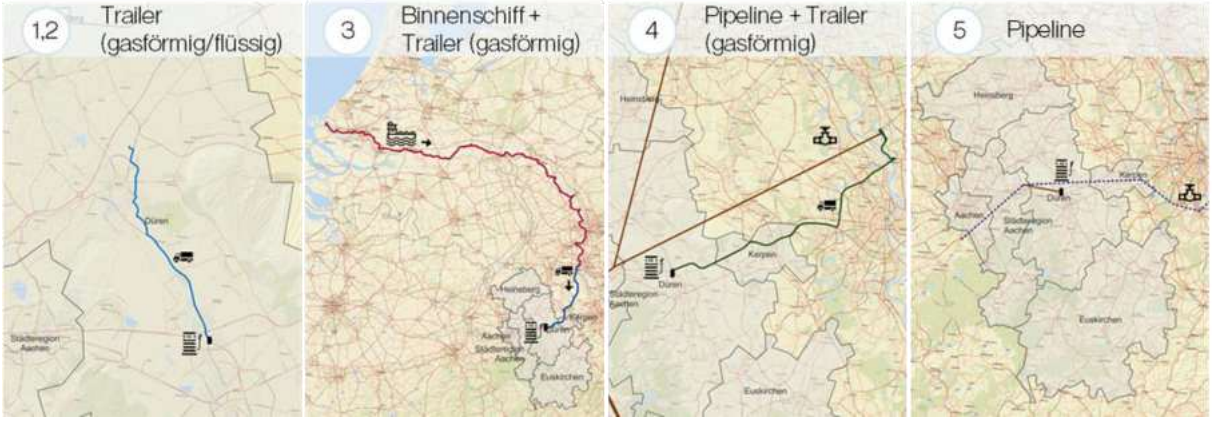


Abbildung 19: Ausgewählte Distributionskonzepte der Region AachenPLUS

mit den zuvor etablierten Alternativen stehen werden. Aufgrund der Skalierung der neuen Optionen werden die Kosten für diese voraussichtlich geringer sein als für die etablierten Alternativen.

Aufgrund der sich entwickelnden Verfügbarkeit der verschiedenen Distributionskonzepte in der Region ist davon auszugehen, dass sich mehrere Konzepte etablieren werden. Welche Konzepte in der Region zum Einsatz kommen werden, ist neben der Kostenseite u. a. davon abhängig, ab wann eine Option erstmals zur Verfügung stehen wird.

Tabelle 2 zeigt eine Übersicht der betrachteten Distributionskonzepte samt Einschätzung zur mittel- und langfristigen Verfügbarkeit und dem Einfluss auf die regionale Wertschöpfung, welche durch den Transport des Wasserstoffs entsteht. Die Analyse der Distributionskonzepte zeigt, dass voraussichtlich bis 2030 ein Wandel von trailerbasierter hin zu pipelinebasierter H_2-Bereitstellung stattfinden wird. Nichtsdestotrotz ist in Zeiten des Hochlaufes der H_2-Wirtschaft in der Region AachenPLUS die Versorgung durch dezentrale Versorgungskonzepte (siehe Konzepte 1 und 2) essenziell für den Betrieb von Insellösungen zur dezentralen H_2-Bereitstellung. Mit steigenden H_2-Bedarfen, wie sie in Kapitel 5 näher erläutert werden, wird auch die Versorgung durch Pipelines zunehmend kosteneffizient. Dennoch wird die Versorgung kleinerer Abnehmer, wie etwa einzelner Tankstellen auch langfristig via Trailer ablaufen. Eine im Hochlauf relevante Option kann die Versorgung von Abnehmern durch die Verteilung von Wasserstoff via Trailer ausgehend von Distributionshubs entlang des entstehenden H_2-Transportnetzes darstellen.

Durch den Aufbau von Distributionshubs an entsprechenden Verdichterstationen kann eine Anbindung einzelner Industrien erfolgen. Im Pipelineverteilnetz ist eine mögliche Umstellung stark von den sich verändernden Bedarfen auf Seiten der Kunden abhängig. Bei einem ausreichenden Erdgasbedarfsrückgang der an das Verteilnetz angeschlossenen industriellen Betriebe und privaten Abnehmer können einzelne Leitungen umgestellt

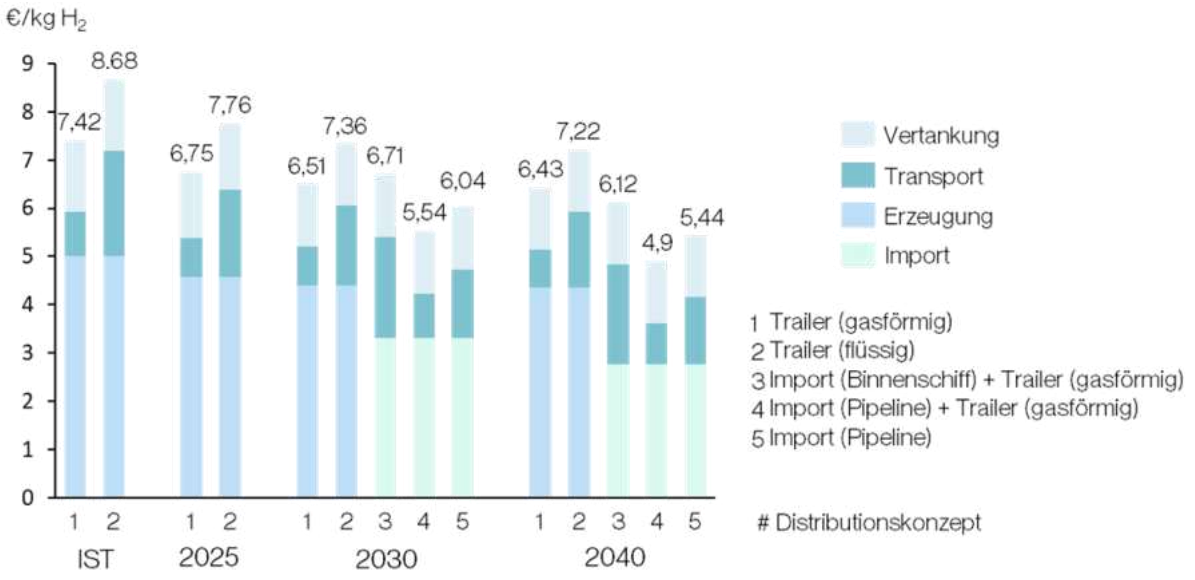


Abbildung 20: Kostenvergleich der Distributionskonzepte und zeitliche Entwicklung

werden. Dies setzt voraus, dass entlang der umzustellenden Leitungen kein Erdgaskunde mehr vorhanden ist oder zweisträngige Leitungen auf eine Erdgas- und eine H_2-Leitung umgestellt werden können.

Distributionskonzepte	Verfügbarkeit	Regionale Wertschöpfung
Konzept 1 – Dezentrale Trailerversorgung (gasförmig)	Bis 2030: • Regionale Erzeugungs- und Nutzungskonzepte (Insellösungen) • Meistgenutzte Transportoption zur dezentralen Versorgung der Bereiche Mobilität und Industrie Ab 2030: • Nutzungskonkurrenz durch pipelinegebundene Importe • Zunehmende Netzintegration und Systemstabilisierungsfunktion der Erzeugung	↑ *Gesamte Wertschöpfungskette innerhalb der Region für bilaterale Versorgung und langfristige Systemstabilisierung*
Konzept 2 – Dezentrale Trailerversorgung (flüssig)	Bis 2030: • Verflüssigung von Wasserstoff in der Region nicht wirtschaftlich Ab 2030: • Flüssig importierter Wasserstoff wird ausgehend von Importhubs (z.B. Hafen Neuss) via Trailern in die Region geliefert werden können • Konkrete Umsetzung nicht absehbar • Keine Verflüssigung in der Region	↓ *Geringe Wertschöpfung durch fehlende technische und wirtschaftliche Umsetzbarkeit in der Region*
Konzept 3 – Binnenschiff + Trailer (gasförmig)	Bis 2030: • Nicht verfügbar Ab 2030: • Technische Verfügbarkeit vorhanden, Umsetzung von konkreten Projekten (Hafeninfrastruktur) derzeit nicht absehbar	→ *Region überreifendes Konzept mit hohem Innovationspotenzial*
Konzept 4 – Import (Pipeline) + Trailer (gasförmg)	Bis 2030: • Entstehung des initialen nationalen Wasserstoffnetzes. Anbindung an initiales Netz im Raum Köln durch Trailertransporte denkbar Ab 2030: • Nutzungskonkurrenz durch direkte Pipelineanbindung der Region	→ *Wertschöpfung durch Verteilung von H_2 via regionalen Trailertransporten*
Konzept 5 – Import (Pipeline)	Bis 2030: • Nicht verfügbar in der Region Ab 2030: • Direkte Pipelineanbindung abhängig von Trassenführung in der Region	→ *Fokussierung auf großskalige regionale H_2-Nutzung*

Tabelle 2: Verfügbarkeit und regionale Wertschöpfung der Distributionskonzepte

5. Nutzung im Verkehr & weiteren Bereichen

Nach der Untersuchung der Erzeugungspfade und der Transmissions- und Distributionsoptionen, zielt Kapitel 5 auf die Prognose der H_2-Bedarfe in den Sektoren **Mobilität und Verkehr**, **Industrie**, **Gebäude** sowie **Forschung, Entwicklung und Implementierung** ab. In den einzelnen Unterkapiteln werden sektorale Betrachtungsschwerpunkte und die Methoden erläutert sowie die Ergebnisse dargestellt und diskutiert.

5.1. Mobilität und Verkehr

Der H_2-Bedarf im Verkehrssektor der Region AachenPLUS bildet einen maßgeblichen Anteil am potenziellen Gesamtbedarf von Wasserstoff. Die prognostizierte Abnahmemenge von Wasserstoff und seiner Derivate schafft die Grundlage für den Infrastrukturausbau, welcher im Kontext der Mobilität insbesondere die Tankstelleninfrastruktur umfasst. Diesbezüglich ist festzuhalten, dass sowohl der Öffentliche Personennahverkehr (ÖPNV) als auch der Schwerlastverkehr hohe Potenziale zum Einsatz von Brennstoffzellenfahrzeugen (Fuel Cell Electric Vehicle (FCEV)) aufweisen. Anhand einer dreistufigen Potenzialanalyse wird der H_2-Bedarf für Mobilität und Verkehr für die Stützjahre 2025, 2030 und 2035 prognostiziert. Zunächst wird eine Ist-Analyse durchgeführt, um explizite H_2-Vorhaben im Mobilitätssektor zu erfassen und einen daraus resultierenden H_2-Bedarf abzuleiten. Anschließend wird die potenzielle Fahrzeugentwicklung, und damit die Durchdringung von Brennstoffzellen betriebenen Fahrzeugen, analysiert. Abschließend wird im dritten Schritt der H_2-Bedarf anhand der Analyse einzelner, relevanter Streckenabschnitte der Region kalkuliert. Dieser Dreiklang ermöglicht eine spezifisch auf die Region zugeschnittene Prognose der zukünftig für den Mobilitätssektor benötigten H_2-Menge. In Kapitel 6 werden zudem verschiedene Antriebstechnologien von Bussen und Schienenfahrzeugen hinsichtlich der spezifischen Energieverbräuche und $CO_{2\text{-eq.}}$-Emissionen untersucht und die Beschaffungs- sowie Betriebskosten für verschiedene Fahrzeugflotten der Region AachenPLUS kalkuliert.

Hauptaussagen auf einen Blick

Ambitionierte ÖPNV-Vorhaben zur Integration von Wasserstofffahrzeugen
Ambitionierte Wasserstoff-Projekte einzelner ÖPNV-Betreiber der Region führen zu einer deutlichen Überschreitung des H_2-Bedarfes im Vergleich zum aus Kfz-Zulassungen kalkulierten Hochlauf.

Fokus auf Bus, Zug und Schwerlastverkehr in der Region
Der Wasserstoffbedarf ist maßgeblich durch den Einsatz von Brennstoffzellenfahrzeugen im Schwerlastverkehr und dem ÖPNV (primär Busse, aber auch Züge) geprägt. Durch den hohen Anteil der Busse ist der Bedarf nicht nur auf den Hauptverkehrsadern (A4, A61 und A44), sondern vor allem auch in den Regionen selbst zu erwarten.

Bereits gut ausgebaute Tankstelleninfrastruktur mit Erweiterungspotenzial
Die bereits vorhandene und geplante Tankstelleninfrastruktur sollte spätestens ab 2035 insbesondere für eine noch bessere flächenmäßige Abdeckung der Region und damit der Anreizung weiterer Anschaffungen von H_2-Fahrzeugen erweitert werden.

Einbezug verschiedener Faktoren zur Erarbeitung einer Tankstelleninfrastruktur
Eine gelungene Tankstellen-Infrastruktur kann nicht nur auf Basis der kalkulierten Bedarfe ausgelegt werden, sondern muss Faktoren wie räumliche Abdeckung, Anfahrtdauer sowie Nutzbarkeit (Fahrzeugtyp und öffentliche Zugangsmöglichkeit) einbeziehen.

Bedeutung für die Region AachenPLUS

Die Integration von H_2-Mobilität in der Region ist insbesondere im ÖPNV stark ausgeprägt. Durch den Durchfahrtsverkehr auf den großen Autobahnen in dem Gebiet besteht ein hohes Anstiegspotential des zukünftigen H_2-Bedarfs. Für die Intensivierung der H_2-Mobilität in der Region ist somit der weitere strategische Ausbau der Tankstelleninfastruktur notwendig.

5.1.1. Ist-Analyse

Methodik der Ist-Analyse

Initial erfolgt eine detaillierte Ist-Analyse der Region AachenPLUS. Dafür werden bestehende oder geplante Vorhaben zur Integration von H_2-Fahrzeugen recherchiert und zusammengetragen. Im Fokus stehen die verschiedenen ÖPNV-Betreiber der Region sowie eine Umstellung des jeweiligen städtischen Fuhrparks. Anschließend werden die recherchierten Vorhaben anhand einer Befragung validiert. Im Rahmen dessen werden regionale ÖPNV-Betreiber sowie Logistiker befragt, da im Bereich des Schwerlastverkehrs und des ÖPNV die größten Potenziale vorliegen. Insgesamt werden sieben Umfragebögen ausgewertet, wobei die Befragung die folgenden drei Themenschwerpunkte umfasst:

1. Erhebung der Relevanz einzelner Kfz-Klassen mit Brennstoffzellenantrieben für die Mobilitätsflotte
2. Erhebung des Fokus auf Brennstoffzellenbusse oder -züge im ÖPNV
3. Erhebung durchschnittlicher Jahresfahrleistungen der aktuellen Flottenfahrzeuge

Ergebnisse der Ist-Analyse

Die Auswertung der Befragung potenzieller Anwender bestätigt die recherchierte zeitliche Entwicklung der ÖPNV-Vorhaben sowie die getroffenen Annahmen bezüglich der Jahresfahrleistungen [29]–[34].

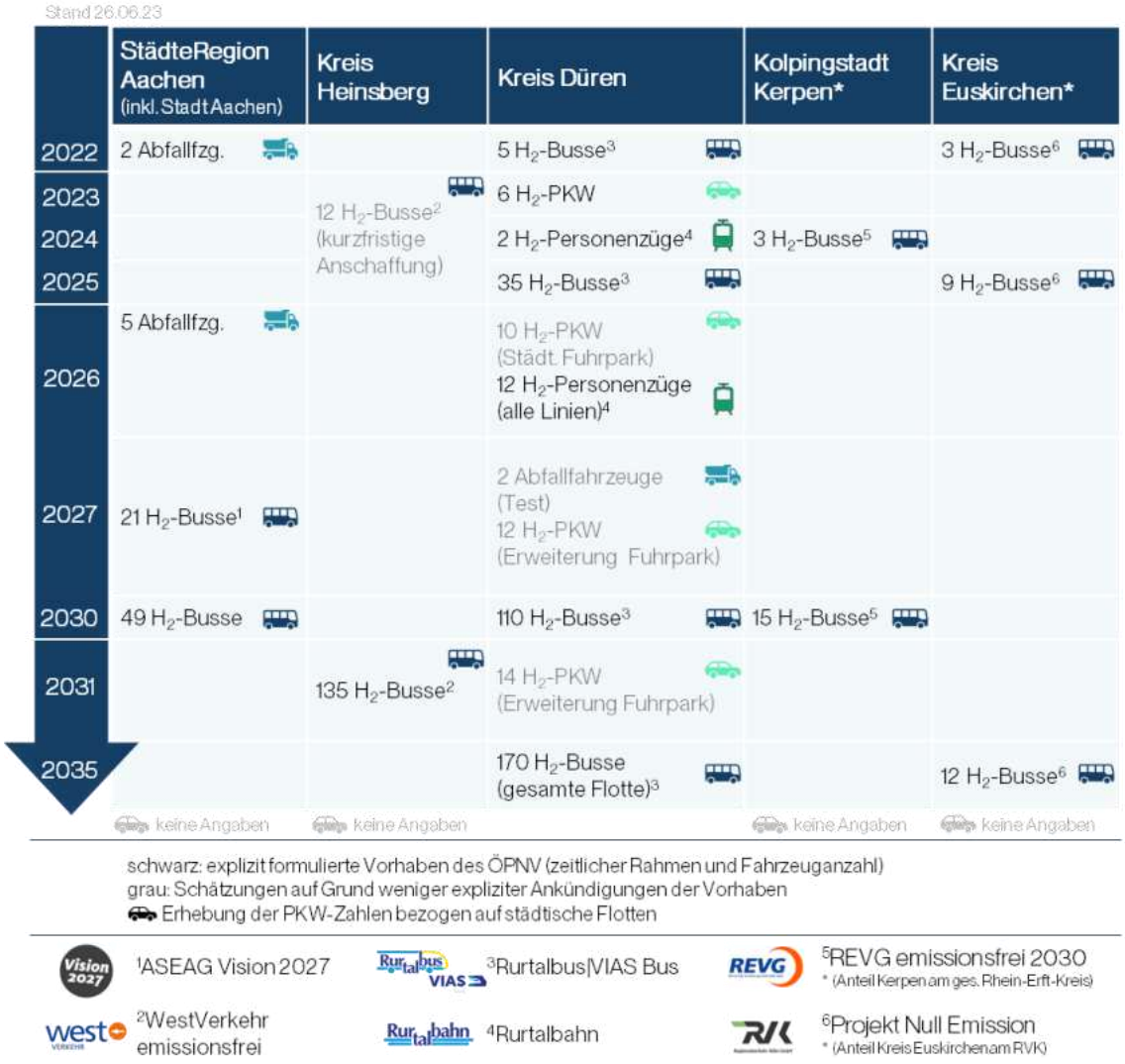


Abbildung 21: Übersicht der geplanten Projekte zur Integration von Brennstoffzellenfahrzeugen in der Region AachenPLUS (Anschaffung der Fahrzeuganzahl bis zum jeweiligen Jahr)

Für die Region AachenPLUS ist eine bereits überdurchschnittlich hohe Durchdringung von H_2-Fahrzeugen zu erkennen. Die Kreise Heinsberg und Düren planen mit den ÖPNV-Betreibern Westverkehr und Rurtalbus bzw. VIAS Bus eine Umstellung ihrer gesamten Flotten auf Brennstoffzellenbusse, was einen Umfang von rund 135 bzw. 170 Fahrzeugen umfasst. Zusätzlich hat die Umstellung der Rurtalbahn auf den Einsatz von Brennstoffzellenzügen einen signifikanten Einfluss auf den H_2-Bedarf der Gesamtregion. Im Fall der Kolpingstadt Kerpen wird eine Umstellung auf H_2-Busse durch die Initiative *REVG emissionsfrei 2030* angestrebt, welche in Abbildung 21 jedoch nur anteilig (12 von 26 Bussen) am gesamten Rhein-Erft-Kreis abgebildet ist, da die restlichen Gebiete des Kreises nicht zur Region AachenPLUS gehören.

Es ist anzumerken, dass der H_2-Bedarf resultierend aus dem Verkehr maßgeblich davon geprägt ist, wo die Fahrzeuge tanken. Im Fall der REVG ist der aktuelle Betriebshof in Türnich lokalisiert. Daher besteht die Möglichkeit, dass dort mehr Busse als in der Kalkulation angenommen betankt werden, was

Auswirkungen auf den Bedarf in der Region haben kann.

Im Rahmen der Auswertung der Befragung potenzieller Anwender zeigt sich grundsätzlich ein hohes Interesse an der Integration von Brennstoffzellenfahrzeugen, insbesondere von H_2-Bussen und -LKWs. Das unter Einbezug der jeweiligen fahrzeugtypischen, jährlichen Fahrleistungen sowie dem spezifischen Verbrauch kalkulierte H_2-Potenzial kann in der Realität jedoch höher ausfallen als der berechnete Bedarf resultierend aus den von den Befragten explizit genannten Flottengrößen. Einzelne befragte Unternehmen bekunden Interesse an der Implementierung von Brennstoffzellenfahrzeugen, jedoch ohne konkrete, skalierbare Pläne. Es ist demnach zu beachten, dass individuelle Entscheidungen einzelner Akteure einen signifikanten Unterschied in der Kalkulation von H_2-Bedarfen ausmachen können. Daher werden Angaben zu noch unkonkreten Einzelfallentscheidungen aus der Unsicherheit heraus nicht in den final berechneten Hochlauf einbezogen werden.

5.1.2. Analyse der Fahrzeugentwicklung

Methodik der Analyse der Fahrzeugentwicklung

Im zweiten Analyseschritt wird zur Kalkulation der in der Region AachenPLUS benötigten H_2-Menge die potenzielle Fahrzeugentwicklung auf Basis von Kfz-Zulassungen in den jeweiligen Kreisen und Gemeinden bestimmt. Dafür werden die Zulassungsdaten zehn verschiedener Fahrzeugklassen für die Stützjahre anhand einer studienbasierten zukünftigen Marktdurchdringung kreisscharf kalkuliert. Um eine Verzerrung im ermittelten Bedarf aufgrund aggregierter Fahrzeugklassen zu vermeiden und eine möglichst realitätsgetreue H_2-Menge zu bestimmen, werden den Fahrzeugklassen spezifische Verbräuche zugeordnet. Als Berechnungsgrundlage werden die Leitstudie der DENA [9], eine Agora-Studie [10] sowie eine Studie des Forschungszentrums Jülichs (FZ Jülich) [35] ausgewählt. In diesen Studien wird zumeist erst nach dem Jahr 2030 ein starker Anstieg der H_2-Mobilität prognostiziert. Im Jahr 2030 liegt der H_2-Anteil am Endenergiebedarf bei lediglich 0,5 – 0,6 %, welcher bis zum Jahr 2050, je nach Szenario und Studie, auf 5 – 30 % ansteigt [36]. Die gewählten Studien mit den Szenarien „KN2045 Agora“ und „KN100 dena“ skizzieren im Studienvergleich einen moderaten Brennstoffzellenfahrzeughochlauf, weshalb sie als Berechnungsgrundlage herangezogen werden. Da die Studien keine explizite Marktentwicklung für Brennstoffzellenbusse betrachten, wird die Studie des FZ Jülich herangezogen, um diese Lücke zu schließen. Genau wie in den oben genannten Studien gilt es bei der Auswahl zwischen einem optimistischen, einem moderaten und einem konservativen Hochlauf von Brennstoffzellenbussen, den mittleren Ansatz zu wählen.

Ergebnisse der Analyse der Fahrzeugentwicklung

In Abbildung 22 ist der Vergleich zweier Hochlauf-Varianten dargestellt. Dabei umfasst die Kategorie *H_2-Fahrzeuge* PKWs, leichte Nutzfahrzeuge sowie LKWs unterschiedlicher Gewichtsklassen. Zunächst ist zu erkennen, dass Schienenfahrzeuge in *Variante a* nicht aufgeführt werden. Der H_2-Bedarf resultierend aus dem Schienenverkehr hat jedoch einen signifikanten Anteil, weshalb ein rein studienbasierter Hochlauf, wie in *Variante a* nicht ausreichend ist.

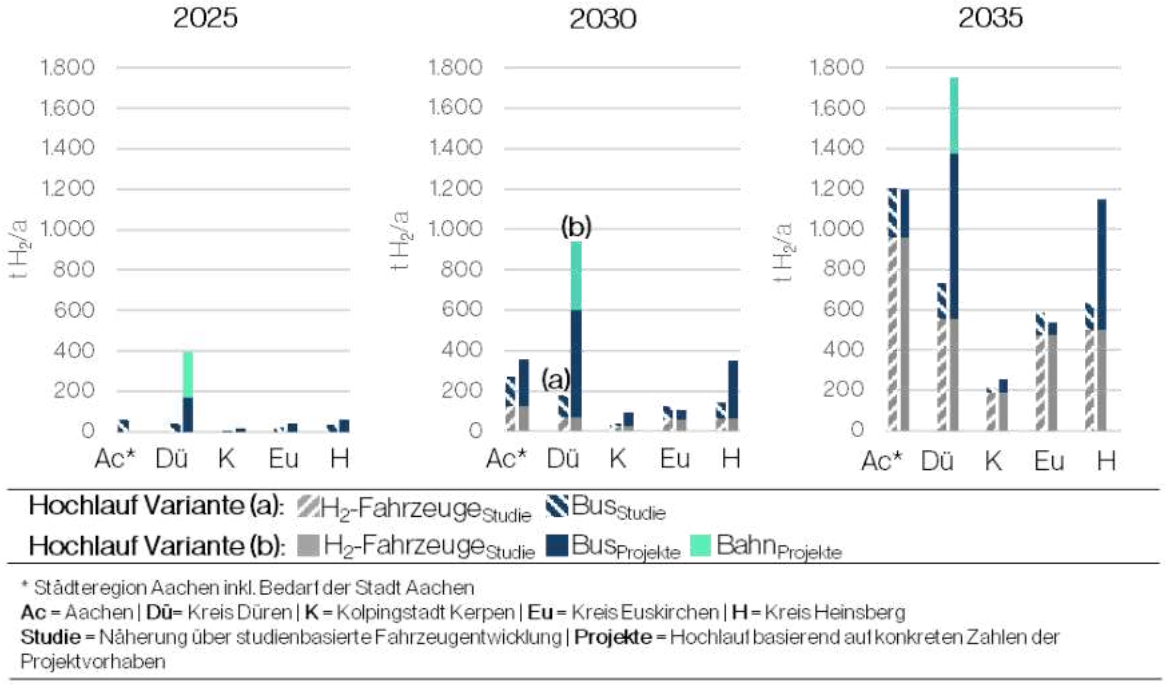


Abbildung 22: Überschlägiger Hochlauf des H_2-Bedarfs resultierend aus der Mobilität anhand zwei verschiedener Analyseansätze

Beim Vergleich der Hochläufe für Busse zeigt sich, dass die ambitionierten Pläne der jeweiligen ÖPNV-Betreiber (*Variante b*) die studienbasierten Kalkulationen zum Teil weit übersteigen, wie anhand der Hochläufe der Kreise Düren sowie Heinsberg und der Kolpingstadt Kerpen zu erkennen ist. Im Falle der ÖPNV-Betreiber der StädteRegion Aachen sowie des Kreises Euskirchen ergeben die studienbasierten Hochläufe höhere H_2-Bedarfe als die Bedarfe aus den formulierten Projektvorhaben. Da die Angaben der ÖPNV-Betreiber zu den Anschaffungs- und Umstellungsplänen auf H_2-Bussen das realistischere Bild zeichnen, wird in diesem Fall nicht der studienbasierte Hochlauf gewählt.

Folgend wird im weiteren Verlauf die Kombination der Berechnungsgrundlagen für den H_2-Bedarf resultierend aus der Mobilität gewählt. Die Hochlauf-*Variante b* umfasst somit die Kategorien $Bus_{Projekte}$ und $Bahn_{Projekte}$, womit die Entwicklungen aus expliziten Projektvorhaben der ÖPNV-Betreiber gemeint sind, sowie einen grundlegenden Hochlauf an H_2-Fahrzeugen auf Basis einer studienbasierten Fahrzeugentwicklung, wie zuvor erläutert. Dabei ist anzumerken, dass die Entwicklung der Brennstoffzellen-PKW nicht explizit aufgeführt ist, da diese nach Studienlage keinen signifikanten Einfluss auf die Entwicklung des H_2-Bedarfs resultierend aus dem Verkehr hat. Die Kategorie der *H_2-Fahrzeuge$_{Studie}$* ist demnach maßgeblich durch den Schwerlastverkehr und Nutzfahrzeuge geprägt.

5.1.3. Analyse einzelner Streckenabschnitte

Methodik der Analyse einzelner Streckenabschnitte

Im dritten Analyseschritt werden inter- und multimodale Knotenpunkte des Personen- und Warenverkehrs anhand der Auslastung von Hauptverkehrsadern analysiert und identifiziert. Dabei werden Verkehrszählungen [37] auf einzelnen Straßenabschnitten aus dem Jahr 2019 herangezogen, die ebenfalls durch den studienbasierten Hochlauf für die jeweiligen Stützjahre hochskaliert werden. Das Vorgehen erfolgt analog zur Berechnung der Fahrzeugentwicklung und legt dieselben Studien zugrunde. Es ist festzuhalten, dass bei Verkehrszählungen nicht alle Straßen erfasst werden. Ebenso gilt es zu beachten, dass hierbei nicht nur die in der Region gemeldeten Fahrzeuge betrachtet werden, sondern insbesondere auf den Bundesautobahnen ein großer Anteil der gezählten Fahrzeuge zum Durchfahrts- sowie Fernverkehr zählen kann. Insbesondere durch die geografische Lage der Region AachenPLUS am Dreiländereck (Deutschland, Niederlande, Belgien) kann die Detektion der Hauptverkehrsknotenpunkte wichtige Schlussfolgerungen für eine H_2-Infastruktur geben.

Ergebnisse der Analyse einzelner Streckenabschnitte

Die Bundesautobahnen A4 sowie A61 sind die Strecken mit den höchsten berechneten H_2-Bedarfen. Dies resultiert aus den hohen Streckenauslastungen durch die Gesamtzahl der Fahrzeuge, ebenso wie durch einen hohen Anteil des Schwerlastverkehrs.

Der Bedarf, resultierend aus den Verkehrsaufkommen auf den einzelnen Autobahnabschnitten, hat am kalkulierten Gesamtbedarf des jeweiligen Kreises einen Anteil von rund 8 %. Dieser wirkt sich, bezogen auf die Bedarfskalkulation der Region AachenPLUS, zunächst gering aus, kann jedoch im internationalen Kontext Anhaltspunkte für die Verstärkung des grenzübergreifenden Austausches und damit den europäischen Binnenmarkt bieten. Darüber hinaus erlaubt dies relevante Rückschlüsse auf die Skizzierung einer H_2-Tankstelleninfrastruktur.

5.1.4. Synthese und Handlungsempfehlungen

Wie in nachfolgender Tabelle zu erkennen, sind die finalen H_2-Bedarfe des Regionenverbundes AachenPLUS resultierend aus dem Verkehr des Jahres 2025 gering. Dabei macht der Kreis Düren mit 60 % (bzw. 77 % unter Einbezug der H_2-Züge) den größten Anteil am Gesamtbedarf aus. Ab dem Jahr 2030 ist der errechnete H_2-Bedarf nicht nur durch die Vorhaben der Rurtalbus / VIAS Bus geprägt, sondern auch durch die ambitionierten Pläne weiterer ÖPNV-Betreiber. Die Städte-Region Aachen (inklusive der Stadt Aachen) und der Kreis Heinsberg machen einen Anteil von 24 % bzw. 23 % aus. Im letzten zu betrachtenden Stützjahr (2035) ist neben den ÖPNV-Vorhaben auch ein Anstieg des Bedarfs aufgrund weiterer Fahrzeugklassen – insbesondere dem Schwerlastverkehr – zu rechnen, wobei weiterhin die Kreise Düren sowie Heinsberg den größten Anteil ausmachen werden.

Folgend werden die identifizierten Bedarfe zusammen mit den geplanten und bestehenden Tankstelleninfrastrukturen kombiniert und eine White-Spot-Analyse durchgeführt.

Neben den bereits vorhandenen Tankstellen sowie den Tankstellen, die sich in konkreter Planung bzw. Umsetzung befinden (Abbildung 23, schwarze Punkte), gilt es, die Lage weiterer Tankstellen zu skizzieren, um ein flächendeckendes Tankstellennetz zu erhalten. Dabei wird die Lokalisation der zu errichtenden Tankstellen (Abbildung 23, weiße Punkte) durch drei Faktoren beeinflusst. Zunächst wird resultierend aus dem errechneten Bedarf der jeweiligen Kreise und unter der Annahme einer Tankstellenkapazität von 1 t / Tag die benötigte Anzahl der Tankstellen je Kreis und Stützjahr errechnet. Ebenso fließen die Faktoren einer flächenmäßig ausgeglichenen Verteilung der Tankstellen (White-Spot-Analyse) sowie eine strategisch geeignete Lage der Tankstellen mit in die Entscheidung ein. Dabei wird auf Verkehrssituationen resultierend aus lokalen Gegebenheiten sowie auf Standortvorteile wie Autobahnkreuze geachtet. Es gilt zu beachten, dass ein großer Anteil des errechneten H_2-Bedarfes aus der Umstellung der einzelnen ÖPNV-Flotten entsteht, welche zumeist nicht an öffentlichen Tankstellen befüllt werden. Ebenso stehen Bustankstellen als Eigenbetriebstankstellen nicht der öffentlichen Nutzung, beispielsweise für den Schwerlastverkehr, zur Verfügung. Für diesen eignet sich eine direkte Nähe zu den Hauptverkehrsadern (A4, A61 und A44, insbesondere das Autobahnkreuz „Kreuz-Aachen").

Der Durchfahrtsverkehr ist darauf angewiesen, für eine Betankung keinen zeitintensiven Umweg fahren zu müssen. Zusätzlich ist nicht davon auszugehen, dass jedes Speditionsunternehmen, welches in Zukunft eine Flottenumstellung plant, eine Tankstelle auf dem eigenen Betriebshof errichten wird. Wird dies in die Entscheidung über die Lage weiterer Tankstellen einbezogen, lässt sich ein stufenweise zu erweiterndes Tankstellennetz entwerfen, wie in Abbildung 23 dargestellt. Jedoch erfordert eine genaue Lokalisation von zukünftigen Tankstellenstandorten eine ausgiebige Machbarkeitsstudie unter Einbezug wirtschaftlicher Umsetzbarkeit. Zudem ist ein schnellerer Ausbau der Tankstelleninfrastruktur, insbesondere im Kreis Düren realistisch, da die skizzierte Entwicklung bezogen auf die Tankstellenanzahl primär auf Bedarfskalkulationen basiert und oben genannte Faktoren wie die Diskrepanz zwischen der Nutzung von Bustankstellen und öffentlichen Tankstellen noch nicht mit einbezogen wurde.

Tabelle 3: Kalkulierte H_2-Bedarfe aus studienbasierter Fahrzeugentwicklung und Bedarfen aus ÖPNV-Projektvorhaben – inklusive potenzieller Bedarfe durch Personenzüge in Düren [+XX]

(Stand Juni 2023)

	2025		2030		2035	
H_2-Bedarf	[t / a]	[kg / d]	[t / a]	[kg / d]	[t / a]	[kg / d]
StädteRegion Aachen inkl. Stadt Aachen	0 (0)	0 (0)	358 (278)	981 (762)	1.196 (568)	3.276 (1.556)
Kreis Düren [+Zug]	169 [+228]	463 [+625]	600 [+339]	1.644 [+1.093]	1.373 [+380]	3.762 [+1.041]
Kolpingstadt Kerpen	14	40	96	263	257	704
Kreis Euskirchen	43	119	103	282	536	1.468
Kreis Heinsberg	58	158	351	962	1.149	3.148
Gesamt	284 [+228]	780 [+625]	1.508 [+339]	4.132 [+1.093]	4.511 [+380]	12.358 [+1.041]

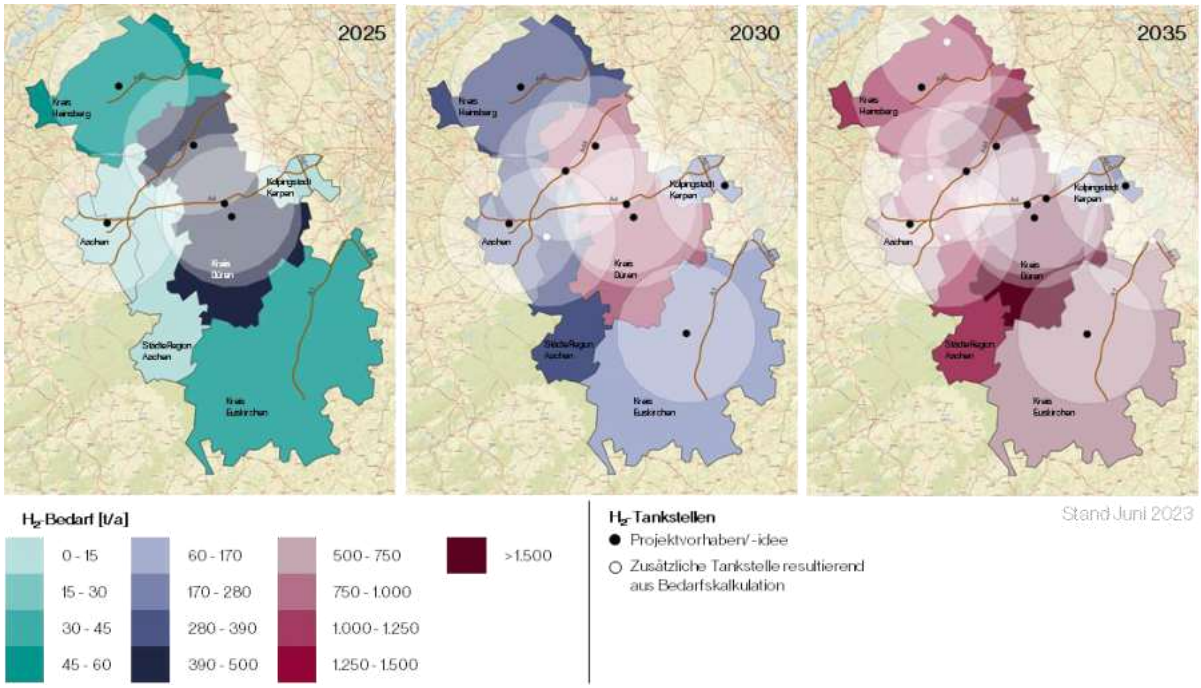


Abbildung 23: H_2-Bedarf der Stützjahre und Skizzierung einer Tankstelleninfrastruktur (Radius 15 km)

Zusätzlich zu dem H_2-Bedarf durch Mobilität und Verkehr sowie der daraus abzuleitenden Tankstelleninfrastruktur werden die H_2-Potenziale für den Schienenverkehr analysiert. Die Betrachtung der bisher nicht elektrifizierten Strecken des Schienenpersonennahverkehrs führt auf die Betreiber EVS Euregio und Rurtalbahn. Da die EVS eine komplette Elektrifizierung ihrer Strecken plant [38], wird in der Kalkulation des Hochlaufs ein H_2-Bedarf lediglich für die Rurtalbahn angenommen [39]. Grundsätzlich ist für einen Ausbau der H_2-Tankstelleninfrastruktur die Nutzung von Synergien in Bezug auf Distribution wünschenswert. Dabei ist die Analyse der im Regionenverbund lokalisierten Zugtankstellen maßgeblich zu beachten, da die Standorte von H_2-Zugtankstellen weniger flexibel sind als die Standorte von PKW-Tankstellen.

Werden die Teilanalysen als Gesamtbild betrachtet, wird deutlich, dass Individualentscheidungen einzelner Akteure einen signifikanten Einfluss auf den zu kalkulierenden H_2-Hochlauf einer Region haben. Der Regionenverbund bietet eine vorhandene und im deutschlandweiten Vergleich gut ausgebaute Tankstelleninfrastruktur. Diese gilt es spätestens ab dem Jahr 2035 zu erweitern, um sowohl die flächenmäßige als auch mengenmäßige Abdeckung der Region zu optimieren. Ein früherer Ausbau, bereits ab dem Jahr 2030, kann Anreize zur weiteren Anschaffung von H_2-Fahrzeugen schaffen und bietet Branchen wie der Logistik und Spedition Sicherheiten für die Entscheidung zur Umstellung ihrer Fahrzeugflotten.

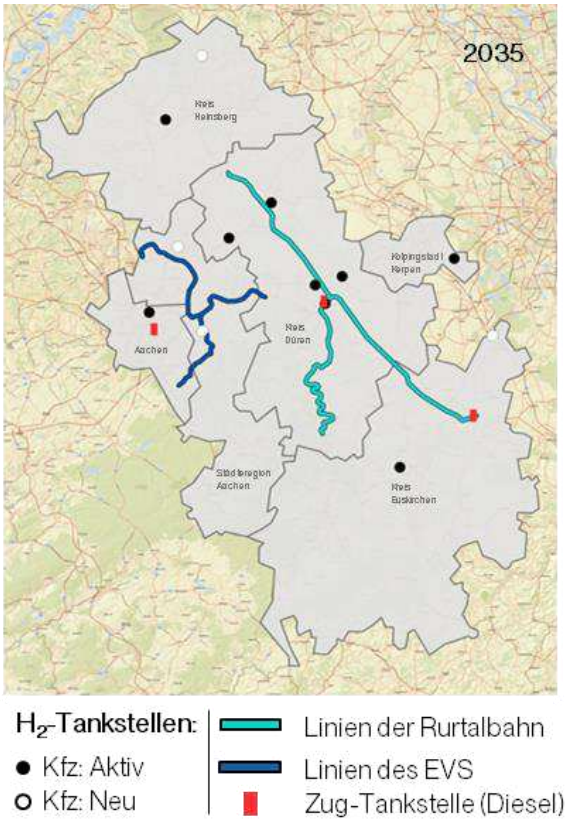


Abbildung 24: H_2-Infrastruktur für den Schienenverkehr (Schienennetz Stand 2023)

5.2. Industrie

Zur Ermittlung des industriellen H_2-Bedarfs in der betrachteten Region wird der Bedarf in den drei Bereichen **Prozesswärme, Raumwärme inklusive Warmwasser** sowie **stoffliche Nutzung** erhoben. Die Unterteilung in drei Bereiche ist durch Unterschiede in der jeweiligen Verwendungsweise und Menge von Wasserstoff begründet. Zur Prozesswärme wird der Bedarf an Wasserstoff gezählt, der zur Substitution fossiler Energieträger – insbesondere bei Hochtemperaturprozessen – eingesetzt werden kann, da derartige Prozesse aufgrund hoher Leistungsdichten nicht oder nur unter enormem Aufwand elektrifizierbar sind. Der Bedarf an Wasserstoff zur Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser ergänzt den Prozesswärmebedarf, sofern Synergien bestehen. Schließlich wird auch der stoffliche H_2-Bedarf betrachtet, welcher in Prozessen zur Herstellung oder Veredelung von Produkten eingesetzt werden kann. Die Methoden werden nachfolgend beschrieben und samt relevanter Ergebnisse diskutiert.

Hauptaussagen auf einen Blick

Der größte H_2-Bedarf der Industrie ergibt sich aus erforderter Prozesswärme
Der industrielle H_2-Bedarf ist in die drei Bereiche **Prozesswärme**, **Raumwärme inklusive Warmwasser** und **stoffliche Nutzung** unterteilt, wobei das Potenzial zur Substitution fossiler Energieträger durch Grünen Wasserstoff im Bereich der Prozesswärme am höchsten ist. Potenziale zur Bereitstellung von Raumwärme durch Wasserstoff können sich durch Synergieeffekte ergeben und erfordern Einzelfallprüfungen. Für den stofflichen Einsatz wird für die Region kein H_2-Bedarf festgestellt.

Hochtemperaturprozesse sind für den H_2-Einsatz zu fokussieren
In der Glasindustrie werden bis zu 95 % und in der Metallverarbeitung bis zu 97 % des gesamten Wärmebedarfs für Anwendungen ab 500 °C bis weit über 1000 °C benötigt. Während sich Hochtemperaturprozesse für den H_2-Einsatz eignen, kann für Prozesse mit Temperaturen unter 500 °C der Einsatz von Hochtemperaturwärmepumpen oder Direktelektrifizierung eine wirtschaftliche Lösung darstellen.

Der H_2-Einsatz in der Glasindustrie erfordert vertiefte Forschungsarbeit
Aus dem Deep Dive zur Glasindustrie geht hervor, dass bis zu 85 % des Gesamtenergiebedarfs der Glasherstellung im Schmelzprozess anfallen. Hier stellt Wasserstoff als Brenngas aus technischer Sicht ein geeignetes Substitut für Erdgas dar. Verglichen mit Erdgas haben dessen unterschiedliche Flammeneigenschaften jedoch Auswirkungen auf den Verbrennungsprozess und damit auf die Glasqualität und den Schmelzofen. Dies motiviert zu vertiefter Forschung zu technischen, prozessseitigen und stofflichen Auswirkungen auf die Glasqualität sowie den Produktionsprozess.

Bedeutung für die Region AachenPLUS

Der regionale Fokus zur Dekarbonisierung der Industrie ist auf die Glasindustrie zu setzen, wobei durch begleitende Forschung die Einsetzbarkeit von Wasserstoff in der Glasproduktion sicherzustellen ist. Für die Papierindustrie sind wegen der vergleichsweise niedrigen Temperaturniveaus alternative Defossilisierungsoptionen zu evaluieren, wie beispielsweise die Direktelektrifizierung. Zudem sind an Industriestandorten mit H_2-Einsatz synergetische Nutzungskonzepte für die Bereitstellung von Raumwärme durch Wasserstoff zu prüfen.

5.2.1. H_2-Potenziale für Prozesswärme

Die Analyse und anschließende Kalkulation der H_2-Bedarfe zur Bereitstellung von Prozesswärme folgt der nachstehend beschriebenen Methode. Da fossile Energieträger durch Grünen Wasserstoff substituiert werden sollen, werden zu Beginn Industriezweige identifiziert, die als größte CO_2-Emittenten innerhalb der Region gelten. Durch Analyse der Liste emissionshandelspflichtiger Anlagen (2019) stellen sich die **Papier-** und **Glasindustrie** sowie die **Metallverarbeitung** als Schlüsselbranchen heraus [40]. Diese werden nachfolgend zur Quantifizierung der H_2-Potenziale herangezogen. Dazu wird zunächst der deutschlandweite Prozesswärmebedarf je Schlüsselbranche erhoben. Als Referenzjahr wird das Jahr 2019 gewählt, um pandemiebedingte Verzerrungen zu vermeiden. Zudem wird über das Verhältnis der Beschäftigtenzahlen der Branchen in der Region AachenPLUS zu Deutschland ein Größenfaktor gebildet, um den regionalen Prozesswärmebedarf je Schlüsselbranche abzuleiten. Anschließend werden via Desk Research die spezifischen Temperaturniveaus der Schlüsselbranchen erhoben, um den Prozesswärmebedarf der Branchen anteilig nach Temperaturniveaus zu kalkulieren (siehe Tabelle 4).

Die Notwendigkeit für eine Clusterung der Prozesswärmebedarfe nach Temperaturniveaus ergibt sich aus prozessbedingten Temperaturanforderungen. Aus Tabelle 4 wird deutlich, dass rund 95 % des Wärmebedarfs in der Glasindustrie – bzw. etwa 97 % in der Metallverarbeitung – im Bereich der Hochtemperaturanwendungen ab 500 °C bis weit über 1000 °C anfallen. Zur Papierherstellung werden hingegen ausschließlich mittlere und niedrige Temperaturniveaus benötigt. [41]

Im Anschluss erfolgt die Berechnung des zu substituierenden Anteils am jeweiligen Prozesswärmebedarf unter der Annahme eines gleichen Energieträgereinsatzes über alle Temperaturniveaus hinweg. Der Anteil am regionalisierten Prozesswärmebedarf zu substituierender fossiler Energie pro Branche wird auf Grundlage der Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland 2019 der AG Energiebilanzen (2020) abgeleitet [42]. Für den Prozesswärmebedarf in der Glasindustrie wird darüber hinaus von einer 85-prozentigen Substitution des Gesamtenergiebedarfs durch Wasserstoff ausgegangen [43]. Diese Annahme begründet sich durch die prozessbedingte energetische Höchstlast im Schmelzvorgang, die im Deep Dive zur techno-ökonomischen Analyse von Wasserstoff in der Glasindustrie beschrieben wird. Im Anschluss werden die jeweils zu substituierenden Energiebedarfe für die Stützjahre 2025, 2030 und 2035 prognostiziert, wofür die Defossilisierungsziele der Bundesregierung herangezogen werden [44].

Tabelle 4: Prozesswärmebedarfe der regionalen Schlüsselbranchen nach Temperaturniveaus [GWh / a] [35]

Prozesswärmebedarfe der Schlüsselbranchen nach Temperaturniveaus [GWh / a]				
	< 100 °C	100 – 500 °C	500 – 1000 °C	> 1000 °C
Glasindustrie	8,22	32,88	246,62	534,34
Papierindustrie	1.321,82	4.972,56	0,00	0,00
Metallverarbeitung	0,69	1,39	13,11	53,35

Die angenommenen Ziele zur CO_2-Reduktion beziehen sich jeweils auf das Jahr 2021. Für das Stützjahr 2025 ergibt sich eine Senkung der THG-Emissionen um 14,3 % im Vergleich zu 2021, welche bis zum Jahr 2030 auf 35,6 % im Vergleich zu 2021 sowie für das Jahr 2035 auf 57,1 % Reduktion im Vergleich zu 2021 ansteigt. Auf diese Weise werden die nachfolgend in Tabelle 5 dargestellten, insgesamt zu substituierenden Prozesswärmeenergiebedarfe der Schlüsselbranchen für die Region AachenPLUS für die betrachteten Stützjahre prognostiziert. Auf welche Weise dieser Energiebedarf gedeckt wird – beispielsweise durch den Einsatz von Wasserstoff, Direktelektrifizierung oder einen Energiemix – obliegt den Unternehmen nach sorgfältiger Einzelfallprüfung. Dies ist abhängig von speziellen Prozessanforderungen oder vorliegender Infrastruktur.

Aus den Daten ist ersichtlich, dass über alle Branchen hinweg ein deutlicher Anstieg am H_2-Bedarf innerhalb der betrachteten Stützjahre zu verzeichnen ist, was auf die Bedeutung eines frühzeitigen Aufbaus einer sicheren H_2-Versorgung hinweist. Zudem wird deutlich, dass insbesondere die Hochtemperaturprozesse in der Glasindustrie und der Metallverarbeitung sowie die Prozesse der Papierindustrie bei vergleichsweise geringen Temperaturniveaus besonders energieintensiv sind. Wegen der hohen Leistungsdichten zur Durchführung der Hochtemperaturprozesse über 500 °C ist nach heutigem Stand der Technik eine Substitution von Erdgas in diesen Fällen durch Direktelektrifizierung im industriellen Maßstab nicht darstellbar. Jene Prozesse sind folglich prädestiniert für die Substitution durch Grünen Wasserstoff.

Tabelle 5: Zu substituierende Prozesswärmebedarfe der Schlüsselbranchen nach Temperaturintervallen pro Stützjahr [GWh / a]

Zu substituierende Prozesswärmebedarfe der Schlüsselbranchen nach Temperaturniveaus und pro Stützjahr [GWh / a]				
	< 100 °C	100 °C – 500 °C	500 °C – 1000 °C	> 1000 °C
2025: Senkung der THG-Emissionen um 14,3 % im Vergleich zu 2021				
Glasindustrie	1,00	3,99	29,89	64,77
Papierindustrie	106,64	401,16	0,00	0,00
Metallverarbeitung	0,09	0,19	1,87	7,22
2030: Senkung der THG-Emissionen um 35,6 % im Vergleich zu 2021				
Glasindustrie	2,48	9,91	74,35	161,09
Papierindustrie	265,23	997,77	0,00	0,00
Metallverarbeitung	0,23	0,47	4,66	17,95
2035: Senkung der THG-Emissionen um 57,1 % im Vergleich zu 2021				
Glasindustrie	3,97	15,90	119,22	258,30
Papierindustrie	425,29	1.599,88	0,00	0,00
Metallverarbeitung	0,37	0,75	7,48	28,79

Dabei zeigt vor allem die Glasindustrie ein besonders hohes Potenzial zur Nutzung von Wasserstoff auf, was die Durchführung des techno-ökonomischen Deep Dives in Kapitel 5.2.4 begründet. Die erforderlichen Temperaturniveaus der Prozesse stellen aber nicht den einzigen Grund für den zukünftigen H_2-Einsatz dar. So kann der Verbrennungsprozess den Produktionsprozess und die Produktqualität beeinflussen. Zudem bestehen teilweise Befürchtungen, eine rein elektrische Versorgung böte in Zukunft keine vollständige Versorgungssicherheit, die für bestimmte Produktionsprozesse jedoch unabdingbar ist.

Für die Papierindustrie können aufgrund der niedrigeren Temperaturniveaus auch andere Optionen zur Defossilisierung, wie Hochtemperaturwärmepumpen oder Direktelektrifizierung, wirtschaftliche und technisch sinnvolle Lösungen darstellen. Hierbei muss ausdrücklich darauf hingewiesen werden, dass gerade in der Papierindustrie Einzelfallbetrachtungen vorzunehmen sind, in denen die Unternehmen ihre zukünftige Energieversorgung evaluieren. Der zukünftige Anteil des Wasserstoffs am Prozesswärmebedarf ist dabei von individuellen Voraussetzungen abhängig, wie der Verfügbarkeit von Wasserstoff, des Anschlusses an das elektrische Netz, des Prozesses oder vorhandener Energieversorgungsanlagen. Auf Grundlage des Leistungsberichtes PAPIER 2021 wird ein für die Region Aachen-PLUS adaptierter Größenfaktor von etwa 11,8 % für den H_2-Einsatz im zu substituierenden Prozesswärmebedarf unterstellt [45] [46].

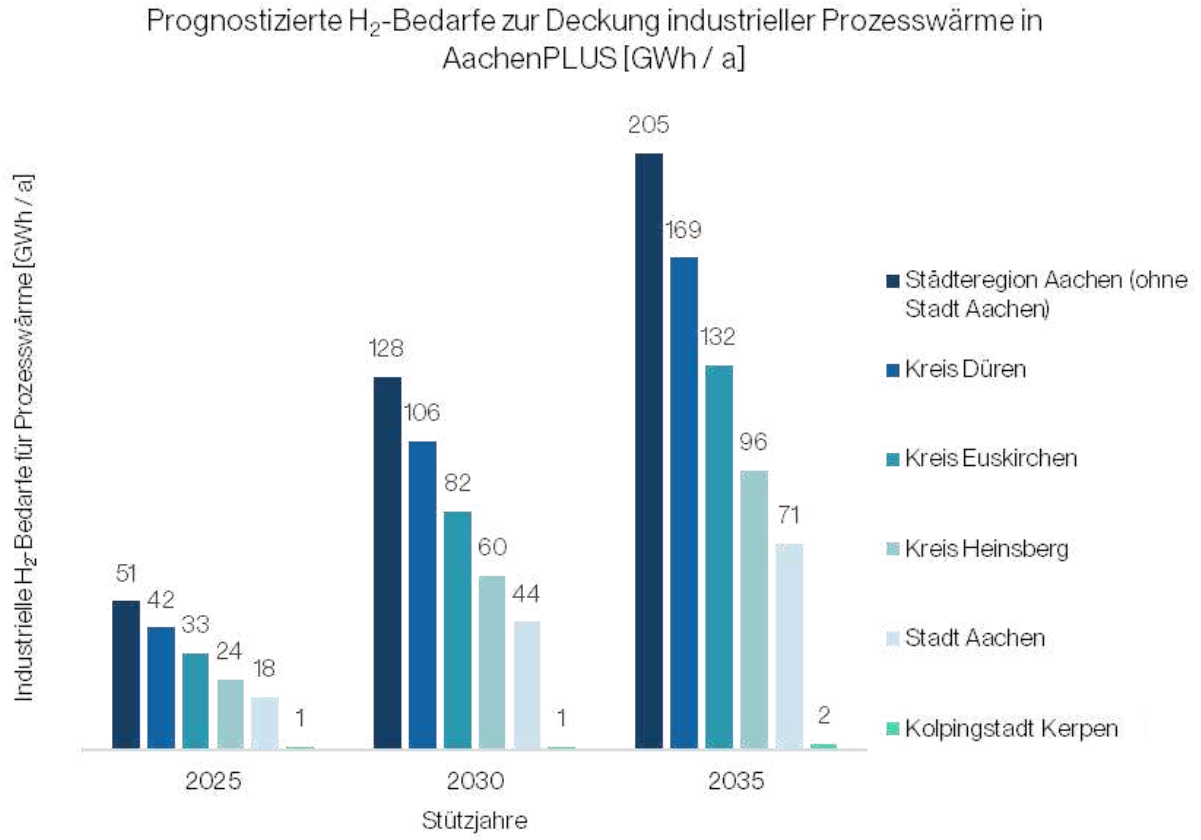


Abbildung 25: Industrielle H_2-Bedarfe für Prozesswärme in AachenPLUS nach Stützjahren

Erst kürzlich haben viele Papierhersteller in der Region AachenPLUS von Braunkohle auf Gas umgestellt und praktizieren eine geschlossene Kreislaufwirtschaft unter Nutzung der Rejecte[10] und Biogas aus eigenen Kläranlagen sowie dem energieeffizienten Einsatz von Kraft-Wärme-Kopplung. Sie produzieren somit ihren eigenen Strom und müssten bei einer vollständigen Elektrifizierung gegebenenfalls Strom dazukaufen. Die Umstellung von Gas auf Wasserstoff kann zudem je nach Entwicklung ökonomisch sinnvoll sein, weil sonst Investitionen abgeschrieben sowie Rejecte gesondert und kostenpflichtig entsorgt werden müssten.

Die errechneten H_2-Bedarfe der Schlüsselbranchen werden auf die betrachteten Kreise Düren, Euskirchen, Heinsberg, die StädteRegion Aachen und die Stadt Aachen sowie die Kolpingstadt Kerpen projiziert und nach Stützjahren dargestellt, wie der Abbildung 25 zu entnehmen ist. Dabei wird die Anzahl der Branchenbeschäftigten innerhalb der einzelnen Kreise [48] herangezogen, um die kreisscharfen H_2-Bedarfe nach Schlüsselbranchen und Stützjahren aufzuführen. Dem Diagramm sind neben einem zeitlichen Anstieg des H_2-Bedarfs auch regionale Unterschiede zu entnehmen. Dies begründet sich durch regional unterschiedlich stark ausgeprägte Industrie sowie die dabei vertretenen Branchen. Die StädteRegion Aachen weist den höchsten H_2-Bedarf zur Deckung der Prozesswärme auf, da hier unter anderem Saint-Gobain mit zwei Produktionsstandorten (in Stolberg und Herzogenrath) einen hohen Wärmebedarf aufweist, welcher wie bereits beschrieben - nach heutigem Technologiestand – voraussichtlich nicht vollständig direktelektrifiziert werden kann. Der genaue Elektrifizierungsgrad kann auf Grundlage des heutigen Entwicklungsstandes nur unter hoher Unsicherheit prognostiziert werden. Die in Düren dominierende Papierindustrie begründet den hohen kumulierten Prozesswärmebedarf des Kreises. Ob dieser prozesswärmebedarf, wie in den betrachteten Studien beschrieben, tatsächlich durch Direktelektrifizierung abgedeckt werden kann, ist im Einzelfall zu prüfen und lässt sich daher nicht abschließend bewerten. Daraus können sich deutliche Abweichungen in der H_2-Bedarfsprognose ergeben. Der Prozesswärmebedarf im Kreis Euskirchen wird laut herangezogener Datenbasis vor allem von den Schlüsselbranchen Glas- und Papierindustrie geprägt, während er in den anderen Gebietskörperschaften zum großen Teil durch die Glasindustrie bedingt ist. Für die Kolpingstadt Kerpen ergibt sich der Bedarf laut Datenbasis durch Aktivitäten in der Papierbranche.

5.2.2. H_2-Potenziale für Raumwärme und Warmwasser

Die Erhebung des H_2-Bedarfs zur Bereitstellung von Raumwärme erfolgt analog zur vorhergien Methode. So werden dieselben Schlüsselbranchen wie bei der Ermittlung der Prozesswärme fokussiert, doch anstelle der Prozesswärmebedarfe wird der spezifische Raumwärme- und Warmwasserbedarf erhoben [42]. Auch hier wird als Referenzjahr das

[10] Rejecte sind Verunreinigungen (grobe Fasern, Kunststoffe und Feuchtigkeit), die im Recyclingprozess von Altpapier getrennt werden.[47]

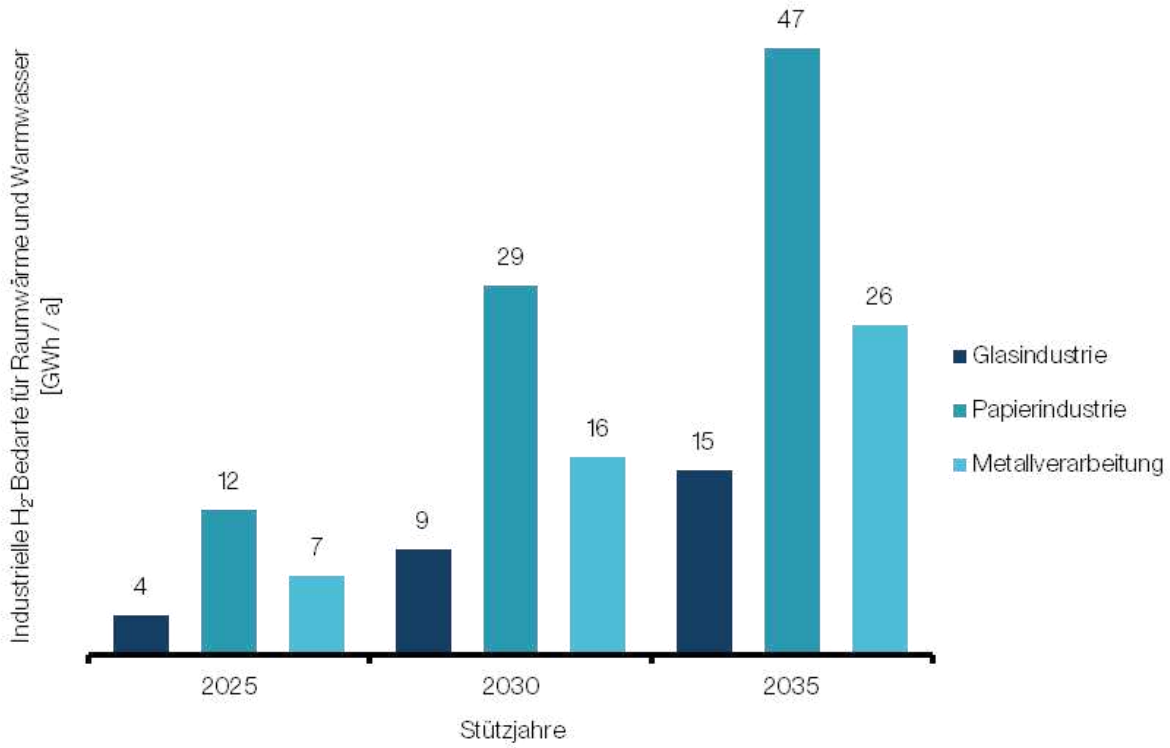


Abbildung 26: Industrielle H_2-Bedarfe für Raumwärme und Warmwasser nach Schlüsselbranchen und Stützjahren

Jahr 2019 gewählt, um pandemiebedingte Bedarfsabweichungen zu berücksichtigen.

Unter Einsatz des vorliegenden Regionalisierungsfaktors werden die Raumwärmebedarfe der einzelnen Schlüsselbranchen kalkuliert und der hierbei durch Grünen Wasserstoff zu substituierende Anteil fossiler Energieträger ermittelt.
Der prognostizierte H_2-Bedarf zur Deckung der Raumwärme wird anschließend gemäß der Methodik aus Kapitel 5.2.1 ebenfalls auf die einzelnen Stützjahre 2025, 2030 und 2035 projiziert.

Die Kalkulation zeigt analog zu den Ergebnissen des Kapitels 5.2.1 einen branchenübergreifenden Anstieg der H_2-Bedarfe über den betrachteten Zeitraum, der durch die steigenden EU-Ziele zur Reduktion von THG-Emissionen begründet ist. Dem ist anzufügen, dass die Bereitstellung von Raumwärme durch Wasserstoff generell eine technisch mögliche Option ist. Hier ist jedoch eine individuelle Einzelfallprüfung durchzuführen, da gegebenenfalls auch Abwärme aus Produktionsprozessen oder aus der Elektrolyse eingesetzt werden kann. Eine Umstellung der Raumwärmeversorgung für Unternehmen, die sonst keinen produktionsbegründeten Bedarf an Wasserstoff aufweisen, wird unter Einbezug alternativer nachhaltiger Heiztechnik in vielen Fällen als nicht wirtschaftlich verstanden.

5.2.3. H_2-Potenziale für die stoffliche Nutzung

Die stoffliche Nutzung von Wasserstoff ist stark abhängig von der betrachteten Branche und der Produkte bzw. Produktionsprozesse. Der stoffliche Einsatz von Wasserstoff in den Fertigungsprozessen der drei fokussierten Schlüsselbranchen Glasindustrie, Papierindustrie sowie Metallverarbeitung wurde untersucht. Dabei wird resümiert, dass Wasserstoff in den betrachteten Industrien in der Region AachenPLUS eher in Einzelfällen, wie den Prozessen bei der Aurubis GmbH & Co. KG und der Schöllerwerk GmbH & Co. KG stofflich genutzt wird. Darüber hinaus wird Wasserstoff vom Pharmaunternehmen Grünenthal GmbH stofflich eingesetzt.

Nachfolgend wird der stoffliche Bedarf an Wasserstoff für die drei Schlüsselbranchen in der Region argumentiert: Beim Walzen bzw. Warmwalzen von Nichteisenmetallen wird Wasserstoff stofflich nicht benötigt. Bei einer Bleihütte in der StädteRegion Aachen kommt das QSL-Verfahren[11] zum Einsatz, welches sich verglichen mit konventionellen Schachtofenanlagen durch bessere Umweltverträglichkeit auszeichnet [50] [51]. Aktuell werden Untersuchungen zum H_2-Einsatz im QSL-Prozess durchgeführt, sodass zukünftig der stoffliche Einsatz von Wasserstoff in der Verhüttung von Blei eine technisch machbare Lösung darstellen könnte. Für eine fundierte Aussage zu stofflichen H_2-Potenzialen und den Bedarfen über die betrachteten Stützjahre ist allerdings noch weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeit erforderlich. Auch in der Papierindustrie wird kein stofflicher Einsatz von Wasserstoff erfolgen. In der Glasindustrie ist ein bewusster stofflicher Eintrag von Wasserstoff in das Glas nicht gegeben. Es sind jedoch detaillierte Untersuchungen erforderlich, um die thermochemischen Auswirkungen der Substitution von Erdgas durch Wasserstoff als Brennmedium in der Glasbranche zu untersuchen. Zusammengefasst wird der stofflichen Nutzung von Wasserstoff ein generell hoher Stellenwert zugeschrieben, jedoch wird in den analysierten Schlüsselbranchen der betrachteten Region AachenPLUS Wasserstoff zur stofflichen Nutzung nicht oder nur in vernachlässigbaren Quantitäten benötigt.

[11] Metallurgisches Verfahren zur Bleigewinnung, Benannt nach den Erfindern Queneau, Schuhmann & Lurgi [49]

5.2.4. Deep Dive: Techno-ökonomische Analyse der Eignung von Wasserstoff in der Glasindustrie

In den vorangegangenen Unterkapiteln wird im Zuge von Emissions- und Energiebedarfsanalysen die Glasindustrie der Region AachenPLUS als besonders gewichtig herausgestellt. Im Fokus stehen dabei aufgrund der besonders hohen Energiebedarfe die beiden Standorte von Saint-Gobain in Stolberg und Herzogenrath. Aufgrund der hohen erforderlichen Temperaturniveaus und der damit einhergehenden schwierigen Elektrifizierbarkeit stellt Grüner Wasserstoff eine vielversprechende Defossilierungsoption dar. Allein im Schmelzprozess, welcher als energieintensivster Produktionsschritt der Glasherstellung gilt, könnten deutschlandweit durch den Einsatz von Grünem Wasserstoff rund 3,3 Mio. t CO_2 pro Jahr eingespart werden [46] [52]. Auf die Region AachenPLUS projiziert, entspricht dies einer CO_2-Reduktion von bis zu 546.000 t CO_2 pro Jahr. Gleichzeitig kann Wasserstoff aufgrund der im Vergleich zu Methan unterschiedlichen Flammengeschwindigkeit und -temperatur sowie insbesondere wegen bei der Verbrennung freigesetzten Wasserdampfes die Qualität von Glaserzeugnissen verändern. Diese Ambivalenz zwischen Erfordernis und Komplexitätsanstieg begründet die Durchführung des Deep Dives zur techno-ökonomischen Analyse der Eignung von Wasserstoff in der Glasindustrie.

5.2.4.1. Methodenbeschreibung

Der Deep Dive zur techno-ökonomischen Analyse von Wasserstoff in der Glasindustrie folgt einer strukturiert-explorativen Vorgehensweise. Der aktuelle Stand der Forschung wird in einem Akteursgespräch mit einem regionalen Branchenvertreter diskutiert, um Kernaussagen zu den drei betrachteten Themenschwerpunkten des Deep Dives zu verifizieren. Dies ist insbesondere aufgrund der Aktualität des Forschungsfeldes erforderlich, da die Datenlage Aussagen zur Eignung von Wasserstoff lediglich unter Unsicherheiten ermöglicht. Der Deep Dive behandelt dabei drei wesentliche Themenschwerpunkte:

1. Beschreibung des Glasherstellungsprozesses und Identifikation der für den H_2-Einsatz geeigneten bzw. zu fokussierenden Prozessschritte.
2. Untersuchung der Einflüsse der H_2-Beimischung im Brenngasgemisch
   a. auf die technische, prozessseitige Perspektive sowie
   b. auf die Glasqualität.
3. Ökonomische Bewertung des H_2-Einsatzes in der Glasindustrie.

Schließlich erfolgt der Vergleich zwischen theoretischer und praktischer Perspektive und deren Zusammenführung im Rahmen von drei Folgerungen. Dieses Vorgehen schafft einen wissenschaftlich fundierten Forschungsrahmen, der durch Aussagen von Branchenvertretern gestützt wird.

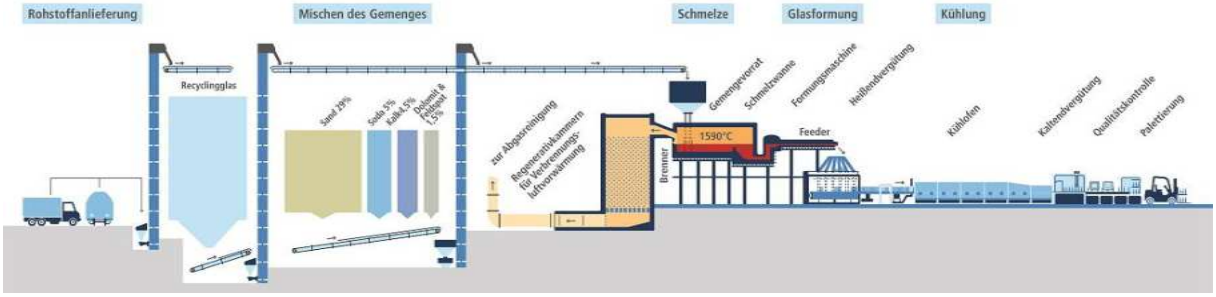


Abbildung 27: Prozesskette der Glasherstellung (Quelle: BV Glas [45])

5.2.4.2. Der Prozessablauf zur Glasherstellung

Nachfolgend wird der Glasherstellungsprozess beschrieben. Im Allgemeinen wird bei Glaserzeugnissen zwischen Behälterglas, Flachglas oder Spezialglas unterschieden, die jeweiligen Produktionsprozesse sind jedoch zu großen Teilen kongruent. Hauptunterschiede bestehen vor allem in der Materialzusammensetzung, der Formgebung und Veredelung der Endprodukte [43]. Da aus dem Register emissionshandelspflichtiger Anlagen [40] innerhalb der untersuchten Region AachenPLUS ausschließlich Standorte zur Flachglasproduktion entnommen werden, konzentriert sich der Deep Dive auf die Beschreibung des Herstellungsprozesses von Flachglaserzeugnissen.

Nach Anlieferung der Rohstoffkomponenten, wie zum Beispiel Sand, Kalk, Soda, Dolomit, Feldspalt und Recycling-Glas, wird die sogenannte Charge, das Gemisch aus Einzelrohstoffen, aufgeschmolzen. In der Glasschmelzwanne[12] werden dafür Temperaturen von rund 1.500 °C bis 1.600 °C erzeugt, was zumeist unter Einsatz fossiler Brennstoffe wie Erdgas erfolgt. Durchläuft die Charge die Glasschmelzwanne, ist sie beim Eintritt noch inhomogen sowie intransparent und muss zunächst bis zum Schmelzpunkt erwärmt werden, wohingegen sie nach Erreichung der geforderten Schmelztemperatur transparent wird und im hinteren Bereich der Glasschmelzwanne durch weitere Wärmestrahlung vollständig homogenisiert und von Blasen befreit wird [43]. Dieser Feuerungsprozess kann bis zu 85 % des gesamten Erdgasbedarfes der Glasproduktion und damit auch 85 % der erdgasbedingten CO_2-Emissionen verursachen [43]. Als primärer Energieträger deckt Erdgas etwa 70 % des Gesamtenergiebedarfs der Glasbranche, was einem Jahresverbrauch von 13,5 TWh gleichkommt [46]. Auf den Schmelzprozess entfällt folglich ein Verbrauch von 9,45 TWh. Bei der Produktion von Behälterglas durchläuft das geschmolzene Gemisch einen sogenannten Feeder (dt. Vorherd bzw. Speiser), um auf einer vorgegebenen Temperatur thermisch homogenisiert zu werden und dadurch die zur Formgebung erforderliche Viskosität zu erreichen. Auch im Feeder wird der Wärmebedarf durch die Verbrennung von Erdgas gedeckt. Dieser Prozessschritt entfällt allerdings bei der Herstellung von Flachglas und nimmt demzufolge im Deep Dive eine untergeordnete Rolle ein.

[12] Aus Gründen der Lesbarkeit wird in diesem Deep Dive nicht zwischen verschiedenen technischen Ausführungen von Glasschmelzwannen differenziert.

Die Formgebung erfolgt in einem Temperaturintervall zwischen 600 °C bis 1.200 °C.

Anschließend wird das Glas in einem Kühlofen bei ca. 100 °C bis 600 °C sukzessive abgekühlt, um thermisch induzierte Eigenspannungen kontrolliert abzubauen und somit Produktschädigungen zu vermeiden [53]. Der Produktionsprozess von Glaserzeugnissen endet mit umfangreichen Qualitätskontrollen. Es folgen Verpackung, Lagerung und Versand der Ware [43].

5.2.4.3. Prozessschritte mit Eignungspotenzial für Wasserstoff als Energieträger

Zwecks Defossilisierung der Industrie ist der Einsatz von Wasserstoff besonders in jenen Prozessschritten anzustreben, die zur Bereitstellung hoher Energiemengen auf die Verbrennung fossiler Energieträger angewiesen und wegen hoher Leistungsdichten nicht oder nur zu hohen Kosten elektrifizierbar sind. In der Glasbranche sind demnach besonders die Hochtemperaturprozesse in der Glasschmelzwanne, der Weitertransport im Feeder, sowie die kontrollierte Abkühlung im Kühlofen für den Einsatz von Wasserstoff prädestiniert. Nähere Untersuchungen und vertiefte Recherchen zeigen, dass bei der regionalen Betrachtung in diesem Deep Dive insbesondere die Glasschmelzwanne von Interesse ist, da Kühlöfen aufgrund des vergleichsweise geringen Temperaturniveaus zukünftig vollständig elektrifiziert werden können [43], während Feeder nur in der Produktion von Behälterglas eingesetzt werden und demnach für die Flachglasindustrie der Region Aachen-PLUS irrelevant sind.

In verschiedenen Studien wird davon ausgegangen, dass neben dem Einsatz von Wasserstoff auch die Elektrifizierung in der Glasindustrie zukünftig stark an Bedeutung gewinnen wird [46] [9] [11]. So gibt es bereits vollelektrische Glasschmelzwannen, welche jedoch vielfach kleiner dimensioniert sind, um die geforderten Leistungsdichten zu erreichen [43]. Die Elektrifizierung von Glasschmelzwannen der Größenordnung > 200 Tonnen pro Tag ist technisch hingegen sehr aufwändig [43]. Um die hohen Bedarfe an fossiler Energie im Schmelzprozess zu mindern, rückt die Hybridisierung von Glasschmelzwannen immer stärker in den Fokus [54]. So wurde im Jahr 2020 in einem Zusammenschluss von 20 europäischen Glasherstellern ein Forschungsvorhaben zur Entwicklung eines großen Hybrid-Elektro-Schmelzaggregates initiiert [55]. Dieses weltweit erste Aggregat wird als Oxy-Fuel-Hybridwanne bezeichnet und soll bis zu 80 % seines Energiebedarfs mit Ökostrom decken und somit Erdgas weitestgehend substituieren, was die CO_2-Emissionen um bis zu 50 % verringern kann [56]. Die Anlage soll dabei ein tägliches Produktionsvolumen von über 300 t Glas ermöglichen und dabei zur Herstellung jeder beliebigen Farbe sowie dem Einsatz großer Mengen Recycling-Glases geeignet sein [56]. Die im Vergleich zu konventionellen Schmelzwannen hohen Investitions- und Betriebskosten stellen derzeit jedoch eine Herausforderung dar.

5.2.4.4. Folgerung 1: Herstellungsprozess von Glaserzeugnissen

Aus der Prozessbeschreibung geht hervor, dass die Produktion von Glaserzeugnissen besonders energieintensiv ist und die erforderliche Wärmemenge durch Verbrennung von Erdgas bereitgestellt wird. Dabei ist das Aufschmelzen des granularen Primärgemisches in der Glasschmelzwanne mit einem Anteil von bis zu 85 % des Gesamtenergiebedarfes der größte Treiber. Folglich ist die Substitution fossiler Energieträger gerade in diesem Prozessschritt anzustreben. Die vollständige Elektrifizierung von Glasschmelzwannen ist technisch zwar umsetzbar, jedoch zum aktuellen Zeitpunkt für industrielle Anlagen mit hohen Produktionsmengen von über 200 Tonnen pro Tag unwirtschaftlich. Somit stellen die Hybridisierung von Glasschmelzwannen sowie der Einsatz von Wasserstoff als Energieträger attraktive Defossilisierungsoptionen dar. Prozessschritte mit geringen Temperaturniveaus sind elektrifizierbar.

Durch das Expertengespräch werden die genannten Einsatzmöglichkeiten von Wasserstoff im Glasproduktionsprozess bestätigt. In einem konkreten Beispiel zu einer Produktionsstraße mit 30 MW thermischer Leistung wird die Umstellung auf 22 MW Wasserstoff und 8 MW Elektrizität genannt. Dabei wird Wasserstoff zunächst nur als Übergangslösung betrachtet mit dem langfristigen Ziel einer zukünftigen Komplettelektrifizierung des Prozesses. Jedoch ist dabei die Gewährleistung einer 100-prozentigen Stromverfügbarkeit unerlässlich, da Glasschmelzwannen durchgehend betrieben werden und ein Ausfall schwerwiegende Konsequenzen für den gesamten Produktionsprozess hätte. Aufgrund der für die nächsten Jahre als unsicher prognostizierten Verfügbarkeit von Wasserstoff in großen Mengen wird bei der Erwägung des H_2-Einsatzes eine werkseigene H_2-Produktion in Form einer Elektrolyseanlage evaluiert. Dabei soll entstehende Abwärme beispielsweise als Fernwärme ausgekoppelt werden und erzeugter Sauerstoff im Oxy-Fuel-Verfahren Anwendung finden.

5.2.4.5. Wasserstoff in der Glasindustrie: Potenziale und Herausforderungen

Der zuvor beschriebene Sachverhalt motiviert zur Defossilisierung der besonders energieintensiven Glasschmelzwanne. In diesem Kontext wird nachfolgend auf die Folgen des Einsatzes von Wasserstoff im Glasherstellungsprozess eingegangen. Die Beimischung von Wasserstoff bis hin zur vollständigen Substitution von Erdgas resultiert in neuen Verbrennungsbedingungen wie höherer Flammentemperatur oder veränderter Flammenlänge und -geschwindigkeit. Aufgrund der erhöhten Flammentemperatur sind höhere thermische NO_X-Emissionen zu erwarten [53]. Zudem kann der bei der Verbrennung von Wasserstoff freigesetzte Wasserdampf die Qualität der Glaserzeugnisse beeinflussen [53].

Insgesamt unterscheiden sich Wasserstoff und Erdgas, welches zumeist aus mindestens 90 Vol.-% Methan besteht, deutlich in ihren physikalischen und thermochemischen Eigenschaften, was eine Substitution erschwert bzw. genaue Untersuchungen erfordert. Ein Vergleich der Eigenschaften findet sich im Anhang unter Tabelle 13. Zur Defossilisierung der klassischen Glasschmelzwanne, deren Hauptenergieträger Erdgas ist, wird nachfolgend die Substitution fossiler Brennstoffe durch Grünen Wasserstoff diskutiert. Die aktuelle Forschungslandschaft im beschriebe-

nen Kontext beschränkt sich auf wenige Pilotprojekte und weist vergleichsweise wenige Publikationen und Fachliteratur auf.

Betrachtet wird das Forschungsprojekt HyGlass des Gas- und Wärme-Institut Essen e. V. (GWI) und des Bundesverbands Glasindustrie e. V. (BV Glas) [43], welches Einsatzmöglichkeiten von Wasserstoff-Erdgas-Gemischen sowie von reinem Wasserstoff in Glasschmelzwannen untersucht. Dabei wird durch Experimente und Simulationen aufgezeigt, dass der H_2-Einsatz im Schmelzprozess technisch machbar ist. Allerdings muss die Brennerleistung und Luftzahl durch ein geeignetes Regelungssystem konstant gehalten werden, um die Ofentemperatur und damit den Wärmestrom in die Schmelze zu erhalten. Aufgrund der exponentiellen Temperaturabhängigkeit der thermischen Stickoxidbildung ist wegen der höheren Flammentemperatur bei H_2-Beimischungen eine Erhöhung der NO_X-Emissionen zu verzeichnen. Der Verlauf der NO_X-Konzentration hat sein Maximum bei einer H_2-Beimischung von 30 Vol.-%, nimmt jedoch bei steigendem H_2-Anteil wieder ab [43]. Die erhöhten Stickoxidemissionen können zudem durch technische Stellgrößen im Prozess beeinflusst werden.

Neben den technischen, prozessseitigen Faktoren beeinflusst der H_2-Einsatz auch die Glasqualität in erheblichem Maße. In der analysierten Studie [43] werden Hinweise auf Zusammenhänge zwischen Glasqualität, Glasfärbung, Glasmenge und H_2-Beimischung identifiziert. So kann wegen unterschiedlicher Flammeneigenschaften bei der Verbrennung von Wasserstoff freigesetzter Wasserdampf beispielsweise Auswirkungen auf die Glasfärbung verursachen. Die Einflüsse des H_2-Gehalts im Brenngas auf die Glasfärbung können jedoch durch Anpassung der Glasgemengezusammensetzung korrigiert werden. Dies hat allerdings zur Folge, dass sich die Beimischungsrate von Wasserstoff nicht kontinuierlich ändern darf, da dies eine ständige Angleichung der Glasgemengezusammensetzung zur Folge hätte. Weitere vertiefende Untersuchungen sind erforderlich, um fundierte Aussagen auf weitere Einflüsse von Wasserstoff auf die Glasherstellung tätigen zu können. Neben den prozessseitigen Restriktionen und Veränderungen durch den Einsatz von Wasserstoff als Brennmedium sind insbesondere auch die Auswirkungen auf die Glaserzeugnisse zu beachten. Im Rahmen des Forschungsprojektes HyGlass [43] wird ein Einfluss der Verbrennungsrandbedingungen auf die Glaseigenschaften bzw. die -qualität erkannt.

5.2.4.6. Folgerung 2: Wasserstoff als Brennmedium in der Glasindustrie

Die literaturbasierte Analyse des Potenzials von Wasserstoff als Brennmedium in der Glasindustrie legt dar, dass eine teilweise oder vollständige Substitution von Erdgas durch Wasserstoff im Ansatz technologisch gut umsetzbar und praktikabel ist. Die im Vergleich zu Erdgas unterschiedlichen Flammeneigenschaften von Wasserstoff haben jedoch Auswirkungen auf den Verbrennungsprozess. Resultierende Ofentemperaturen oder Wärmeströme in die Schmelze sowie erhöhte Stickoxidkonzentrationen können durch prozessseitige Adjustierungen geregelt werden. Auswirkungen des durch die Verbrennung von Wasserstoff freigesetzten Wasserdampfs auf die Glasqualität können durch Anpassung des Glasgemisches entgegnet werden, doch ist dies mit hohem F&E-Aufwand verbunden, insbesondere bei

einer kontinuierlichen Erhöhung oder Fluktuation der H_2-Anteile im Gasgemisch.

Durch das Expertengespräch werden die beschriebenen möglichen Auswirkungen auf den Herstellungsprozess sowie die Glasqualität bestätigt und um weitere Herausforderungen erweitert, die Anreize zu weiterer Forschung liefern. So kann die Zugabe insbesondere feiner Recycling-Glasscherben zur Schaumbildung in der Glasschmelze führen, was die Wärmeübertragung in die Glasschmelze beeinträchtigt. Zwar tritt dieses Phänomen auch im herkömmlichen Schmelzprozess auf, doch wird der Effekt durch die höhere Wasserdampfkonzentration bei der Oxy-Fuel-Verbrennung verstärkt. Zudem sind die Feuerfeststeine, welche die Umwandung der Glasschmelzwannen bilden, insbesondere durch den Einsatz von Wasserstoff betroffen. Dieses Phänomen kann allerdings auch bei der vollständigen Elektrifizierung auftreten. Ein weiterer fertigungstechnischer Faktor, welcher durch die erhöhten Flammentemperaturen verursacht wird, ist die elektrische Leitfähigkeit von Glas. Diese ändert sich in Abhängigkeit bestimmter Temperaturintervalle, sodass beim Erwärmen des Grundstoffes bis zur Schmelze verschiedene Stadien der Leitfähigkeit durchlaufen werden, was potenziell zu einem Kurzschluss führen kann. Schließlich wird u. a. im Kontext des Oxy-Fuel-Verfahrens eine Atmosphäre aus Wasserdampf erzeugt, was, wie bereits zuvor beschrieben, signifikante Auswirkungen auf die Glasqualität haben kann und demnach prozessseitige Adjustierungen erfordert. Demnach ist sowohl bezüglich technischer, prozessseitiger Auswirkungen als auch bezüglich stofflicher Auswirkungen auf die Glasqualität vertiefte Forschungsarbeit zu leisten.

5.2.4.7. Ökonomische Bewertung des H_2-Einsatzes in der Glasindustrie

Nachfolgend wird auf die Wirtschaftlichkeit der Nutzung von Wasserstoff bei der Herstellung von Glas eingegangen. Damit der Einsatz von Wasserstoff aus ökonomischer Perspektive eine Alternative zu der mit Erdgas befeuerten herkömmlichen Produktionsmethode darstellt, muss die Kostenparität zumindest annähernd erreicht werden. Faktoren, die dabei betrachtet werden müssen, sind der Gaspreis, der Emissionszertifikatepreis und eine erhöhte Zahlungsbereitschaft seitens der Kunden für nachhaltig produzierte Glaswaren.

Erdgas ist der Energieträger, der durch den Wasserstoff substituiert wird. Steigt der Erdgaspreis, so ist auch Wasserstoff bei höheren Kosten konkurrenzfähig. Sinkt der Erdgaspreis, so darf der Wasserstoff auch nur entsprechend weniger kosten. Aufgrund des russischen Angriffskriegs und der damit einhergehenden Entwicklungen befinden sich die Erdgaspreise für Nicht-Haushaltskunden mit einem durchschnittlichen Preis von 7,08 ct / kWh im Jahr 2022 vor Steuern und Abgaben (Bedarf 277.778 bis < 1.111.111 MWh) auf einem hohen Niveau. Zum Vergleich: In den Jahren 2019 bis 2021 lagen die durchschnittlichen Erdgaspreise zwischen 1,31 und 2,81 ct/kWh. [57] Hinzu kommen auf den Gaspreis Steuern und Abgaben. Die Energiesteuer macht für gewöhnlich mit 0,55 ct / kWh nach §2 Abs. 3 Nr. 4 EnergieStG den größten Anteil an Steuern und Abgaben aus (MwSt. ausgenommen). Nach §51 EnergieStG fällt die Herstellung von Glas und Glaswaren unter die für bestimmte Prozesse und Verfahren geltende Steuerentlastung, weshalb dieser

Betrag nicht gezahlt werden muss. Konzessionsabgaben stellen einen weiteren Kostenblock dar. Nach §2 KAV Abs. 3 beträgt der Höchstbetrag für Sondervertragskunden 0,03 ct / kWh. Dieser Betrag muss allerdings nur für die ersten 5 GWh gezahlt werden (vgl. §2 KAV Abs. 5). Über die Liste Emissionshandelspflichtiger Anlagen [40] publizierte Schadstoffausstöße betrachteter Betriebe in der Region AachenPLUS wird ein durchschnittlicher Erdgasverbrauch pro Glashersteller von 451,34 GWh / a berechnet. Wird der Betrag der Konzessionsabgaben durch diese Menge dividiert, so ergeben sich gerundet Konzessionsabgaben in Höhe von 0 ct / kWh. Neben dem Gaspreis, der Energiesteuer, sowie der Konzessionsabgaben müssen Netzentgelte einberechnet werden. [57] gibt durchschnittliche Kosten von 0,18 ct / kWh an. Für die nächsten Jahre werden sinkende Erdgaspreise im Vergleich zu den Werten von 2022 prognostiziert. Der Erdgaspreis vor Steuern und Abgaben pendelt sich ab dem Jahr 2028 auf einem konstanten Niveau von 1,5 – 3,5 ct / kWh (unterer und oberer Preispfad) ein [58]. Der Erdgaspreis wird sich laut Prognosen demnach mindestens halbieren, was niedrigere H_2-Kosten im Vergleich zu 2022 erfordert, um konkurrenzfähig zu bleiben.

Die Glasindustrie gehört zu den Industrien, die unter das European Union Emissions Trading System (EU ETS) fallen. Vereinfacht ausgedrückt erfolgt im EU ETS die Bepreisung von Treibhausgasemissionen. In den letzten Jahren sind die Preise für die Emissionszertifikate signifikant gestiegen. Im Jahr 2020 lag der Zertifikatspreis pro Tonne CO_2-Äquivalent im Durchschnitt bei 24,61 €, im Jahr 2021 bei 52,50 € und im Jahr 2022 bei 80,32 € [59]. Bei der Verbrennung von Erdgas werden pro kWh Emissionen von 0,2 kg $CO_{2\text{-eq}}$ ausgestoßen [60]. Demnach werden für Erdgas Kosten in Höhe von ca. 1,6 ct / kWh fällig. Aufgrund der Systematik des Emissionshandels ist mit Steigerungen der Zertifikatspreise in den nächsten Jahren zu rechnen. Je nach Quelle gibt es unterschiedliche Prognosen, auf welches Niveau der Preis steigen wird. So sind Preise von 88 € / t $CO_{2\text{-eq}}$ in 2025, 120 € / t $CO_{2\text{-eq}}$ für 2030 und 155 € / t $CO_{2\text{-eq}}$ für 2035 zu erwarten [58]. Für 2035 entspricht dies Mehrkosten von ca. 3,1 ct / kWh Erdgas.

Ein weiterer Faktor besteht in der möglichen, höheren Zahlungsbereitschaft von Kunden für nachhaltige Produkte. Umfragen zum Einkaufsverhalten von Endkonsumenten zeigen, dass Preisanstiege von bis zu 20 % für nachhaltige Produkte möglich sind [61]. Allerdings zeigt eine neue Studie wiederum einen rückläufigen Effekt zu einer geringeren Zahlungsbereitschaft für nachhaltige Produkte [62]. Es wird daher die Annahme einer zukünftigen Zahlungsbereitschaft von 110 % im Vergleich zu heute für nachhaltige Glaserzeugnisse getroffen. Im Jahr 2015 wurde mit der Herstellung von 2.143 kt Flachglas ein Umsatz von 1,1 Mrd. € erwirtschaftet. Dies entspricht ca. 513 € / t Flachglas. Eine um 10 % erhöhte Zahlungsbereitschaft ermöglicht demnach Mehrkosten in Höhe von 51,3 € / t Flachglas. Pro kWh Brennstoff entspricht dies ca. 2,3 ct / kWh (2.143 kt / 0,987 TWh Brennstoffe) [63]. Es sei darauf hingewiesen, dass dies eine grobe Schätzung ist, die der Indikation dient.

Um den Wert zu errechnen, bei dem Kostenparität zwischen Erdgas und Wasserstoff erreicht wird, können die Werte der einzelnen Einflussfaktoren addiert werden. Für das Jahr 2022 ergeben sich folgende Werte: Erdgas: 7,08 ct / kWh, Energiesteuer: 0 ct / kWh, Konzessionsabgaben: 0 ct / kWh, Netzentgelte: 0,18 ct / kWh, Emissionskosten: 1,6 ct / kWh sowie höhere Zahlungsbereit-

schaft: 2,3 ct / kWh. Dies ergibt einen Betrag von 11,16 ct / kWh. Bei der Umrechnung dieser Kosten auf Wasserstoff ergibt sich ein Betrag von 3,72 € / kg_{H2} zur Erreichung der Kostenparität mit Erdgas inklusive einer erhöhten Zahlungsbereitschaft.

5.2.4.8. Folgerung 3: Ökonomische Eignung von Wasserstoff in der Glasindustrie

Damit Wasserstoff aus ökonomischer Sicht eine Alternative zur herkömmlichen Versorgungsoption mit Erdgas darstellt, sollte annähernd Kostenparität erreicht werden. Der Erdgaspreis, der CO_2-Preis und die erhöhte Zahlungsbereitschaft für nachhaltige Produkte stellen die drei Faktoren dar, die das paritätische H_2-Preisniveau definieren. Mit Sicht auf die heutigen Produktionspreise von Wasserstoff und das Kostenparitätsniveau stellt der Einsatz von Wasserstoff derzeit nicht die wirtschaftlichste Option dar. Das Kostenparitätsniveau variiert mit der Zeit, da die Einflussfaktoren Trends ausgesetzt sind: Beispielsweise wird der Gaspreis über die Zeit entsprechend der meisten Prognosen wieder auf ein vorkrisenähnliches Niveau sinken und der CO_2-Preis wird aufgrund der Systematik des Emissionshandelssystems steigen. Die Faktoren können prognostiziert werden, allerdings unterliegen diese einer gewissen Unsicherheit.

Um die noch existierenden Preisunterschiede zwischen tatsächlicher H_2-Produktion und Kostenparitätsniveau auszugleichen sowie die Unsicherheit der Entwicklung der einzelnen Faktoren abzusichern, zeichnet sich durch CCfDs (Carbon Contracts for Difference) eine mögliche Lösung ab. Bei CCfDs, die auch als Klimaschutzverträge bezeichnet werden, handelt es sich um ein Produkt aus der Finanzbranche. Das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gibt folgendes Beispiel für ein besseres Verständnis an:

„Unternehmen A, das mittels herkömmlicher Technologie produziert, hat Produktionskosten von zehn Euro für ein Gut und muss zusätzlich für fünf Euro Emissionszertifikate für den CO_2-Ausstoß der Produktion kaufen. Insgesamt liegen die Produktionskosten des Gutes also bei 15 Euro. Solange der CO_2-Preis relativ niedrig ist, ist die Produktion von Unternehmen A mit herkömmlichen Technologien günstiger als für Unternehmen B, das mithilfe einer teureren, treibausgasneutralen Technologie produziert und Produktionskosten von 16 Euro hat. Die sogenannten CO_2-Vermeidungskosten bei Unternehmen B betragen sechs Euro. Der Staat und das Unternehmen B können nun einen CCfD abschließen, der die Differenz zwischen dem Marktpreis für Emissionszertifikate und den CO_2-Vermeidungskosten ausgleicht. In unserem Beispiel beträgt diese Differenz einen Euro (sechs Euro CO2-Vermeidungskosten minus fünf Euro Zertifikatepreis). Ist der Marktpreis für Emissionszertifikate niedriger als die CO_2-Vermeidungskosten, zahlt der Staat den Differenzbetrag an Unternehmen B. Im umgekehrten Fall muss Unternehmen B die Differenz zahlen.“ [64]

Dieses Konzept wurde unter anderem vom Bundesverband Glasindustrie gefordert [65] und wird nun mit dem Förderprogramm Klimaschutzverträge in der Industrie angewendet. Unternehmen der Glasindustrie können sich demnach bewerben [66]. Mit der Etablierung von CCfDs kann die klimafreundliche Technologie gegenüber der konventionellen Technologie ökonomisch interessant werden

und einen Beitrag zur Defossilisierung der Glasindustrie liefern.

5.3. Gebäude

In diesem Abschnitt erfolgt die Untersuchung des H_2-Einsatzes in Gebäuden. Zunächst wird dabei aufgezeigt, welche Rolle Wasserstoff in den gängigen Szenarien zur Entwicklung der Energiewirtschaft spielt. Dabei unterscheiden sich die Szenarien in der Prognose der H_2-Bedarfe für den Gebäudesektor, weisen aber auch Gemeinsamkeiten auf. Anschließend wird Verteilinfrastruktur als Voraussetzung für die H_2-Nutzung in Gebäuden diskutiert, bevor abschließend auf die Voraussetzungen der H_2-Nutzung hinsichtlich der unterschiedlichen Gebäude mitsamt den technischen Geräten eingegangen wird.

Hauptaussagen auf einen Blick

Umstellung in der Fläche ist aufwändig
Die heutigen Gas-Verteilnetze enthalten eine Vielzahl von Betriebsmitteln, die für eine Umstellung auf Wasserstoff ausgetauscht werden müssen. Aufgrund von Tiefbau ist dies kostenintensiv. Fachkräftemangel und unsichere Lieferketten erschweren dies zusätzlich. Die Beimischung von Wasserstoff führt schon bei relativ geringen Anteilen zu ähnlichen Anforderungen.

Anforderungen an Geräte sind lösbar
Geräte für die Verwendung von Erdgas-Wasserstoff-Gemischen sind bereits marktgängig. Solche für reinen Wasserstoff könnten kurzfristig verfügbar sein. Allerdings stehen diese oft in Konkurrenz zu Technologien wie Wärmepumpen, Fernwärme oder Pelletheizungen. Ein echter Technologiewettbewerb wird durch die fehlende flächige Umstellung der Versorgung nicht erzeugt.

Wasserstoff wird willkommene Sonderlösung
Für spezielle, schwierige Fälle der Gebäudewärme (z.B. schwer zu dämmen, denkmalgeschützt, keine Fernwärme) kann Wasserstoff eine willkommene Lösung darstellen. Ebenso in regional begrenzten Anwendungen, wenn er aus anderen Gründen ohnehin zur Verfügung steht. Als Basislösung für eine Mehrheit der Fälle scheint er nicht naheliegend.

Bedeutung für die Region AachenPLUS

In der Region AachenPLUS wird voraussichtlich kein flächendeckender Wasserstoffeinsatz in Gebäuden stattfinden. Trotzdem kann die Verwendung von Wasserstoff unter bestimmten Voraussetzungen eine geeignete Lösung für die Gebäude- bzw. Quartiersversorgung darstellen. Hierfür ist eine individuelle Prüfung des Vorhabens notwendig. Auch aus der kommunalen Wärmeplanung sind konkrete Ergebnisse in Bezug auf die lokale Sinnhaftigkeit der Wasserstoffnutzung in Quartieren zu erwarten.

5.3.1. Wasserstoff in Szenarien der Energiewirtschaft

Die Frage nach der Zukunft von Wasserstoff im Gebäudesektor bzw. zur Bereitstellung von Raumwärme wird anhand von Zukunftsszenarien diskutiert und beschrieben. Heutige Klimaneutralitätsszenarien, also Szenarien, die Klimaneutralität Deutschlands bis 2045 annehmen, lassen sich in zwei Typen unterteilen. Zum einen Typus gehören „Molekül-Szenarien", in denen ein höherer Anteil des Energietransports sowie der Endenergieverwendung in Form von gasförmigen Brennstoffen wie synthetischem Methan oder Wasserstoff erfolgt. Den zweiten Typus bilden die „Elektronen-Szenarien", bei denen Stromtransport und Stromanwendungen eine noch größere Rolle einnehmen.

Die Gemeinsamkeiten zwischen beiden Szenariotypen sind größer als ihre Unterschiede. Neben der bereits genannten Erreichung der Klimaziele weisen insbesondere folgende Merkmale Gemeinsamkeiten zwischen den Szenarien auf: Die gesteigerte Effizienz (Rückgang des Endenergieverbrauchs um rund ein Drittel des Wertes von 2019), die starke Elektrifizierung (auch im „Molekül-Szenario"), Steigerung des Stromverbrauchs um 70 – 80 % durch neue Anwendungen (beispielsweise Wärmepumpen, Elektromobilität), der starke Ausbau der EE sowie die Verwendung von Wasserstoff im Energiesystem.

In diesen Szenarien zeigt die Verwendung von Erdgas eine stark rückläufige Tendenz, die nur zum Teil durch den Hochlauf von Wasserstoff oder gegebenenfalls synthetischem Methan kompensiert wird. Bezüglich dieser Kompensation ist zu beachten, dass diese nicht flächendeckend erfolgen kann, da eine Beibehaltung der heutigen, weit verteilten Gasinfrastruktur für einen deutlich geringeren Durchsatz an Gas nicht kosteneffizient ist. Eine Kompensation von zum Beispiel 20 % würde demnach nicht bedeuten, dass durch alle heutigen Verteilnetze noch 20 % der heutigen Gasenergie fließen. Vielmehr ist die Aussage, dass noch ca. 20 % der Gasnetze eine Funktion haben, die sachgerechte Interpretation. Es ist also mit einem deutlichen Rückgang der Gasverteilinfrastruktur zu rechnen. Aus den Szenarien lässt sich allerdings die zentrale Bedeutung des Energieträgers Wasserstoff ableiten, die auch zwischen den Szenarien-Typen sehr ähnlich ist. Die Funktion von Wasserstoff besteht in der Versorgung industrieller Prozesse, insbesondere solcher mit hohem Temperaturniveau, saisonaler Speicherung, der Versorgung von Rückverstromungskraftwerken zur Überbrückung von wind- und sonnenarmen Perioden (sog. „Dunkelflauten") sowie als Importgut. Besonders diese Aufgaben werden im Energiesystem der Zukunft laut gängiger Szenarien von Wasserstoff erfüllt.

5.3.2. Verteilinfrastrukturen als Voraussetzung für Wasserstoff in Gebäuden

In Deutschland existieren ca. 700 Gasverteilnetze mit einer Gesamtlänge von über 470.000 km. In den vergangenen Jahren wurde die Rolle dieser Netze im defossilisierten Energiesystem intensiv diskutiert. Insbesondere die Option, Wasserstoff dem Erdgas für eine Übergangszeit beizumischen, wird dabei als Option angeführt. Jedoch stellt sich vermehrt heraus, dass die Herkunft (Erzeugung, Import) des Wasserstoffs ein Kernproblem der Transformation darstellt. Eine Beimischung als Option zur Verwendung löst dieses Beschaffungsproblem nicht.

Wie bereits dargelegt, ist von einem deutlichen Rückgang der Verteilinfrastrukturen für gasförmige Brennstoffe auszugehen. Eine Ursache dafür besteht darin, dass die Umstellung vorhandener Gasverteilnetze auf Wasserstoff auch für die Beimischung sehr aufwändig und kostenintensiv ist. Dabei stellen weniger die Rohrleitungen Probleme dar als vielmehr die Armaturen, z. B. die Absperrarmaturen wie Kugelhähne und Schieber. Oftmals wird hier Guss als Herstellungsmaterial verwendet. Dieser ist allerdings aufgrund der Diffusions- und Permeationsgefahr für die Verwendung im H_2-Umfeld nicht geeignet. Gleichwohl gibt es Armaturen, die geeignet und zugelassen sind. Es bedarf jedoch eines personellen (Tiefbau) und finanziellen Aufwandes, die Vielzahl von verteilten Armaturen der 700 Verteilnetze auszutauschen.

Bezüglich der Infrastrukturen und ihrer flächendeckenden Verwendung als „H_2-Verteilnetze“ ist darum von folgenden Eckpunkten auszugehen: Die Eignung mancher Betriebsmittel ist bereits bei H_2-Anteilen von mehr als 10 % fraglich oder nicht gegeben. Ein Austauschbedarf ist die Folge. Die H_2-Beimischung (außerhalb von Demonstrationsprojekten oder Erprobung) ist unwahrscheinlich, solange Wasserstoff ein knappes Gut ist. Der Austausch betroffener Armaturen erfordert neben den Materialkosten auch Aufwendungen für Tiefbau (Zeit und Geld). Die große Anzahl der Netze und die hohe Stückzahl der auszutauschenden Betriebsmittel pro Netz machen die Umrüstungsaufgabe – wenn auch lokal unterschiedlich – sehr herausfordernd. Zusätzliche Probleme können aus der Beschaffung (Supply Chain) sowie dem Mangel an Fachkräften entstehen. Von einer flächendeckenden Umwidmung der Gasverteilnetze auf Wasserstoff ist daher aus heutiger Sicht in der Region AachenPLUS nicht auszugehen. In bestimmten Teilgebieten kann diese allerdings erfolgen.

5.3.3. Gebäude und Geräte

Bezogen auf die Verwendung von Wasserstoff in Gebäuden ist zunächst ein Blick auf den zukünftigen Wärmebedarf hilfreich. Wie eingangs ausgeführt, beinhalten alle Klimaschutzszenarien intensive Bemühungen zur Effizienzsteigerung. Dies manifestiert sich auch in einem Rückgang des Wärmebedarfes um ca. ein Drittel durch energetische Sanierung im Bestand und hohe Dämmstandards im Neubau.

Vom Gebäudetyp und den Rahmenbedingungen ist dabei abhängig, welche Heizungsarten zum Einsatz kommen werden. Um die Klimaziele zu erreichen, ist ein vorrangiger Einsatz von nachhaltiger Fernwärme sinnvoll, sofern sie in Gebäudenähe vorhanden oder ausbaubar ist. Daneben spielen vor allem elektrisch betriebene Luft-Wasser-Wärmepumpen eine zunehmende Rolle. Diese sind insbesondere für Gebäude mit großen Heizflächen (Fußbodenheizung) leicht einsetzbar, da die Vorlauftemperatur dieser Heizsysteme niedrig ist. Es werden zunehmend auch Wärmepumpenanlagen mit höheren Temperaturniveaus geplant und verbaut. Sole-Wasser-Wärmepumpen spielen aufgrund der höheren Investitionskosten und des größeren baulichen Aufwandes eine zahlenmäßig geringere Rolle, sind jedoch effizienter als die genannten Luft-Wasser-Systeme.

Insbesondere bei niedrigem Dämmstandard und schwierigen Sanierungsbedingungen (z. B. durch Denkmalschutz) in Kombination mit fehlender Nah- oder Fernwärme sind die Herausforderungen besonders hoch.

Tendenziell werden in derartigen Sonderfällen konventionelle Systeme, wie bestehende Gas- oder Ölheizungen, am längsten weiterbetrieben. Je nach Lage und Beschaffenheit des Gebäudes können Holzpellets eine Lösungsoption darstellen, auch ist die punktuelle Verwendung von synthetischen, flüssigen oder gasförmigen Brennstoffen vorstellbar. Insbesondere im Segment der Sonderfälle kann Wasserstoff eine effiziente Lösung darstellen.

Das Vorhandensein von Geräten zur Gebäudeerwärmung stellt eine weitere Herausforderung dar. Eine marktgängige Lösung besteht in sogenannten „H_2-Ready"-Geräten. Diese sind bis auf Weiteres mit Erdgas zu betreiben und vertragen auch eine anteilige Beimischung von Wasserstoff zum Erdgas. Im Falle einer sukzessiven Erhöhung des beigemischten H_2-Anteils sind besagte H_2-Ready-Geräte mit geringem Aufwand auf erhöhte H_2-Anteile bzw. vollständige H_2-Bereitstellung umrüstbar. Aufgrund der bereits dargelegten Einschätzung zur Zukunft der Gasnetze wird dies jedoch voraussichtlich nicht als flächendeckendes Massenphänomen verstanden, sondern als Lösungsoption für Sonderfälle. Das Wechselspiel von fehlendem Wasserstoff in den Netzen und fehlender Nachfrage durch nicht vorhandene H_2-Geräte stellt einen infiniten Regress dar. Im Rahmen der anstehenden kommunalen Wärmeplanungen können unter Beachtung der Verteilinfrastruktur lokal Gebäude oder Quartiere identifiziert werden, bei denen eine Wärmeversorgung mit Wasserstoff geeignet ist. Auch die Umsetzung von Demonstrationsprojekten zur Quartiersversorgung unter Einbeziehung von Wasserstoff kann sinnvoll sein. Hierfür sind allerdings Einzelfallbetrachtungen nötig, bei denen die lokalen Gegebenheiten zu untersuchen sind. Zudem erlauben solche Projekte das Sammeln von Betriebserfahrungen.

5.4. Forschung, Entwicklung und Implementierung

Ein Alleinstellungsmerkmal der Region AachenPLUS ist die hohe Dichte an Forschungs- und Wissenschaftseinrichtungen mit technisch-naturwissenschaftlichem Bezug, aber auch im Bereich des Wasserstoffs. In der Region sind zahlreiche renommierte Institute der Grundlagen- und angewandten Forschung angesiedelt.

Dies bietet großes Potential beim Aufbau einer H_2-Wirtschaft sowie bei der Anwendung bestehender Kompetenzen. Die in diesem Kapitel vorgestellten Ergebnisse der Analyse der Akteure und Projekte in der Region geben einen Überblick über die regionale Verteilung der H_2-Aktivitäten.

Hauptaussagen auf einen Blick

Hohe Dichte an Forschungseinrichtungen
Die RWTH Aachen, die FH Aachen, das Forschungszentrum Jülich und das Helmholtz-Cluster sowie weitere Einrichtungen sind ein Alleinstellungsmerkmall und Standortvorteil der Region. Diese sind ein relevanter Bestandteil der sich entwickelnden Wasserstoffwirtschaft.

Forschung als Grundlage für funktionierende Wasserstoffwirtschaft
Die Forschung stellt eine wichtige Grundlage und ein hohes Synergiepotenzial für umzusetzende Projekte durch vorhandene Kompetenzen, Erfahrungen und der höheren Wahrscheinlichkeit des Erhalts von Fördergeldern dar. Dieses Synergiepotenzial sollte bei dem Aufbau der Wasserstoffwirtschaft maximal genutzt werden. Cluster von bestehenden Forschungseinrichtungen in direkter Nähe zu entstehenden Projekten sind bereits gut zu erkennen.

Entwicklung der regionalen Wertschöpfung
In der Region sind sowohl Forschungseinrichtungen als auch Technologieunternehmen mit Schwerpunkten entlang der gesamten Wasserstoffwertschöpfungskette angesiedelt. Explizit die Bereiche Wasserstofferzeugung, Infrastruktur und Mobilität sind durch lokale Technologieunternehmen besonders stark vertreten.

Bedeutung für die Region AachenPLUS

Die Region AachenPLUS bietet eine hohe Dichte an Forschungs- und Entwicklungseinrichtungen im Wasserstoffbereich. Die in der Region entwickelten Technologien sollen möglichst auch dort gemeinsam mit Partnern aus der Wirtschaft erprobt und produziert werden. Eine verstärkte Zusammenarbeit von Forschung und Wirtschaft kann einen wichtigen Beitrag zur regionalen Wertschöpfung sowie für den Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft leisten

5.4.1. Definition und Abgrenzung der Akteure zu Projekten in der Region

Die Region AachenPLUS weist neben der großen Anzahl an Forschungseinrichtungen die hochschulischen Bildungseinrichtungen Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (RWTH Aachen) und Fachhochschule Aachen – University of Applied Sciences (FH Aachen) sowie eine bedeutende Anzahl an Technologieunternehmen auf, die für unterschiedliche Wertschöpfungsstufen Technologie entwickeln. Da sowohl die RWTH Aachen und die FH Aachen als auch das Forschungszentrum Jülich maßgeblich zur H_2-bezogenen Forschung beitragen, werden diese als eine Gesamtinstitution dem Bereich Forschungseinrichtungen zugeordnet. Sie repräsentiert die unzähligen im Bereich Wasserstoff forschenden Institute. Die Differenzierung von Technologieunternehmen und Forschungseinrichtungen wird durch das Hauptziel der Akteure vorgenommen. Bei Technologieunternehmen stehen die Entwicklung, Produktion und der wirtschaftliche Vertrieb von Technologien im Vordergrund, während bei Forschungseinrichtungen die Grundlagenforschung fokussiert wird. Zudem haben insbesondere Forschungseinrichtungen Zugang zur Finanzierung aus Drittmitteln und Förderprojekten.

Abbildung 28 zeigt, dass die Abgrenzung der Aktivitäten im Bereich Forschung und Wissenschaft in dieser Studie anhand von vier verschiedenen Umsetzungsstufen charakterisiert wird. Strategische Planungen und Studien bilden die erste Stufe zur Ermittlung der Ziele und Gegebenheiten bezüglich H_2-Bedarf, -Erzeugung, -Hochlauf etc.

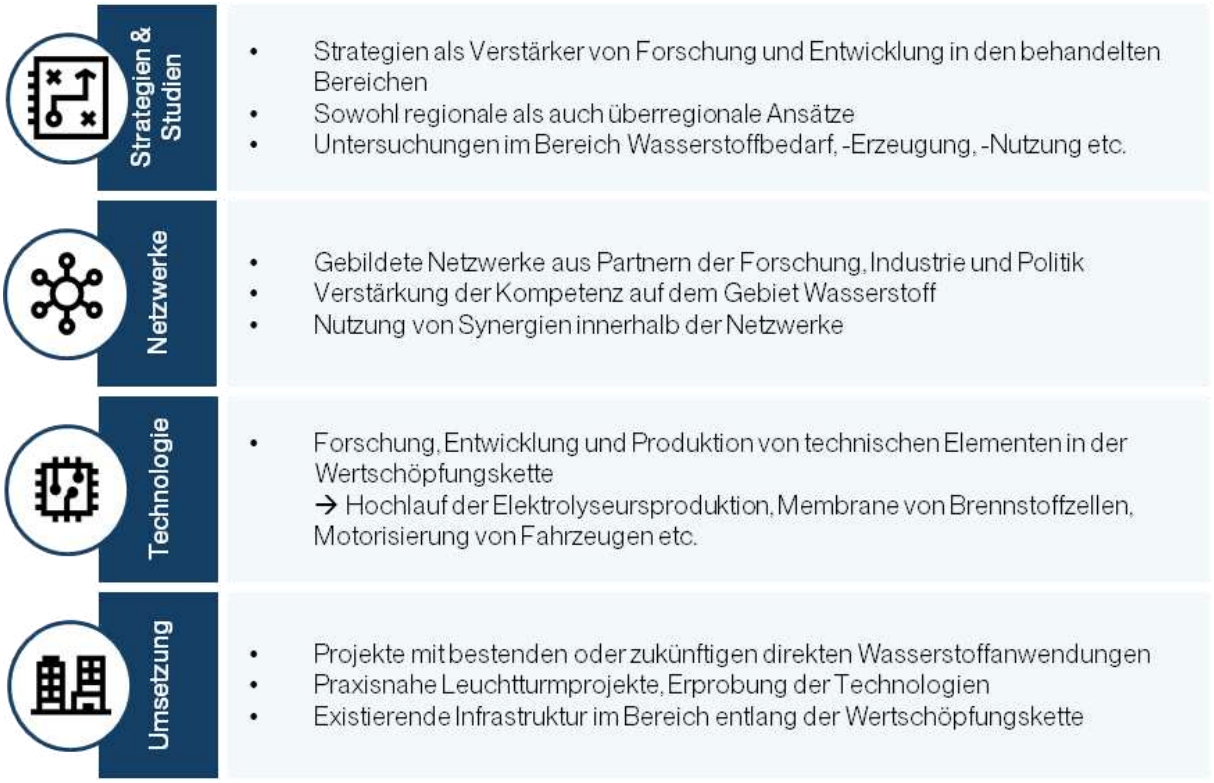


Abbildung 28: Stufen der Umsetzung von Vorhaben im H_2-Bereich

Sie dienen als erste Orientierung für entstehende Projekte und Kooperationen. Die zweite Stufe repräsentiert Netzwerke aus Partnern der Forschung, Industrie, Politik, Wirtschaft und Gesellschaft. Netzwerke dienen der Kompetenzverstärkung auf dem Gebiet Wasserstoff und der Nutzbarmachung vorliegender Synergien. Die dritte Stufe ist die Stufe der Technologieentwicklung, welche sich aus Erforschung, Entwicklung und Produktion von technischen Elementen in der Wertschöpfungskette zusammensetzt. Die vierte Stufe beschreibt schließlich die Umsetzung in Form von praxisnahen Demonstrationsprojekten und der Erprobung von Technologien. Charakteristisch sind bestehende oder zukünftige direkte H_2-Anwendungen und der Aufbau einer Infrastruktur entlang der H_2-Wertschöpfungskette. Die Forschung erstreckt sich somit von den Anfängen und Ideen zum Aufbau einer H_2-Wirtschaft bis hin zur Umsetzung konkreter Projekte.

5.4.2. Analyse der Akteure und Projekte in der Region

Die Identifikation von Akteuren und Projekten in der Region verläuft über eine vorgelagerte Abfrage innerhalb der Kreise und Regionen. Die Auswertung der Fragebögen bildet die Grundlage der entstandenen Datenbank, die durch eigene Internetrecherchen und den Abgleich mit Partnern erweitert wird.

Folgend werden zunächst die Akteure, also Forschungseinrichtungen und Technologieunternehmen charakterisiert und anschließend die Projekte, bestehend aus Studien, Netzwerken sowie forschungsnahen und anwendungsnahen Projekten, beschrieben.

Forschungseinrichtungen und Technologieunternehmen in der Region Aachen

Die Analyse der Forschungseinrichtungen und Technologieunternehmen zeigt eine Konzentration der Akteure in der Stadt Aachen, der StädteRegion Aachen und dem Kreis Düren. Insbesondere in direkter Umgebung der Forschungseinrichtungen RWTH Aachen und FZ Jülich sind bedeutende Akteure angesiedelt.

Die hohe Anzahl an Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern und der Erhalt von über 800 Mio. € Drittmitteln der RWTH Aachen und des Forschungszentrums Jülich verdeutlicht die Relevanz der regionalen Forschung. Die RWTH Aachen gehört damit zu den Hochschulen in Deutschland mit den meisten öffentlich finanzierten Forschungsgeldern [67]. Die Bedeutung der Forschungseinrichtungen in der Region für die H_2-orientierte Forschung ist enorm. Die technische sowie ingenieur- und naturwissenschaftliche Ausrichtung der RWTH Aachen und des Forschungszentrums Jülich bieten eine breite Grundlage der Forschung an H_2-relevanten Themen.

Tabelle 6: Kurzvorstellung der RWTH Aachen [71], des FZJ [72] und FH Aachen [73]

Einrichtung	Personal	Institute	Finanzvolumen
RWTH Aachen University	10.272 (Beschäftigte 2022)	260 Institute	1.108 Mio. € gesamt davon (408 Mio.€ aus Drittmitteln)
Forschungszentrum Jülich	7.120 (Beschäftigte 2022)	11 Institute 88 Institutsbereiche	861 Mio. € gesamt (395 Mio. € aus Drittmitteln)
FH Aachen	1.140	17 Institute	<15 Mio. € aus Drittmitteln

Insgesamt werden in der Region 21 Technologieunternehmen und zwölf Forschungseinrichtungen mit Bezug zur H_2-Wertschöpfungskette identifiziert. Den Forschungseinrichtungen lässt sich aufgrund ihrer Größe kein expliziter Forschungsschwerpunkt innerhalb der H_2-Wertschöpfungskette zuordnen.

Entgegen der themenspezifischen Anordnung der Technologieunternehmen agieren die zahlreichen verschiedenen Forschungseinrichtungen entlang der gesamten H_2-Wertschöpfungskette. Bezüglich der Abdeckung der gesamten H_2-Wertschöpfungskette, die in Abbildung 29 abgebildet ist, wird deutlich, dass die Region im Bereich H_2-Erzeugung, Infrastrukturentwicklung und Komponenten für Mobilitätsanwendungen zahlreiche Institutionen beheimatet. Lediglich im Teilbereich Unternehmen, die industrielle H_2-Anwendungen entwickeln, sind in der Region keine Technologieunternehmen vertreten. Die Forschung und Entwicklung in der Region kann durch die Abdeckung aller Wertschöpfungsstufen den Grundstein für weitere Forschungs-, Demonstrations- oder Pilotprojekte legen, wodurch Forschungseinrichtungen wichtige Synergiepartner darstellen.

Außerdem werden in anwendungsnahen Projekten durch die Beteiligung von Forschung und Entwicklung Fördergelder mobilisiert, welche ohne deren Mitwirken nicht erreichbar sind.



Abbildung 29: Einordnung der Akteure entlang der H_2-Wertschöpfungskette

Neben der Einordnung der Forschungseinrichtungen und Technologieunternehmen in die H_2-Wertschöpfungskette erfolgt darüber hinaus eine geografische Einordnung der Standorte, die in Abbildung 30 abgebildet ist.

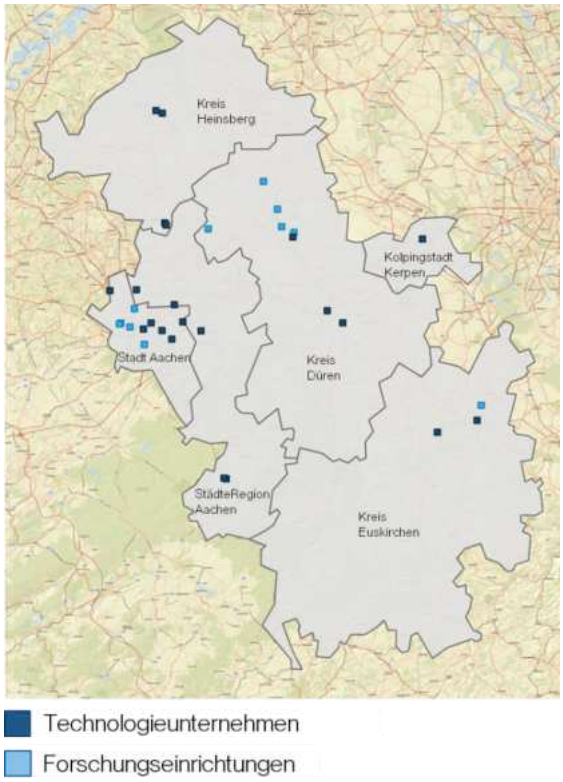


Abbildung 30: Geografische Einordnung der Akteure aus Forschung und Wissenschaft

Die höchste Akteursdichte befindet sich in direkter Umgebung der Städte Aachen und Jülich. Weitere, weniger umfangreiche Cluster an Technologieunternehmen und Forschungseinrichtungen befinden sich bei Monschau, Heinsberg, Düren, Euskirchen, Stolberg und Übach-Palenberg. In den übrigen Kreisen und Regionen ist die Dichte an Akteuren im Vergleich zu den Clusterregionen niedriger. Dort treten die Technologieunternehmen und Forschungseinrichtungen nur vereinzelt auf.

Projekte in der Region AachenPLUS

Die zahlreichen Technologieunternehmen, Forschungsgruppen und -institute in der Region bilden einen der Gründe für die Ansiedelung zahlreicher Projekte der Grundlagenforschung entlang der gesamten H_2-Wertschöpfungskette. Im Fokus der Recherche stehen jedoch Projekte, die direkt zum Aufbau der H_2-Wirtschaft beitragen oder diesen vorbereiten. Diese Projekte werden gemäß Kapitel 5.4.1 in Strategien und Studien, Netzwerke und Demonstrationsprojekte eingeteilt.

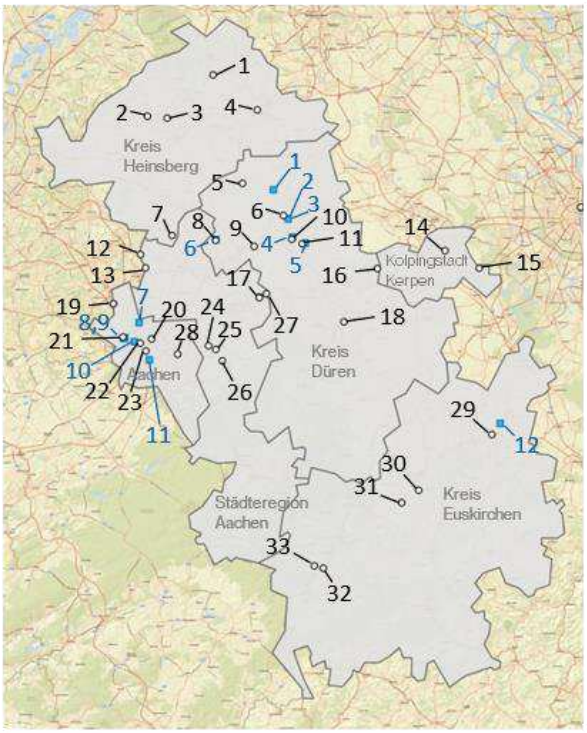
Die grundlegende strategische Entwicklung der H_2-Wirtschaft in den teilnehmenden Kreisen ist größtenteils durch eigene Strategien und H_2-Studien beschrieben. So haben neben den kreisübergreifenden Strategien der „Wasserstoff-Roadmap für Nordrhein-Westfalen“ und „H2R Wasserstoff Rheinland“ bereits die Stadt und StädteRegion Aachen, der Kreis Düren, der Kreis Euskirchen sowie der Rhein-Erft-Kreis eigene Leitfäden bzw. Roadmaps oder H_2-Potenzialstudien zur Entwicklung einer H_2-Wirtschaft. Auch in den angrenzenden Regionen wurden bereits Studien und Strategien erstellt. Weitere spezifische Studien ebnen den Weg für den Aufbau einer funktionierenden H_2-Wirtschaft in der Region.

Besonders ausgeprägt in der Region AachenPLUS ist die Anzahl der bestehenden Netzwerke für H_2-bezogene Themengebiete. Neben dem Aufbau von Partnernetzwerken soll der Markthochlauf von Technologien gefördert, H_2-Anwendungen in der Region forciert, Kompetenzen aus Wirtschaft, Forschung und Öffentlichkeit gebündelt sowie die Region als H_2-Modellregion etabliert werden. Ein zentrales Netzwerk ist der Hydrogen Hub Aachen der u. a. den Bedarf an Forschungs- und Entwicklungskompetenzen sowie Infrastrukturen ermittelt, Innovationspro-

zesse initiiert und bei der Entwicklung neuer Geschäftsmodelle unterstützt. Ein weiteres bedeutendes Netzwerk ist zudem das Zukunftscluster Wasserstoff, das vorhandene Kompetenzen im Bereich der H_2-Technologien in und um Aachen mit Akteuren aus Wirtschaft, Wissenschaft und Gesellschaft vereint. Dabei wird die gesamte Wertschöpfungskette von der Erzeugung über die Speicherung und Verteilung bis hin zur Nutzung betrachtet. Neben den auf H_2-Themen beschränkten Netzwerken spielen weitere Netzwerke aus dem Bereich Klimaschutz und Wirtschaftsentwicklung eine maßgebende Rolle für die Umsetzung einer funktionierenden H_2-Wirtschaft.

Anknüpfend an die oben beschriebenen Technologieunternehmen in der Region bilden die Forschungs- und Demonstrationsprojekte die letzte Stufe der Implementierung einer H_2-Wirtschaft. Neben den vorgestellten Unternehmen und Einrichtungen agieren auch Kreise, öffentliche Trägerschaften und andere Akteure in dem Bereich. Im Folgenden wird zwischen den forschungsnahen Projekten, die nicht direkt zum Aufbau einer H_2-Infrastruktur beitragen sowie den anwendungsnahen Projekten, die einen Grundstein für die zukünftige H_2-Infrastruktur legen, unterschieden. In der Untergruppe der forschungsnahen Projekte existieren einige Projekte an den oben genannten Forschungseinrichtungen. Diese werden aufgrund der Vielzahl vereinfacht durch die Forschungseinrichtungen auf der Karte in Abbildung 31 repräsentiert. Die anwendungsnahen Projekte werden diesbezüglich in einer Datenbank gesammelt und ebenfalls auf der Karte in Abbildung 31 dargestellt.

Insgesamt werden für die Region 32 Projekte ermittelt, die einen Beitrag zur zukünftigen H_2-Infrastruktur leisten oder diese vorantreiben. Dabei werden auch Projekte berücksichtigt, die indirekt unterstützen, beispielsweise durch den Betrieb eines Testzentrums für H_2-betriebene Fahrzeuge. Auf der Karte in Abbildung 31 wird deutlich, dass bereits heute zahlreiche H_2-bezogene Projekte in der Region existieren. Diese decken die vollständige Wertschöpfungskette ab; von der EE-Stromerzeugung, über die Erzeugung von Grünem Wasserstoff, der Verteilung, Speicherung und Aufbereitung von Wasserstoff sowie die verschiedenen Anwendungsbereiche in den Sektoren Industrie, Gebäude, Mobilität und mehr. Außerdem sind diese häufig in direkter räumlicher Nähe von Industrie oder Forschungseinrichtungen zu finden. Somit ergeben sich die größten Cluster in der Stadt Aachen und im Kreis Düren. Dies bestätigt die Annahme, dass die Forschung ein wichtiger Grundpfeiler der Entwicklung einer regionalen H_2-Wirtschaft ist.



Nr.	Forschungseinrichtung
1	Fraunhofer IEG
2	Helmholtz-Cluster Wasserstoff
3	Solar-Institut Jülich
4	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
5	Forschungszentrum Jülich
6	Aldenhoven Testing Center
7	Fraunhofer IEG
8	Fraunhofer IPT
9	RWTH Aachen
10	Forschungszentrum für Rationalisierung
11	FH Aachen
12	Fraunhofer INT

Forschungseinrichtungen

Projekte

Nr.	Projekt
1	H2GoesRail
2	Grünstromportfolio
3	H2HS
4	Multi-SOFC
5	H2-Linnich
6	Brainergy Park Jülich
7	MAPEVA
8	Wasserstoffcampus Aldenhoven
9	Wind2Move
10	DLR – Institute for Future Fuels
11	Helmholtzcluster Wasserstoff
12	Energiepark Herzogenrath
13	COSiMA
14	SpeicherStadt Kerpen
15	Gewerbegebiet Türnich
16	Wind/Energie Allee
17	Gaskraftwerk Weißweiler
18	ÖPNV Düren
19	H_2-Revier
20	Grüner H_2 für die Region Aachen
21	HyInnoNets
22	Zukunftscluster H_2
23	Aachen MooVe
24	H_2-Kompetenzzentrum (iGas energy)
25	Grüne Talachse Stolberg
26	Ecobat QSL
27	Babor Beauty Group
28	Euregio H_2 Center
29	Autarkes Quartier – Alter Schlachthof
30	Aus- und Weiterbildungszentrum RVK
31	Grüner H_2 am AWZ
32	Schoeller Werk
33	Stocko Contact

Abbildung 31: Karte zu Forschungseinrichtungen und Projekten in der Region AachenPLUS

6. Well-to-Wheel-Analyse und Total Cost of Ownership

In den vorangegangenen Kapiteln wurde die Region hinsichtlich ihrer Erzeugungs- und Nutzungspotentiale von Wasserstoff sowie in Bezug auf Möglichkeiten der Transmission und Distribution analysiert. In diesem Kapitel wird der Fokus auf die methodische Vorgehensweise zur Untersuchung und Bewertung von ausgewählten Mobilitätstechnologiepfaden gelegt.

Hauptaussagen auf einen Blick

Batterieelektrische Fahrzeuge sind die effizienteste Technologie
Batterieelektrische Fahrzeuge sind wegen direkter Stromnutzung und Elektromotor am effizientesten.

Die Betrachtung verschiedener Technologiepfade ist notwendig
Bei der Dekarbonisierung des Verkehrs wird ein Mix aus batterieelektrischen (BEV) und Brennstoffzellenfahrzeugen (FCEV) vorkommen. Aufgrund der höheren Energiedichte und des Speicherpotenzials von Wasserstoff finden auch FCEV Anwendung. Die Entscheidung für den Einsatz einer Antriebstechnologie ist immer von individuellen Faktoren, wie den Strombeschaffungsoptionen, der Nähe zu Betankungsinfrastruktur oder den Fahr- und Nutzprofilen der Fahrzeuge abhängig.

BEV und FCEV sind die saubersten Technologien
Bei EE-Stromnutzung sind batterieelektrische Fahrzeuge die THG-ärmste Technologie. Im Vergleich zum herkömmlichen Diesel überzeugen alle Technologien durch deutlich geringere THG-Emissionen. Der mittelfristige Einsatz von FT-Diesel kann eine Möglichkeit der Umstellung bei geringen Investitionskosten sein und sollte individuell geprüft werden.

Geringe Kostenunterschiede zwischen BEV- und FCEV-Bussen
Die Kostenunterschiede zwischen BEV- und FCEV-Bussen fallen gering aus. Die Entscheidung für eine Mobilitätstechnologie sollte daher anhand weiterer Rahmenbedingungen wie der Verkehrsart, der geforderten Reichweite und Tankanforderungen getroffen werden.

FCEV-Züge sind kostengünstigste Option zur Personenbeförderung
Bezogen auf die gefahrenen Personenkilometer sind FCEV-Züge unter den verglichenen Mobilitätstechnologiepfaden die kostengünstigste Option. Sie stellen gerade für nicht-elektrifizierbare Strecken eine gute Möglichkeit dar. Für den ÖPNV ist somit ein hochverknüpfter inter- und multimodaler Verkehr notwendig, der für die Stammstrecken auf den Schienenpersonennahverkehr setzt.

Bedeutung für die Region AachenPLUS

Die Umstellung von Flotten auf alternative Antriebstechnologien wird in der Region stark vorangetrieben. Aufgrund der geringen Unterschiede bei den Total Cost of Ownership und den direkten THG-Emissionen stehen bei der Beschaffung die individuellen Fahr- und Nutzungsprofile sowie ein integriertes Beschaffungs- und Versorgungskonzept im Vordergrund.

Dabei erfolgt keine Einzelfallbetrachtung konkreter Strecken in der Region, sondern die allgemeine Anwendung der Bewertungsmethoden Well-to-Wheel- (WtW) und Total Cost of Ownership- (TCO) Analyse mit aktuellen Daten und Annahmen. Die Methodik ist sowohl auf andere Regionen übertragbar als auch bei Einzelfallbetrachtungen anwendbar.

In den folgenden Kapiteln wird dann basierend auf den Erkenntnissen aus der Analyse der Erzeugung, Nutzung sowie Transmission und Distribution eine Strategie für die Region AachenPLUS hergeleitet, die in der Erstellung der Roadmaps mündet.

6.1. Vorgehen bei der Technologieauswahl

Im Zuge der Analyse werden zunächst verschiedene Antriebstechnologien sowie die möglichen vorgelagerten Schritte der Treibstofferzeugung- und Bereitstellung aufbereitet (siehe Abbildung 32). Um für die Region spezifische Versorgungskonzepte zu beleuchten, wird eine Auswahl der für die Region relevanten Antriebstechnologien getroffen (siehe farblich hervorgehobene Technologien). Ziel der Auswahl ist es, kurzfristig verfügbare und regional anwendbare Technologien in die Well-to-Wheel und TCO-Analyse zu integrieren. Kurzfristig bis mittelfristig verfügbar sind neben den herkömmlichen Verbrennern vor allem batterieelektrische Fahrzeuge (Battery Electric Vehicle (BEV)) und FCEV. Darüber hinaus ist der Antrieb durch den Einsatz synthetischer Kraftstoffe (Fischer-Tropsch-Diesel (FT-Diesel)) mit in die Well-to-Wheel-Analyse aufgenommen.

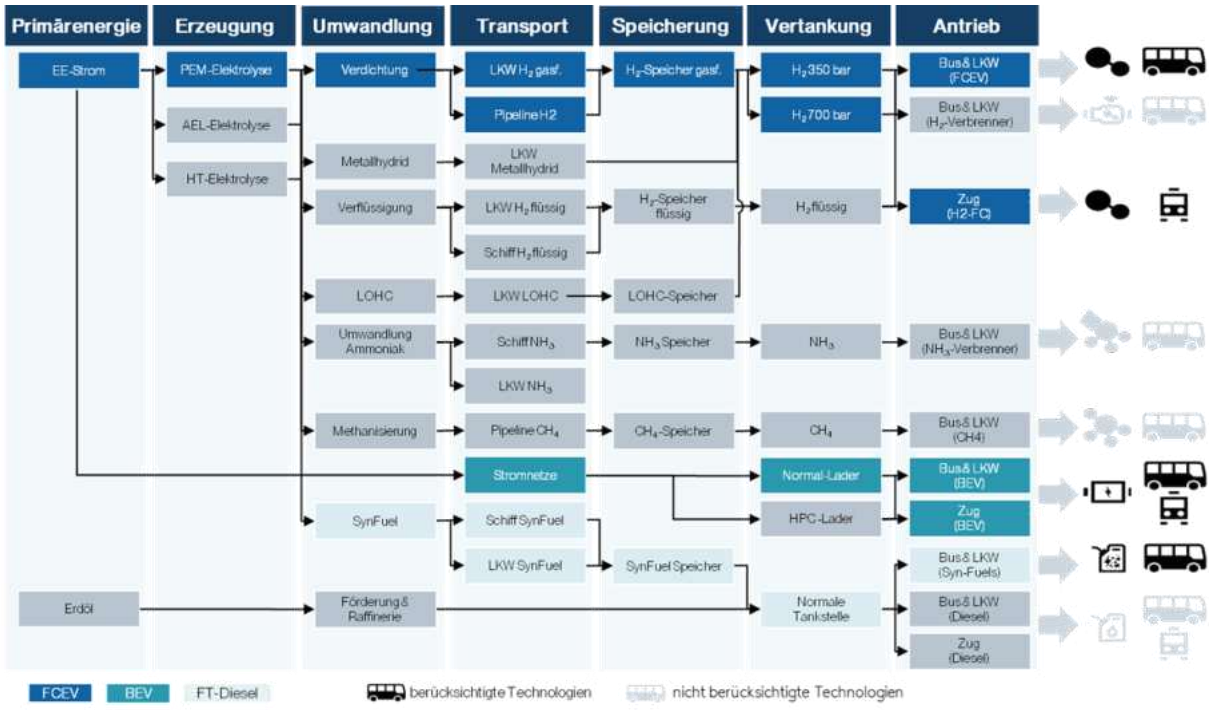


Abbildung 32: Auswahlmöglichkeiten verschiedener Antriebstechnologien

6.2. Methode der Well-to-Wheel-Analyse

Die Well-to-Wheel-Analyse („von der Energiequelle bis zum Rad") nach DIN EN 16258 ist eine Methode zur Bewertung des Gesamtenergieverbrauchs und der CO_2-Emissionen eines Fahrzeugs über den gesamten Lebenszyklus hinweg, von der Gewinnung der Rohstoffe für den Kraftstoff des Fahrzeugs (das "Well" in "Well-to-Wheel") bis zur Energienutzung im Antrieb (das "Wheel") [68]. Dies umfasst alle Energieaufwendungen, wie Produktion und Transport des Kraftstoffs, sowie die vom Fahrzeug selbst verbrauchte Energie. Die WtW-Analyse berücksichtigt die gesamte Energiekette, einschließlich Energieerzeugung, -speicherung, -verteilung und -endverbrauch (Abbildung 33). Im Zuge der Analyse nach DIN EN 16258 erfolgt eine Aufteilung der gesamten Energiekette in die einzelnen Bereiche Well-to-Tank (WtT) und Tank-to-Wheel (TtW). WtT umfasst dabei alle vorgelagerten Prozessschritte zur Entstehung und Transport des Energieträgers bis in den Tank bzw. die Batterie des Fahrzeugs. TtW beschreibt die Prozessschritte der Umwandlung des Treibstoffs in Energie für die jeweilige Antriebstechnologie. Die TtW Betrachtung umfasst dabei den Energieverbrauch durch Umwandlung in Bewegungsenergie und mögliche Verluste bei der Energiebereitstellung innerhalb des Fahrzeugs (Wirkungsgradverluste). Die WtW-Analyse wird verwendet, um die Effizienz und die Umweltauswirkungen verschiedener Fahrzeugtypen, Kraftstoffe und Transportsysteme zu vergleichen. Sie bietet einen umfassenden Überblick über die Energie- und Emissionsauswirkungen verschiedener Mobilitätsoptionen. Die WtW-Analyse kann beispielsweise verwendet werden, um die Energie- und Emissionsauswirkungen von Elektrofahrzeugen, die mit EE-Quellen betrieben werden, mit denen von herkömmlichen fossilen Kraftstoffen zu vergleichen. Nicht inkludiert in der Kalkulation nach DIN EN 16258 sind unter anderem Emissionen, die in Verbindung mit der Herstellung, dem Unterhalt und der Entsorgung von Fahrzeugen oder in Bezug auf die zugehörige Infrastruktur entstehen (siehe Abbildung 34).



Abbildung 33: Well-to-Wheel-Analyse nach DIN EN 16258 [61]

In WtW Analyse nach EN16256 enthalten		Nicht in WtW Analyse nach EN16256 enthalten	
✓	Energieverbrauch TtW und WtW in MJ/Distanz	x	Herstellung, Unterhalt und Entsorgung von Fahrzeugen
✓	Treibhausgasemissionen in g $CO_{2\text{-eq.}}$/Distanz	x	Verluste von Stoffen, wie etwa Kältemittelverluste
✓	Herstellung von Kraftstoffen und Strom	x	Energieverbrauch und Emissionen von zugehöriger Infrastruktur (z. B. Straßen, Bahnhöfe)
✓	Fahrten inkl. Wechsel von Fahrzeugen für Teilstrecken	x	Lagerung und Umschlag von Kraftstoffen, Standzeiten

Abbildung 34: Grenzen der Well-to-Wheel-Analyse nach DIN EN 16258 [68]

6.3. Annahmen der Well-to-Wheel-Analyse

Für den umfänglichen Vergleich im Zuge der Well-to-Wheel-Analyse wird eine Bandbreite von je vier Antriebstechnologien für Busse und Züge in Betracht gezogen. Die Wahl der Antriebstechnologien und der Verkehrsmittel erfolgt in Abstimmung mit dem Auftraggeber und spiegelt die für die Region kurz-, mittel- und langfristig technisch möglichen Technologien wider. Im Zuge der Analyse werden die Antriebstechnologien Brennstoffzelle (FCEV), Batterie (BEV), Fischer-Tropsch (FT) Diesel und der herkömmliche Dieselantrieb miteinander verglichen. Abbildung 35 zeigt die für die Analyse getroffenen Annahmen. FCEV umfassen dabei Brennstoffzellenfahrzeuge mit PEM-Brennstoffzelle und entsprechen dem derzeitigen Marktstandard, wie etwa den Brennstoffzellenbussen des Herstellers Caetano oder Zügen des Herstellers Alstom. Der Gesamtwirkungsgrad der Prozesskette beträgt etwa 32 %. Die betrachteten Angaben zu BEV-Bussen und BEV-Zügen entsprechen den in der Literatur gängigen Angaben zu BEV-Fahrzeugen mit erreichbaren Gesamtwirkungsgraden von etwa 73 %. Auf Seiten der Verbrenner ist neben dem herkömmlichen Dieselantrieb der sogenannte Fischer-Tropsch Dieselantrieb mit in die

	Brennstoffzelle (FCEV)		Batterieelektrisch (BEV)		Fischer-Tropsch Diesel (FT)		Diesel	
	Bus	Zug	Bus	Zug	Bus	Zug	Bus	Zug
Energie-umwandlung	PEM FC		Elektromotor		Dieselmotor		Dieselmotor	
Verbrauch	9 kg H_2/100 km	23 kg H_2/100 km	115 kWh/100km	500 kWh/100km	38 l/100km	167 l/100km	38 l/100km	167 l/100km
Kraftstoff	Grüner H_2	Grüner H_2	Grüner Strom	Grüner Strom	FT-Diesel	FT-Diesel	Diesel	Diesel
Strecke	100 km		100 km		100 km		100 km	
Energiefaktor WtW	0,24 GJ/kg_{H2}		0,0069 GJ/kWh		0,084 GJ/kg		0,051 GJ/kg	
Energiefaktor TtW	0,12 GJ/kg_{H2}		0,0036 GJ/kWh		0,044 GJ/kg		0,043 GJ/kg	
Emissionsfaktor WtW	0,83 kg_{CO2eq}/kg_{H2}		0,029 kg_{CO2eq}/kWh		2,95-2,43=0,52 kg_{CO2eq}/l		3,24 kg_{CO2eq}/l	
Emissionsfaktor TtW	0 kg_{CO2eq}/kg_{H2}		0 kg_{CO2eq}/kWh		2,43 kg_{CO2eq}/l		2,67 kg_{CO2eq}/l	

Abbildung 35: Well-to-Wheel-spezifische Annahmen verschiedener Antriebstechnologien

Analyse aufgenommen. Synthetische Kraftstoffe, wie der Fischer-Tropsch Diesel stellen einen Ansatz zur Reduzierung der THG-Emissionen bereits existierender konventioneller Fahrzeuge im Verkehrssektor dar.

Ein Vorteil des Einsatzes von FT-Diesel ist, dass dieser in herkömmlichen Dieselmotoren zum Einsatz kommen kann, wodurch die Aufwände der Neuanschaffung ganzer Fahrzeugflotten entfallen. Das Herstellungsverfahren des Fischer-Tropsch Diesels basiert dabei auf der Synthese von Wasserstoff und Kohlenmonoxid zu langkettigen Kohlenwasserstoffen, die wiederum Ausgangsstoff für die Herstellung von Diesel sind. Der Prozess bietet die Möglichkeit, CO_2 zu binden (WtT), wodurch der CO_2-Ausstoß bei der Kraftstoffverbrennung (TtW) ausgeglichen wird. Jener Anteil am gebundenen CO_2 ist in der Abbildung farblich gekennzeichnet. Ein Nachteil der Technologie ist der geringere Gesamtwirkungsgrad von ca. 22 % durch die zusätzlichen Prozessschritte sowie lokale durch den Verbrennungsprozess bedingte Emissionen. Die Well-to-Wheel-Analyse wird für alle Technologien für eine einheitliche Fahrstrecke von 100 km durchgeführt. Die spezifischen Annahmen - wie etwa Kraftstoffbedarfe - entsprechen den branchenüblichen oder in der Literatur gängigen Werten. Die jeweiligen Energie- und Emissionsfaktoren entsprechen Standardwerten, welche unter anderem in der Norm DIN EN 16258 zu finden sind [68]. In Bezug auf die Strom- und H_2-Herstellung wird von einer vollständigen

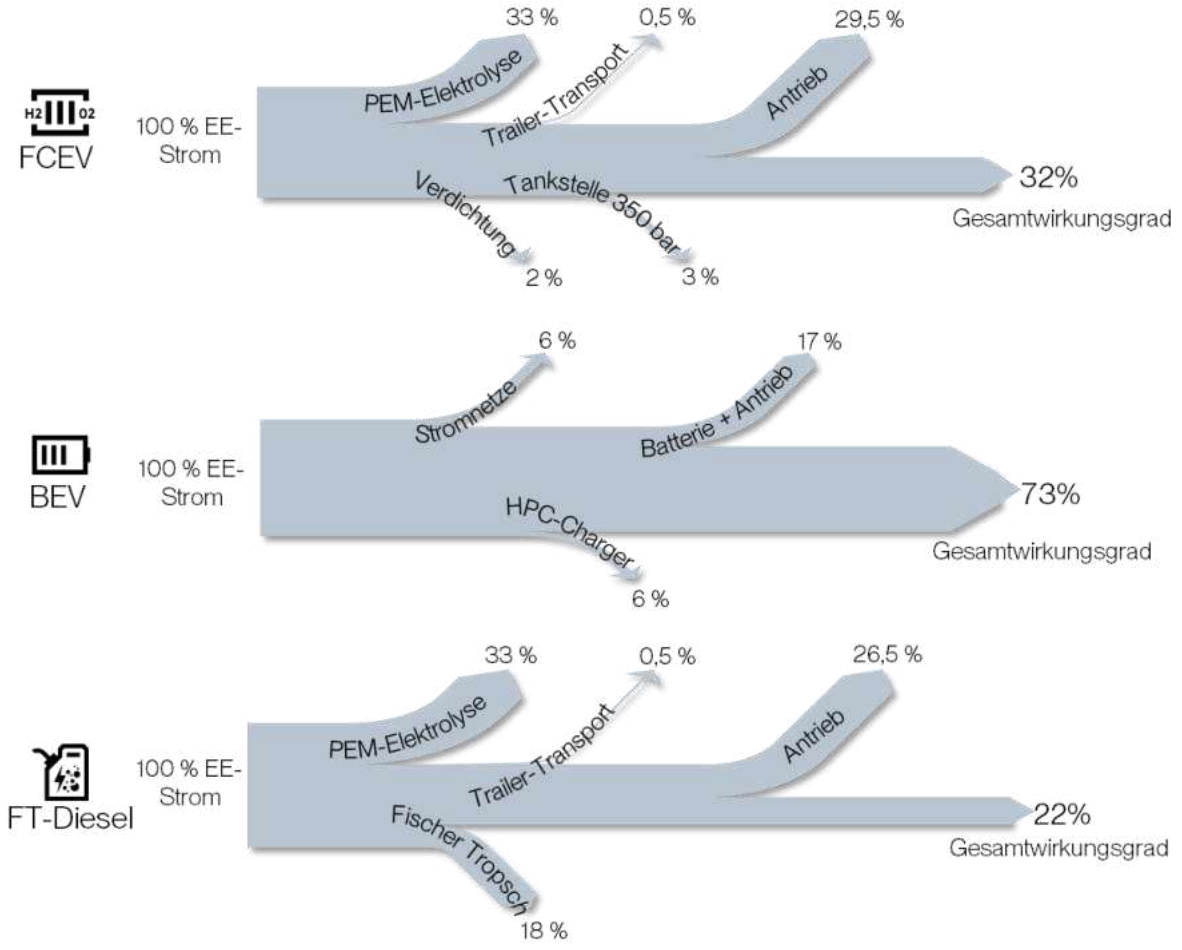


Abbildung 36: Wirkungsgradverluste der Antriebstechnologien

Versorgung mit Grünstrom ausgegangen. Nichtsdestotrotz entstehen auch bei der Erzeugung von EE-Strom vor allem in der Vorkette relevante CO_2-Emissionen [69]. Für Grünstrom ergibt sich unter anteilsmäßiger Verrechnung der individuellen Emissionsfaktoren für Wind, PV, Wasserkraft und Biomasse ein Gesamtemissionsfaktor in Höhe von 28,5 g $CO_{2\text{-eq}}$ / kWh. Abbildung 36 zeigt die Wirkungsgradverluste der im Rahmen der Well-to-Wheel-Analyse betrachteten Antriebstechnologien.

6.4. Ergebnisse der Well-to-Wheel-Analyse

Gemäß der Well-to-Wheel-Analyse nach DIN EN 16258 [68] wird in der Ergebnisdarstellung unterschieden zwischen dem spezifischen Energieverbrauch je Antriebstechnologie und den entsprechenden, jeweiligen THG-Emissionen in den Bereichen WtT und TtW der gesamten Energiekette. Ziel dieses Kapitels ist es, die Energieverbräuche und THG-Emissionen der Antriebstechnologien miteinander zu vergleichen und Schlussfolgerungen für die zukünftige Marktentwicklung und regionalen Potenziale der Technologien abzuleiten.

6.4.1. Energieverbrauch

In Abbildung 37 sind die Energieverbräuche der Antriebstechnologien in GJ / 100 km Fahrstrecke gegenübergestellt. Die Energieverbräuche sind jeweils aufgeteilt in die Energieaufwände aller vorgelagerten Prozessschritte (WtT) und aller Energieaufwände bei der Umwandlung der Energie in Bewegungsenergie (TtW). Der Vergleich der FCEV-, BEV-, FT- und Diesel-Antriebstechnologien für den Bus in Abbildung 37 zeigt, dass der Gesamtenergieverbrauch des BEV-Busses mit 0,9 GJ / 100 km am geringsten ist.

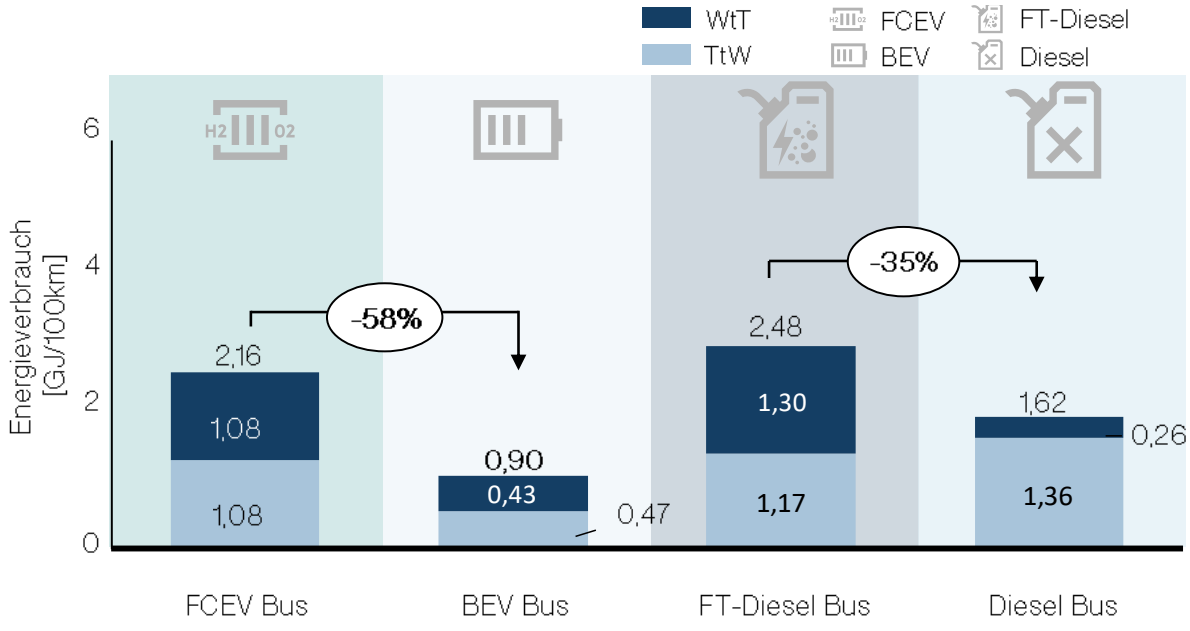


Abbildung 37: Vergleich der Energieverbräuche WtT und TtW der Busantriebstechnologien

Grund für den geringeren Gesamtenergieverbrauch von BEV-Bussen ist der hohe Wirkungsgrad der gesamten Prozesskette durch eine geringe Anzahl von Umwandlungsschritten sowie der hohe Wirkungsgrad des Elektromotors. Mehr als doppelt so viel Energie wird bei der Brennstoffzelle (2,16 GJ / 100 km) und dem FT-Dieselbus (2,48 GJ / 100 km) benötigt. Der herkömmliche Diesel hat einen Energieverbrauch in Höhe von 1,62 GJ / 100 km. Trotz der gleichen Antriebstechnologie benötigt der konventionelle Diesel 35 % weniger Energie in der WtW-Betrachtung. Dies ist durch die zweifachen Energiewandlungen in der FT-Dieselbereitstellung zu erklären.

Beim Vergleich der spezifischen Gesamtenergieverbräuche für den Zug zeigt sich ein ähnliches Bild (siehe Abbildung 38). Auch hier schneidet der BEV-Zug mit 3,45 GJ / 100 km Energieaufwand am besten ab, wohingegen der Diesel und der FT-Diesel den größten Energieaufwand verzeichnen.

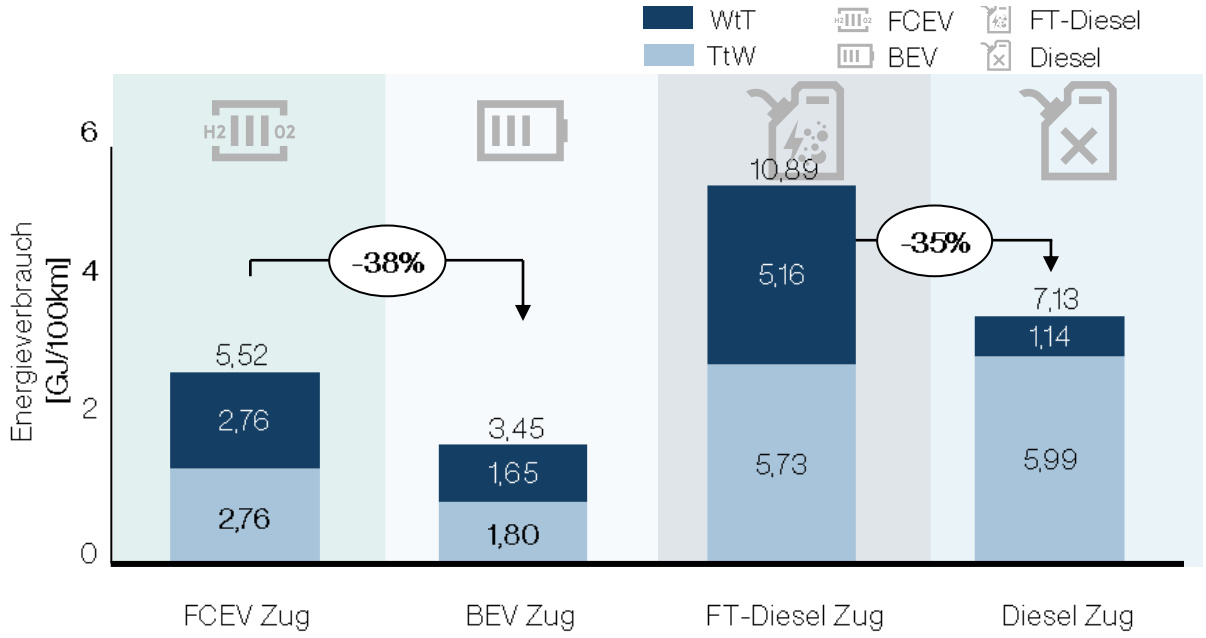


Abbildung 38: Vergleich der Energieverbräuche WtT und TtW der Zugantriebstechnologien

6.4.2. THG-Emissionen

Die Analyse der THG-Emissionen beinhaltet die Emissionen, welche entlang der gesamten Prozesskette (WtT und TtW) anfallen. Abbildung 39 zeigt den Vergleich der Emissionen der betrachteten Antriebstechnologien für Busse. Der BEV-Bus weist hier mit 3,3 kg_{CO2} / 100 km die geringsten Emissionen auf. Emissionen entstehen hier lediglich entlang der Vorkette (WtT) durch die beschriebenen Emissionen aus der Bereitstellung von EE-Strom. Auch die FCEV weisen keine direkten Emissionen während der Fahrt (TtW) auf. Die WtT-Emissionen liegen hier aufgrund des erhöhten Strombedarfs für die H_2-Erzeugung mit 7,7 kg_{CO2} / 100 km um den Faktor 2 über den BEV-Bussen. Der FT-Dieselbus kommt in der Berechnung auf insgesamt

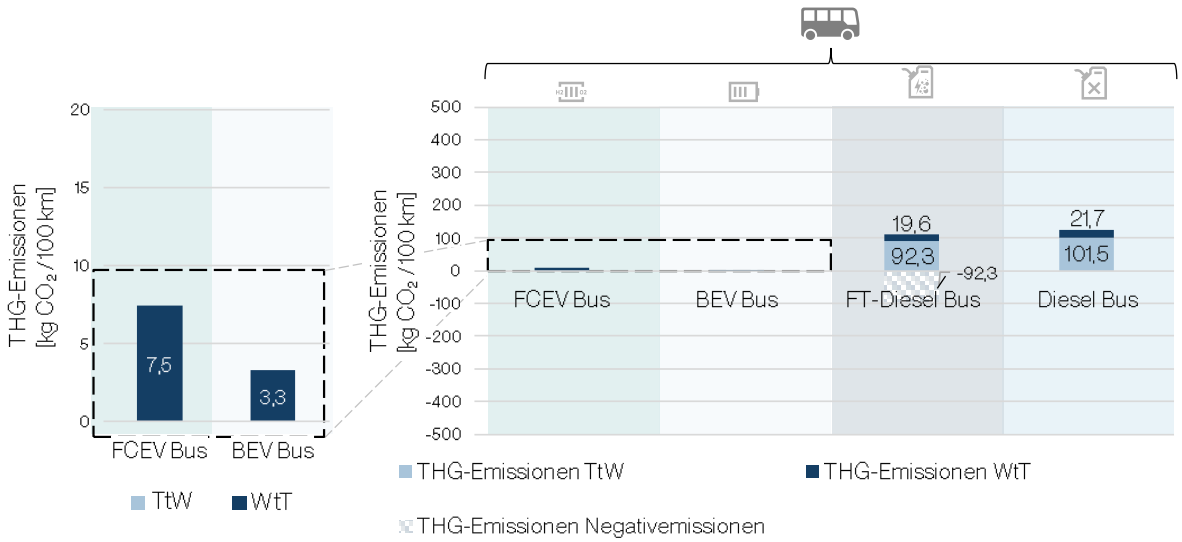


Abbildung 39: Vergleich der THG-Emissionen WtT und TtW der Busantriebstechnologien

19,6 kg_{CO2} / 100 km, was aus der WtW-Betrachtung folgt. Darüber hinaus ist zu beachten, dass der FT-Diesel mit 92,3 kg_{CO2} / 100 km signifikante WtT-Emissionen durch die Verbrennung des FT-Diesels aufweist. Durch den Herstellungsprozess des FT-Diesels und die damit verbundene Bindung von CO_2 aus der Luft ergeben sich in der WtT-Betrachtung negative Emissionswerte.

Diese Emissionswerte entsprechen den Emissionswerten der Verbrennung im Dieselmotor, da hier das zuvor gebundene CO_2 wieder freigesetzt wird. In Summe liegen die Emissionen der Gesamtkette des FT-Diesel Busses zwar über denen der FCEV- und BEV-Busse, jedoch deutlich unterhalb der Werte des herkömmlichen Diesels. Der herkömmliche Diesel weist insgesamt WtW-Emissionen in Höhe von 123,2 kg_{CO2} / 100 km auf, welche ca. um den Faktor 6 über dem FT-Diesel liegen.

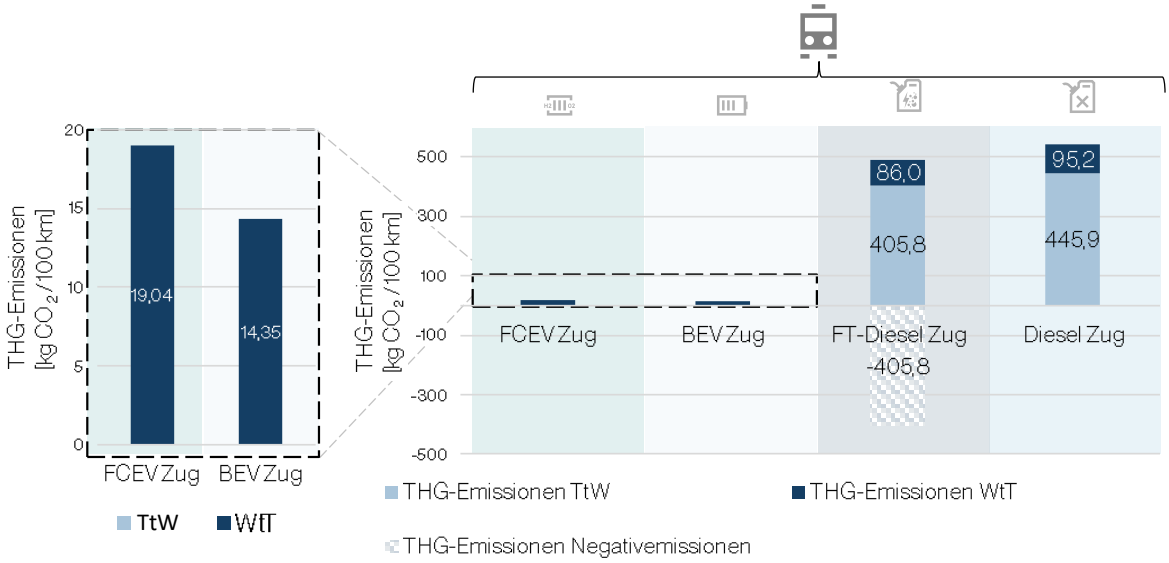


Abbildung 40: Vergleich der THG Emissionen WtT und TtW von FCEV-, BEV-, FT-Diesel-, und Diesel Zug

Aufgrund des höheren Kraftstoffbedarfs des Zuges sind die Gesamtemissionen im Vergleich zum Bus für alle Antriebstechnologien entsprechend höher. Auch hier weist der BEV-Zug die geringsten Emissionen auf, gefolgt vom FCEV-Zug und dem FT-Diesel. Die Emissionen des FT-Diesels sind hier um ca. ein Vierfaches höher als die Emissionen des Brennstoffzellenzuges.

Die Ergebnisse zeigen eine starke Abhängigkeit der THG-Emissionen von der Strombereitstellung. So basieren die ausgeführten Betrachtungen jeweils auf dem Einsatz von EE-Strom mit entsprechend geringen THG-Emissionen aus der Vorkette. In der Übergangsphase und dem Aufbau von CO_2-neutralen Bus- und Zugflotten kann eine reine EE-Stromversorgung jedoch nicht immer gewährleistet werden. Am Beispiel des BEV-Busses macht Abbildung 41 den Einfluss unterschiedlichen Strombezugs auf die WtT-Emissionen deutlich.

Bei Bezug von EE-Strom ergeben sich die in Abbildung 41 bereits dargestellten 3,3 $kg_{CO2\,eq.}$ / 100 km. Bei Betrachtung des deutschen Strommixes würden die Emissionen gegenwärtig auf etwa 56 $kg_{CO2-eq.}$ / 100 km ansteigen.

Unter Berücksichtigung des EE-Ausbaus ist davon auszugehen, dass sich die THG-Emissionen von aus dem Netz bezogenem Strom deutlich reduzieren werden. Zum Vergleich: Wird der Strom für den BEV-Bus aus Strom aus Braunkohleverstromung bezogen, liegen die Emissionen um den Faktor 40 über den Emissionen bei EE-Strombezug und damit über den Emissionen des konventionellen Dieselbusses.

Die Well-to-Wheel-Analyse gibt neben den Unterschieden der Effizienzen der verschiedenen Antriebstechnologien die Möglichkeit zur Einordnung der Technologien in Bezug auf ihre THG-Emissionen. Dabei bietet die WtW-Analyse nach DIN EN 16258 ein umfassendes Bild, verfügt jedoch auch über Einschränkungen in der Aussagekraft der Ergebnisse. So berücksichtigt die Norm u. a. keine Energieaufwände und THG-Emissionen für die Fertigung und Entsorgung der Antriebstechnologien. Insbesondere bei BEV- und FCEV-Technologien werden in der Methodik signifikante Werte vernachlässigt. Weiterhin besteht keine einheitliche und aktuelle Festlegung bezüglich der zu verwendenden Vorgabenwerte, wie etwa Emissionsfaktoren für EE-Strom, sodass die Vergleichbarkeit der

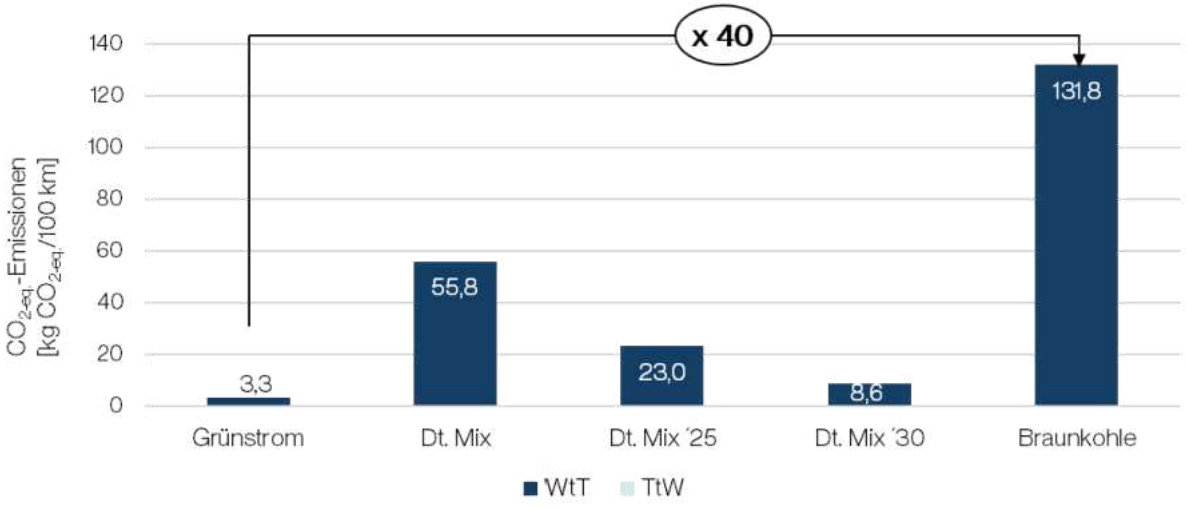


Abbildung 41: Einfluss des Strommixes auf die THG-Emissionen am Beispiel BEV-Bus

Ergebnisse nicht vollständig gegeben ist (vergleiche auch Abbildung 34).

In Bezug auf den Energieverbrauch und die Effizienz der Technologien zeigt sich, dass batterieelektrische Fahrzeuge aufgrund der direkten Stromnutzung und dem Elektromotor mit einem Gesamtwirkungsgrad von etwa 73 % die effizienteste Technologie darstellen. Mit einem Gesamtwirkungsgrad von etwa 32 % sind FCEV im Vergleich weniger effizient. Bei der Defossilisierung des Verkehrs können neben batterieelektrischen Fahrzeugen und Brennstoffzellenfahrzeugen auch weitere erneuerbare Kraftstoffe wie z. B. FT-Diesel helfen. Insbesondere die Herstellung und Nutzung von FT-Diesel bietet den Vorteil der Nutzbarkeit vorhandener Flotten. Hinsichtlich der THG-Emissionen ist erkenntlich, dass bei EE-Stromnutzung batterieelektrische Fahrzeuge die THG-ärmste Technologie darstellen. Im Vergleich zum herkömmlichen Diesel überzeugen alle Technologien durch deutlich geringere THG-Emissionen. Die Eignung der verschiedenen Technologien ist dabei stark abhängig von regionalen Gegebenheiten, wie beispielsweise den lokalen Strombeschaffungsoptionen, der Nähe zu relevanter Betankungsinfrastruktur oder den Fahr- und Nutzprofilen der Fahrzeuge. Abbildung 42 zeigt zum Abschluss einen Vergleich der WtW-Energieverbräuche und THG-Emissionen für die betrachteten Technologien für Bus und Zug.

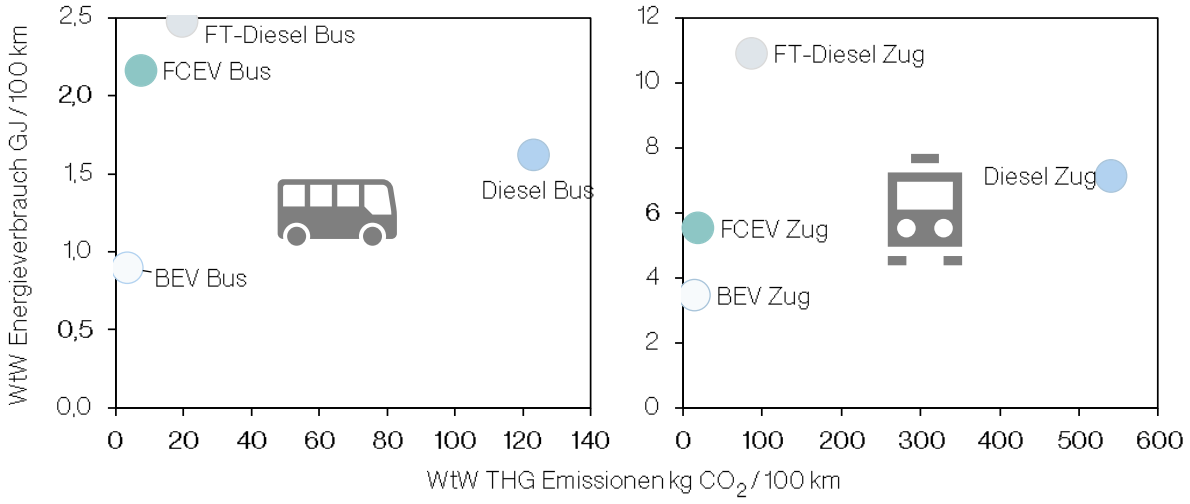


Abbildung 42: Vergleich: WtW Energieverbräuche und THG-Emissionen der Antriebstechnologien

6.5. Methode der TCO-Analyse

Die Total Cost of Ownership ist ein Investitionsrechnungsverfahren, das neben den Anschaffungskosten ebenso die im weiteren Verlauf anfallenden Betriebskosten berücksichtigt. Die vollumfängliche Betrachtung aller auftretenden Kosten über den Lebenszyklus ermöglicht bei unterschiedlichen Technologien mit divergierenden Kostencharakteristiken einen objektiven Vergleich der anfallenden Gesamtkosten. Auf diese Weise wird die über den gesamten Nutzungszeitraum kostenoptimale Lösung ausgewählt, anstelle einer Lösung mit den niedrigsten Investitionskosten, die jedoch wegen höherer Betriebskosten über den Nutzungszeitraum weniger rentabel ist. Bei Mobilitätslösungen bietet sich außerdem an, die Kosten auf die Fahrleistung zu skalieren. Gängig sind hierbei die Angaben pro gefahrenen Kilometer bzw. Personenkilometer.

In der vorliegenden TCO-Analyse werden neben den Beschaffungskosten, in die potenzielle Förderungen eingerechnet werden, auch Wartungskosten, Betriebskosten, Kreditkosten, Infrastrukturkosten und Personalkosten berücksichtigt. Abbildung 43 schlüsselt die Strukturen genauer auf, die unter den einzelnen Kostenpunkten betrachtet werden. Es werden jedoch Gebühren für die Schienen- und Straßennutzung, wie etwa Mautgebühren, Stationsgebühren und auch Trassengebühren nicht einbezogen. Auch steuerliche Abgaben und mögliche Versicherungsprämien werden exkludiert, ebenso wie mögliche Erlöse aus dem THG-Quotenhandel.

Im Rahmen des HyExperts AachenPLUS werden drei Mobilitätslösungen miteinander verglichen: Ein Bus mit Brennstoffzellenantrieb (FCEV-Bus) hauptsächlich für den Überlandverkehr im ländlich geprägten Raum, ein batterieelektrischer Bus (BEV-Bus) für den ÖPNV in städtischen Ballungsgebieten und Personenzüge mit Brennstoffzellenantrieb (FCEV-Zug) für Bahnstrecken, die derzeit noch mit Dieselzügen bedient werden und perspektivisch nicht zu elektrifizieren sind.

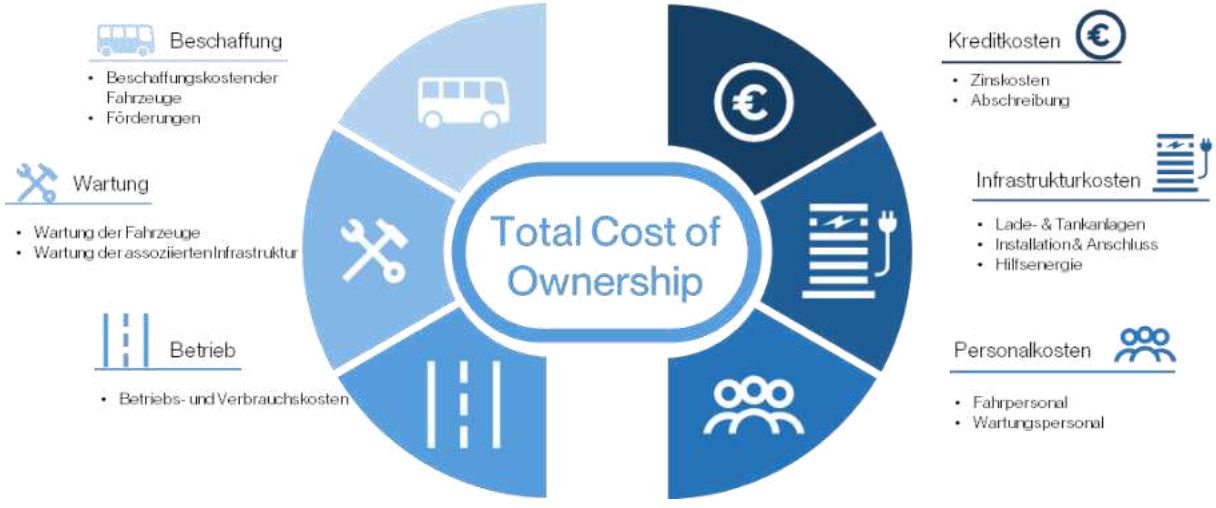


Abbildung 43: Übersicht der betrachteten Kostenstrukturen bei der TCO-Analyse

6.5.1. Technologiepfad „FCEV-Bus ländlicher Raum“

Im ländlich geprägten Raum kommt die Stärke von FCEV-Bussen gegenüber BEV-Bussen, nämlich die erhöhte Reichweite, besonders zur Geltung. Zudem begünstigen längere Distanzen zwischen zwei Haltepunkten und der fließende Verkehr den Einsatz von H_2-Fahrzeugen. Deshalb wird nachfolgend der Anwendungsfall des FCEV-Busses im ländlichen Raum angelegt an die Situation im Kreis Heinsberg einer wirtschaftlichen TCO-Analyse unterzogen. Bei beiden alternativen Antriebstechnologien, dem Brennstoffzellen- und Batteriebus, ist derzeit jedoch mit relativ langen Lieferzeiten von zumeist über einem Jahr zu rechnen.



Verbrauch: 9 kg_{H2}/100km

Jahresumlauf: 70.000 km

Nutzungsdauer: 12 Jahre

Investitionskosten:	550.000 €
Lernrate:	20 % bei Verdopplung der Produktion
Förderung:	60 % der Mehrkosten
Flottenentwicklung:	2025: 35 2030: 75 2035: 135
Kalk. Zins:	7 %
H_2-Preis [€/kg_{H2}]	2025: 12,85 2030: 8 2035: 6
Fahrerkosten:	35 €/h
Wartungskosten:	2,5 % der Investitionskosten

Abbildung 44: Annahmen der FCEV-Fahrzeuge für die TCO-Betrachtung
© Foto: Caetano Bus | Toyota

Für die FCEV-Busse werden die in Abbildung 44 dargelegten Annahmen zugrunde gelegt. Der H_2-Verbrauch ist dabei mit 9 kg / 100 km konservativ abgeschätzt, wohingegen die Jahresfahrleistung und die Nutzungsdauer mit 70.000 km respektive zwölf Jahren branchenüblichen Erfahrungswerten entsprechen. In der TCO-Betrachtung wird von Beschaffungskosten von etwa 550.000 € pro FCEV-Bus ausgegangen, wobei nach der Erfahrungskurve eine Kostendegression von jeweils 20 % bei Verdopplung der Produktion über die Jahre vorausgesetzt wird. Bei den Investitionskosten wird außerdem eine Förderung von 60 % der Investitionsmehrausgaben gegenüber eines konventionellen Dieselbusses eingerechnet, wie sie derzeit vom Land NRW gewährt wird [70]. Für die nächsten Jahre wird davon ausgegangen, dass sich die Förderquote bis zum Jahr 2035 auf ein Drittel reduziert. Bei der Flottenentwicklung wird angenommen, dass die entsprechenden Fahrzeuge immer im jeweiligen Stützjahr 2025, 2030 und 2035 angeschafft werden, wobei die Flottengröße in etwa die Situation im Kreis Heinsberg widerspiegelt. Die Betriebskosten sind beim FCEV-Bus im Hinblick auf Vergleichsprojekte mit Fahrerkosten von 35 € / h (inkl. Lohnnebenkosten und Ausbildungskosten) und jährlichen Wartungskosten von 2,5 % berücksichtigt. Hinzu kommen die H_2-Kosten. Diese starten im Jahr 2025 mit 12,85 € / kg_{H2}, dem derzeitigen Preis, welchen die H2Mobility für Wasserstoff bei 350 bar aufruft. In den Folgejahren wird aufgrund der wachsenden Anzahl an H_2-Bezugsoptionen, auch durch H_2-Importe aus Südeuropa und der Region Mittlerer Osten und Nordafrika (Middle East and North Africa (MENA)) eine deutliche Kostenreduktion auf 8 € / kg_{H2} im Jahr 2030 und 6 € / kg_{H2} im Jahr 2035 vorausgesetzt.



Kapazität: 1.000 kg_{H2}/d

Nutzungsdauer: 15 Jahre

Investitionskosten	6.000.000 €
Lernrate	20 % bei Verdopplung der Produktion
Förderung	90 %
Anzahl	2025: 1 2030: 2 2035: 3
Kalk. Zins	7 %
Strombedarf	2 kWh/kg_{H2} (Verdichtung & Kühlung)
Strompreis [ct/kWh]	2025: 60 2030: 20 2035: 15
Wartungskosten	2,5 % der Investitionskosten

Abbildung 45: Kostenannahmen der Tankinfrastruktur für die TCO-Betrachtung

Die notwendigen Kosten für die Betankungsinfrastruktur werden ebenso inkludiert. Für die initiale Flotte wird eine Tankstelle mit einer täglichen H_2-Abgabekapazität von 1.000 kg / d angenommen, die bei der schrittweisen Erweiterung der Busflotte ebenso aufgestockt wird. Für die initiale H_2-Tankstelle ist insgesamt mit Investitionskosten von mindestens 6 Mio. € zu rechnen. Auch bei den H_2-Tankstellen werden fallende Kosten bei der Ausweitung der Produktion vorausgesetzt. Die Investitionskosten für die Tankinfrastruktur werden derzeit vom Land NRW sogar mit 90 % gefördert, wie hier für die initiale H_2-Tankstelle angenommen [2]. Neben dem Wasserstoff besteht für die Betankung ebenso ein gewisser Strombedarf für die H_2-Verdichtung und -Kühlung sowie für die Beleuchtung, Anlagensteuerung und Überwachung. Dieser Bedarf wird mit 2 kWh pro getanktem Kilogramm Wasserstoff veranschlagt. Die Strombezugspreise sind in der derzeitig volatilen Situation lediglich unter Unsicherheiten für die nächsten 15 Jahre abzuschätzen. Auf Grundlage einer Untersuchung des Wirtschaftsforschungsunternehmen Prognos wird die in Abbildung 45 dargelegte Strompreisprognose verwendet [58]. Die Stromkosten für die Betankung stellen jedoch keinen signifikanten Kostentreiber dar, wie im weiteren Verlauf noch dargelegt wird, sodass die Auswirkungen unsicherer Strompreise als unmaßgeblich eingestuft werden. Wie auch bei den FCEV-Bussen ist für eine hohe Verfügbarkeit der H_2-Tankinfrastruktur mit jährlichen Wartungskosten in Höhe von 2,5 % der Beschaffungskosten zu rechnen.

Die TCO pro Kilometer für den FCEV-Bus im ländlichen Raum liegen unter den getroffenen Annahmen im Jahr 2025 zunächst bei etwa 3,60 € / km (siehe Abbildung 46). Wegen sinkender Kraftstoffpreise (Wasserstoff) und Strombezugspreise kommt es über die Zeit bis zum Jahr 2035 zu einer Reduktion der TCO um 20 % auf 2,93 € / km. Die günstigeren Verbrauchskosten gleichen sogar steigende Investitionskosten für die FCEV-Busse aus, die trotz sinkender Beschaffungspreise, aufgrund der langsam auslaufenden staatlichen Förderungen, für die Anwender real teurer werden. Hinzu kommt die bessere Auslastung der Tankinfrastruktur, welche die Beschaffungskosten der Tankstellen auf mehr Fahrzeuge und gefahrene Kilometer verteilt.

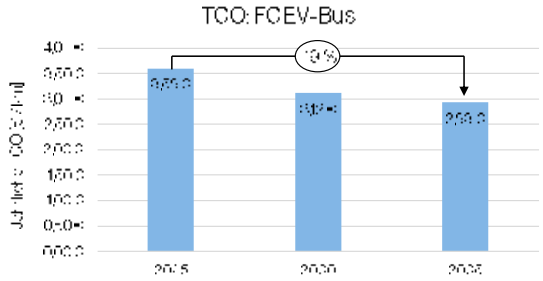


Abbildung 46: Entwicklung der TCO von FCEV-Bussen im ländlichen Raum

Abbildung 47 zeigt, wie sich die TCO des FCEV-Busses im Jahr 2025 aus den unterschiedlichen Kostenbestandteilen zusammensetzen. Es wird deutlich, dass die Fahrerkosten mit knapp 40 % mit Abstand den größten Einfluss auf die Gesamtkosten haben. Zweitgrößter Posten sind die Kraftstoffkosten für Wasserstoff. Insgesamt belaufen sich die variablen Kostenanteile für den Betrieb mit

den Fahrer-, Kraftstoff- und Wartungskosten der Fahrzeuge zuzüglich der Betriebskosten (Operational Expenditure (OPEX)) auf ungefähr 80 %. Den geringsten Beitrag leisten aufgrund der hohen Förderung die Investitionskosten (Capital Expenditure (CAPEX)) der Tankstelle. Insgesamt ist der Einfluss der Betankungsinfrastruktur auf die Gesamt-TCO mit gut 5 % (CAPEX + OPEX Tankstelle) marginal.

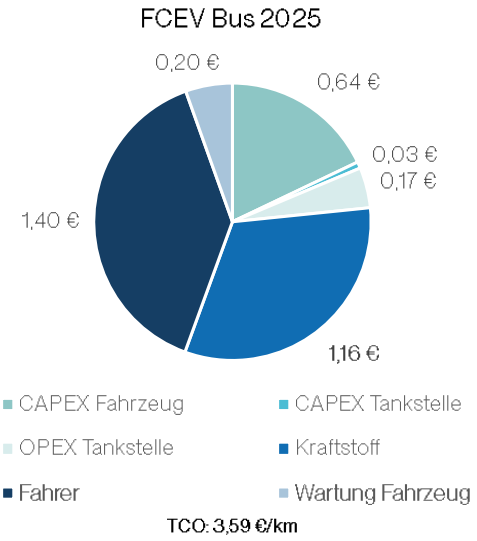


Abbildung 47: Aufschlüsselung der TCO für den FCEV-Bus im ländlichen Raum im Jahr 2025

Um den möglichen Einfluss veränderter Rahmenbedingungen zu untersuchen, werden zwei Sensitivitätsszenarien „optimistitsch" und „konservativ" aufgespannt. Im optimistischen Szenario liegen die Fahrerkosten im Jahr 2020 bei 25 € / h und steigen anschließend um 1,5 % pro Jahr [71]. Außerdem sind die H_2-Bezugskosten mit 8 bis 5 € / kg_{H2} deutlich günstiger und die jährliche Laufleistung um 20 % erhöht [72]. Zusätzlich sind die Investitionskosten der Fahrzeuge gesunken, was einer Förderung von 80 % der Investitionsmehrkosten gegenüber einem konventionellen Dieselbus entspricht. Des Weiteren wird mit niedrigeren Zins- und Wartungskosten kalkuliert. Die Investitionskosten für eine H_2-Tankstelle liegen im Jahr 2025 bei lediglich 3,5 statt 6,0 Mio. €.

Im konservativen Szenario hingegen sind die Fahrerkosten um 20 % erhöht. Auch die H_2-Kosten liegen mit 15 bis 10 € / kg_{H2} oberhalb der Kosten im Basisszenario, wodurch ein unzureichendes H_2-Angebot widergespiegelt wird. Die Laufleistung der FCEV-Busse ist um 20 % reduziert und die Fahrzeuge sind teurer, was hauptsächlich auf eine niedrigere Lernrate zurückgeht. Ebenso sind Zinskosten, angelehnt an [73], deutlich höher und die notwendigen Ausgaben für die Wartung der Fahrzeuge und Tankinfrastruktur sind doppelt so hoch bemessen.

Tabelle 7: Rahmenbedingungen des Basisszenarios und der beiden Sensitivitätsszenarien „Optimistisch" und „Konservativ" für FCEV-Busse im ländlichen Raum (reale Preise)

		Basiswerte			Optimistisch			Konservativ		
		2025	2030	2035	2025	2030	2035	2025	2030	2035
Fahrerkosten	[€ / h]	35,0	35,0	35,0	26,9	29,0	31,3	42,0	42,0	42,0
Kraftstoffpreis	[€ / kg_{H2}]	12,85	8,0	6,0	8	5	5	15	12,5	10
Jahreskilometer	[1.000 km / a]	70	70	70	84	84	84	56	56	56
Investition Fahrzeug	[1.000 €]	550	495	440	330	323	317	650	617	586
Kalkulatorischer Zins	[-]	0,07	0,07	0,07	0,03	0,03	0,03	0,10	0,10	0,10
Wartung Fahrzeug	[-]	0,025	0,025	0,025	0,02	0,02	0,02	0,05	0,05	0,05
Investition Tankstelle	[1.000 €]	6.000	5.400	4.800	3.500	2.800	2.240	6.500	5.200	4.160
Wartung Tankstelle	[-]	0,025	0,025	0,025	0,02	0,02	0,02	0,05	0,05	0,05

Abbildung 48 zeigt die Auswirkungen der geänderten Rahmenbedingungen in einem Tornadodiagramm, wobei stets die neuen TCO bei Veränderung nur eines Parameters gegenüber dem Durchschnittswert der TCO aus dem Basisszenario der Stützjahre 2025, 2030 und 2035 aufgetragen sind (siehe Abbildung 46). Die Parameter sind nach Einfluss auf die TCO der Größe nach angeordnet. Demnach haben die Kraftstoffpreise den höchsten und die Investitionskosten der Tankstelle die geringsten Auswirkungen. Im optimistischen Szenario sinken die TCO allein durch geringere Kraftstoffpreise um knapp 10 %, während die geringe H_2-Verfügbarkeit im konservativen Szenario zu gut 10 %

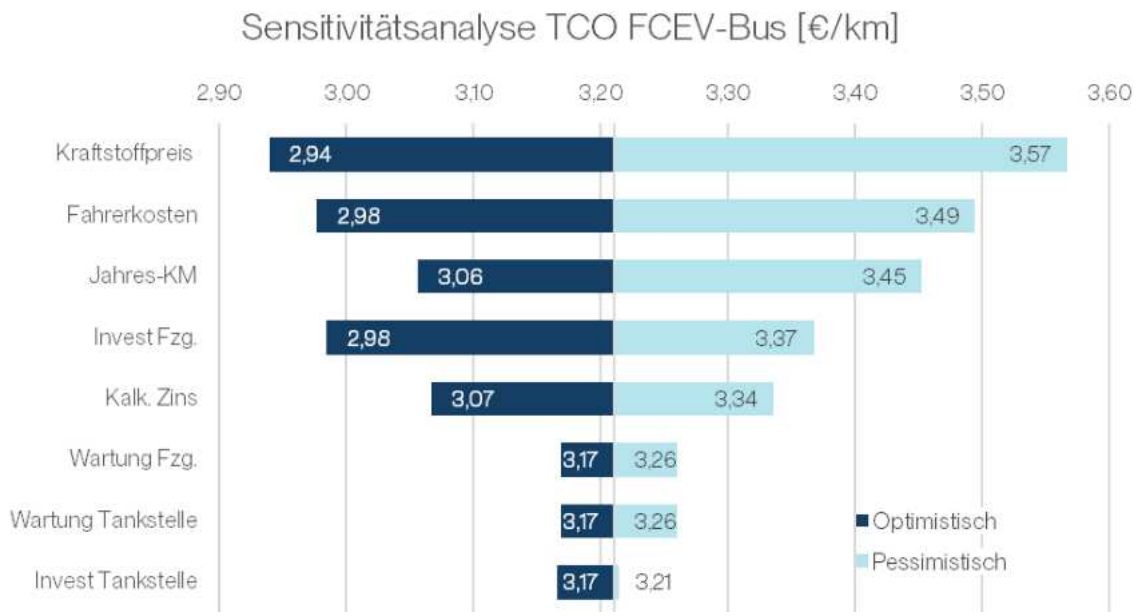


Abbildung 48: Ergebnisse der Sensitivitätsrechnung zum Basisfall mit TCO von 3,21 € / km für FCEV-Busse im ländlichen Raum

teureren TCO führt. Auch drücken die deutlich günstigeren Fahrzeugkosten im optimistischen Szenario die TCO auf unter 3 € / km. Auf der anderen Seite zeigen die Wartungskosten sowohl für die Fahrzeuge und die Tankstelle als auch die Investitionskosten der Tankstelle mit weniger als ±2 % so gut wie keinen Einfluss auf die Gesamtkosten.

6.5.2. Technologiepfad „BEV-Bus städtischer Raum"

Batterieelektrische Busse sind im städtischen Stop-and-Go-Verkehr durch Energierekuperation und den über den gesamten Drehzahlbereich effizienteren Elektromotor konventionellen Verbrennerbussen deutlich überlegen. Da niedrige Tagesumläufe die Fahrzeugreichweite weniger entscheidend machen und zumeist eine hohe elektrische Anschlussleistung in den Städten vorliegt, sind BEV-Busse für die Bedienung des ÖPNV in urbanen Zentren, wie beispielsweise der Stadt Aachen, besonders gut geeignet. Nachfolgend wird deswegen der Anwendungsfall des BEV-Busses im städtischen Raum wirtschaftlich analysiert. Wie auch die FCEV-Busse weisen die BEV-Busse derzeit Lieferzeiten von über einem Jahr auf.

Analog zu den FCEV-Bussen werden zu Beginn Annahmen für die BEV-Busse und deren assoziierte Ladeinfrastruktur getroffen. Diese sind in Abbildung 50 und Abbildung 49 zu finden. Für den Stadtverkehr wird mit Rekuperation von Bremsenergie ein Verbrauch von 115 kWh / 100 km angenommen. Aufgrund der niedrigeren Durchschnittgeschwindigkeit und kürzerer Fahrstrecken in der Stadt sind die BEV-Busse im Jahr nur etwa 50.000 km unterwegs. Trotzdem wird die Lebensdauer wegen der höheren Belastung im Vergleich zum Überlandverkehr ebenfalls mit zwölf Jahren angenommen. Mit rund 520.000 € sind die BEV-Busse in der Anschaffung geringfügig günstiger als die FCEV-Busse. Auch für diese wird eine Preisreduktion um 20 % bei Verdopplung der Produktion postuliert. Analog zu den FCEV-Bussen greift auch für BEV-Busse die Förderung des Landes NRW über 60 % des Differenzbetrages zwischen einem batterieelektrisch- bzw. H_2-betriebenen Bus gegenüber einem vergleichbaren Dieselbus [70]. Für die Berechnung wird angenommen, dass die Busse jeweils in den Stützjahren 2025, 2030 und 2035 angeschafft werden. Die 275 Busse im Jahr 2035 entsprechen der derzeitigen Anzahl eigener Busse im Linienverkehr der Aachener Straßenbahn und Energieversorgungs-AG (ASEAG). Der Ladestrom wird nach getroffenen Annahmen zu den gleichen Konditionen wie bei der H_2-Tankstelle bezogen [58]. Auch die Fahrerkosten und die prozentualen jährlichen Wartungskosten unterscheiden sich nicht im Vergleich mit dem FCEV-Bus.



Leistung: 150 kW

Nutzungsdauer: 20 Jahre

Investitionskosten	35.000 € Ladepunkt
Investitionskosten	Baukostenzuschlag + Transformator 20 k€
Anschlusskosten	5.000 €
Förderung	90%
Lernrate	10 % bei Verdopplung der Produktion
Anzahl	2025: 42 2030: 102 2035: 193
Kalk. Zins:	7 %
Wartungskosten	1 % der Investitionskosten

Abbildung 49: Kostenannahmen der Ladeinfrastruktur für die TCO-Betrachtung von BEV-Bussen

Für die Ladeinfrastruktur werden die in Abbildung 49 abgebildeten Annahmen für 150 kW Ladesäulen zugrunde gelegt, mit denen die BEV-Busse über Nacht geladen werden können. Für einen Ladepunkt wird mit Kosten von rund 60.000 € kalkuliert. Darin enthalten sind die Beschaffungskosten zuzüglich der Transformatorkosten, Anschlusskosten und des Baukostenzuschlags für die Netzertüchtigung im vorgelagerten Netz. Wie auch für die H_2-Tankstellen können Ladepunkte für den ÖPNV in NRW derzeit mit bis zu 90 % gefördert werden. Bei allen Förderungen wird im Rahmen der TCO-Berechnung davon ausgegangen, dass sich die Förderungen bis zum Jahr 2035 auf ein Drittel reduzieren. Da es sich bei Ladepunkten im Vergleich zu H_2-Tankstellen bereits um eine etablierte Technologie handelt, wird von einer Lernrate von 10 % bei einer Verdopplung der zukünftigen Produktion ausgegangen. Bei der angegebenen Größe der BEV-Flotte werden pro BEV-Bus lediglich 0,7 Ladepunkte benötigt. Aufgrund dessen reduziert sich die Anzahl der installierten Ladepunkte auf lediglich 193 Ladepunkte im Jahr 2035 für 275 BEV-Busse. Die prozentuellen Wartungskosten der Ladeinfrastruktur sind mit 1 % der Investitionskosten geringer als bei den H_2-Tankstellen, da die verwendete Technik robuster ist und keine bewegten Teile beinhaltet.



Verbrauch: 115 kWh/100 km

Jahresumlauf: 50.000 km

Nutzungsdauer: 12 Jahre

Investitionskosten:	520.000 €
Lernrate:	20 % bei Verdopplung der Produktion
Förderung:	60% der Mehrkosten
Flottenentwicklung:	2025: 60 2030: 145 2035: 275
Kalk. Zins:	7 %
Strompreis[ct/kWh]	2025: 60 2030: 20 2035: 15
Fahrerkosten:	35 €/h
Wartungskosten:	2,5 % der Investitionskosten

Abbildung 50: Annahmen der BEV-Busse für die TCO-Betrachtung © Foto: Daimler Truck

Die TCO für BEV-Busse sind im ersten Stützjahr mit 3,59 € / km genauso hoch wie bei den FCEV-Bussen (siehe Kapitel 6.5.1) Über die Jahre kommt es vor allem wegen der sinkenden Strombezugspreise zu einer Kostenreduktion von rund 14 % auf 3,10 € / km. Diese niedrigeren Verbrauchskosten gleichen sogar steigende Investitionskosten aus, die trotz sinkender Stückpreise, aufgrund auslaufender Förderung, für den Beschaffer real teurer werden. Die Anwendung des BEV-Busses im städtischen Raum ist damit 0,03 bis 0,17 € / km teurer als FCEV-Busse im ländlichen Raum. Allerdings sei bei diesem Vergleich darauf verwiesen, dass die Jahreslaufleistung im ländlichen Raum mit 70.000 km pro Jahr höher liegt als in der städtischen Anwendung, was große Auswirkung auf die kilometerspezifischen TCO hat.

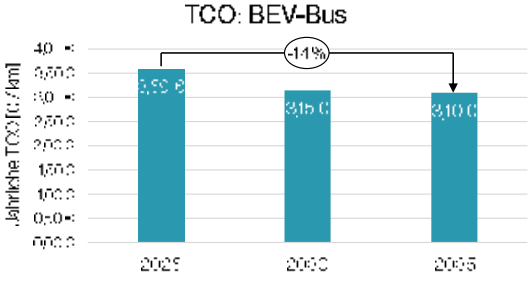


Abbildung 51: Entwicklung der TCO von BEV-Bussen im städtischen Raum

Folgende Abbildung 52 gibt einen Überblick über die Kostenaufteilung von BEV-Bussen im Jahr 2025. Aufgrund der niedrigeren Durchschnittsgeschwindigkeit und geringeren jährlichen Fahrleistung machen die Fahrerkosten mit rund 45 % einen größeren Anteil der gesamten TCO als bei den FCEV-Bussen aus. Wegen des effizienteren Antriebs fallen die Kraftstoffkosten (Strom) nicht mehr so stark ins Gewicht wie bei den FCEV-Bussen und sind selbst bei den teuren Strombezugspreisen im Jahr 2025 nur noch für rund 25 % verantwortlich. Die geringeren Jahreskilometer vergrößern den Einfluss der einmaligen Investitionskosten auf die Kostenzusammensetzung. So sind die CAPEX für das Fahrzeug nun neben den Fahrerkosten die zweitgrößte Kostenstelle mit rund 25 %. Da die deutlich günstigere Tankinfrastruktur bei den hohen Förderquoten so gut wie keinen Einfluss auf die TCO haben, verlieren die variablen Kostenanteile an Bedeutung, die gemeinsam gut 75 % der Gesamtkosten ausmachen.

Für die Sensitivitätsuntersuchung werden abermals zwei Vergleichsszenarien „Optimistisch" und „Konservativ" aufgespannt, deren Rahmenbedingungen in Tabelle 8 vorgestellt werden. Im Folgenden werden lediglich die Parameter erläutert, die sich von der Sensitivitätsuntersuchung für die FCEV-Busse unterscheiden (siehe Abbildung 49). Der hohe Strompreis wird im optimistischen Szenario im Stützjahr auf 40 ct / kWh gesenkt, während der erhöhte Strompreis im konservativen Szenario die weiterhin angespannte Lage am Strommarkt repräsentiert.

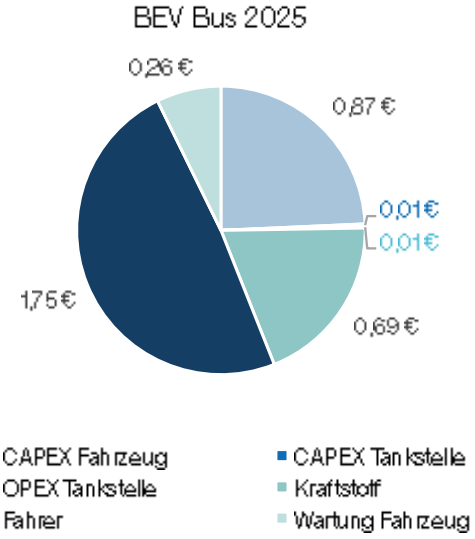


Abbildung 52: Aufschlüsselung der TCO für den BEV-Bus im städtischen Raum im Jahr 2025

Die Jahresfahrleistung wie auch die Investitionskosten für die Ladeinfrastruktur werden im optimistischen bzw. konservativen Fall um 20 % erhöht respektive gemindert.

Tabelle 8: Rahmenbedingungen des Basisszenarios und der beiden Sensitivitätsszenarien „Optimistisch" und „Konservativ" für BEV-Busse im städtischen Raum (reale Preise

		Basiswerte			Optimistisch			Konservativ		
		2025	2030	2035	2025	2030	2035	2025	2030	2035
Fahrerkosten	[€ / h]	35,0	35,0	35,0	26,9	29,0	31,3	42,0	42,0	42,0
Kraftstoffpreis	[€ / kWh]	0,6	0,2	0,2	0,4	0,2	0,2	0,6	0,5	0,4
Jahreskilometer	[1.000 km / a]	50	50	50	60	60	60	40	40	40
Investition Fahrzeug	[1.000 €]	520	468	416	480	384	307	600	570	541
Kalkulatorischer Zins	[-]	0,07	0,07	0,07	0,03	0,03	0,03	0,10	0,10	0,10
Wartung Fahrzeug	[-]	0,025	0,025	0,025	0,02	0,02	0,02	0,05	0,05	0,05
Investition Tankstelle	[1.000 €]	60	57	54	48	45	43,2	72	68,4	64,8
Wartung Tankstelle	[-]	0,010	0,010	0,010	0,005	0,005	0,005	0,02	0,02	0,02

Die Auswirkungen der Rahmenbedingungsveränderung sind nachfolgender Abbildung 53 zu entnehmen, in der die durchschnittlichen TCO über den Betrachtungszeitraum angegeben sind. Die Parameter sind in der gleichen Reihenfolge wie bei den FCEV-Bussen dargestellt. Dadurch fällt auf, dass die BEV-Busse robust gegenüber Veränderungen der Stromkosten sind. Die Abweichung liegt lediglich zwischen - 2 % und + 6 %. Da, wie zuvor festgestellt (siehe Kapitel 6.5.2), unter den getroffenen Annahmen die Fahrerkosten bei den BEV-Bussen einen entscheidenden Beitrag zu den TCO beisteuern, führen deren Sensitivitäten zu den größten Veränderungen der TCO.

Auch die zugrunde gelegte Jahresfahrleistung hat weiterhin einen großen Einfluss auf die kilometerspezifischen TCO (siehe dazu auch Kapitel 6.6). Hervorzuheben ist, dass veränderte Investitionskosten der Ladeinfrastruktur nur sehr geringe Auswirkungen auf die Gesamtkosten haben. Diese liegen sowohl im optimistischen als auch im konservativen Szenario bei unter 0,01 € / km.

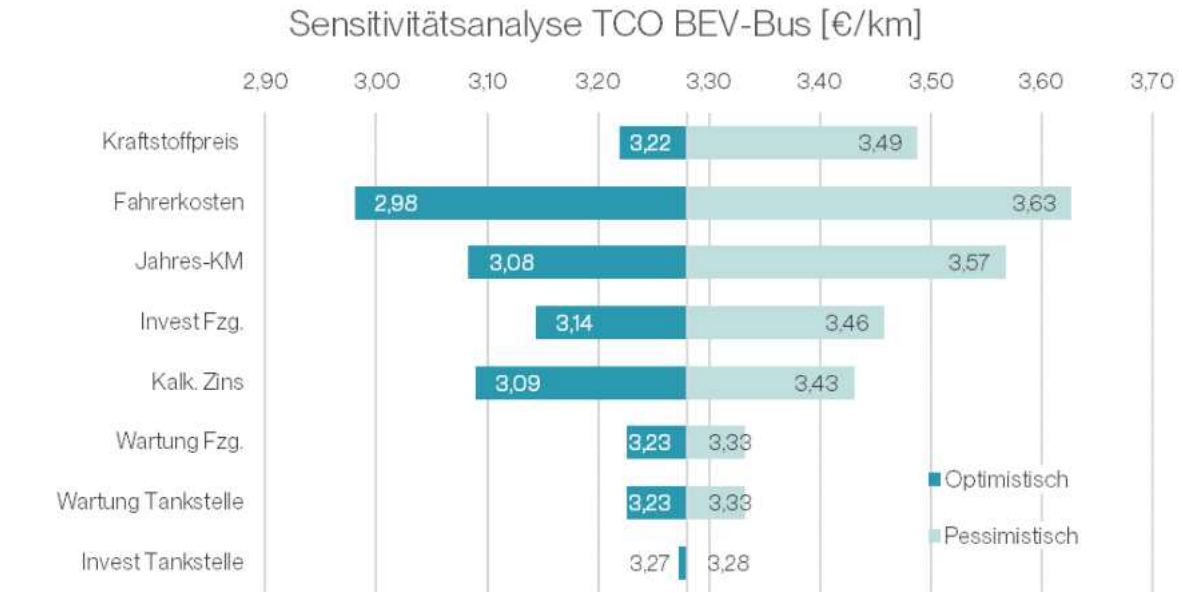


Abbildung 53: Ergebnisse der Sensitivitätsrechnung zum Basisfall mit TCO von 3,28 € / km für BEV-Busse im städtischen Raum

6.5.3. Technologiepfad „FCEV-Zug“

FCEV-Züge (Hydrogen Electric Multiple Unit (HEMU)) stellen neben batterieelektrischen Zügen (Battery Electric Multiple Unit (BEMU)) auf nicht elektrifizierten Bahntrassen eine gute Möglichkeit zur Defossilisierung des Schienenverkehrs dar. Daher sollen im anschließenden Abschnitt die TCO für FCEV-Züge dargelegt werden. Für eine genauere Untersuchung sei auf die Studie des VDE verwiesen, der im Jahr 2020 bereits eine ausführliche Studie zu klimaneutralen Alternativen von Dieselzügen im Vergleichsnetz Düren durchgeführt hat [74].

Die Annahmen für den Anwendungsfall des FCEV-Zuges (siehe Abbildung 54) beruhen zum Großteil auf [74], werden jedoch durch eigene Annahmen erweitert. Ein FCEV-Zug verbraucht auf dem zugrunde gelegten Abschnitt 23 kg_{H2} / 100 km bei einer Jahresfahrleistung von 150.000 km pro Zug. Dabei sind die FCEV-Züge 30 Jahre in Nutzung und deren Investitionskosten belaufen sich auf etwa 6,9 Mio. €. Es wird davon ausgegangen, dass die Beschaffungskosten um 20 % bei Verdopplung der Produktion fallen. Auch für FCEV-Züge können öffentliche Förderungen beantragt werden. In diesem Fall wird mit einer Förderung von 40 % der Investitionsmehrausgaben zu einem konventionellen Dieselzug gerechnet. Die untersuchte Flotte orientiert sich an der Planung des Kreises Düren und der Rurtalbahn für die Beschaffung von FCEV-Zügen, die bereits vor dem Jahr 2030 zwölf FCEV-Züge angeschafft haben wollen. Die H_2-Bezugskosten liegen, genauso wie die Fahrerkosten, auf gleichem Niveau wie bei den FCEV-Bussen. Zu Beginn belaufen sich die H_2-Kosten auf 12,85 € / kg_{H2}, sinken jedoch im Zeitverlauf auf 6 € / kg_{H2} ab. Die Fahrerkosten bzw. prozentualen Wartungskosten werden mit 35 € / h bzw. 2,5 % der Investitionskosten gleich hoch wie bei den untersuchten Bussen angenommen.

In der TCO-Berechnung wird mit einer zentralen Zugtankstelle mit einer Kapazität von



Verbrauch: 23 kg_{H2}/100km
Jahresumlauf: 150.000 km
Nutzungsdauer: 30 Jahre

Investitionskosten:	6.900.000 €
Lernrate:	20 % bei Verdopplung der Produktion
Förderung:	40 %
Flottenentwicklung:	2025: 2 2030: 12 2035: 12
Kalk. Zins:	7 %
H_2-Preis [€/kg_{H2}]	2025: 12,85 2030: 8 2035: 6
Fahrerkosten:	35 €/h
Wartungskosten:	2,5 % der Investitionskosten

Abbildung 54: Annahmen der FCEV-Züge für die TCO-Betrachtung © Foto: ALSTOM

1.500 kg_{H2} / d gerechnet, die ausreicht, um die finale FCEV-Zugflotte von zwölf FCEV-Zügen mit Wasserstoff zu versorgen. Als Nutzungsdauer werden wie bei den Bustankstellen 15 Jahre angenommen. Trotz der größeren Kapazität wird wegen geringeren Anforderungen auf Tankseite (weniger Dispenser, weniger unmittelbar aufeinander folgender Betankungen (Back-to-back-Betankungen)) mit dem gleichen Preis wie bei Bustankstellen von 6 Mio. € gerechnet, für welche die gleiche Förderung zur Verfügung steht. Die restlichen Annahmen sind identisch zum Anwendungsfall der FCEV-Busse im ländlichen Raum und sind in nachfolgender Abbildung aufgeführt.



Kapazität: 1.500 kg_{H_2}/d

Nutzungsdauer: 15 Jahre

Investitionskosten:	6.000.000 €
Lernrate:	20 % bei Verdopplung der Produktion
Förderung:	80 %
Anzahl:	2025: 1 2030: 1 2035: 1
Kalk. Zins:	7 %
Strombedarf:	2 kWh/kg_{H_2} (Verdichtung & Kühlung)
Strompreis [ct/kWh]	2025: 60 2030: 20 2035: 15
Wartungskosten:	2,5 % der Investitionskosten

Abbildung 55: Kostenannahmen der Tankstelleninfrastruktur für die TCO-Betrachtung von FCEV-Zügen

Die kilometerspezifischen TCO sind mit fast 9,50 € / km aufgrund der deutlich höheren Investitionskosten mit Abstand die Höchsten der untersuchten Technologien. Dennoch kommt es mit knapp 30 % zu der größten prozentualen wie auch absoluten Kostenabnahme, was hauptsächlich an den sinkenden Verbrauchskosten von Wasserstoff und Strom liegt. Außerdem wird die H_2-Tankstelle in späteren Jahren besser ausgelastet. In den ersten Jahren tanken dort nur zwei FCEV-Züge, obwohl sie für mindestens zwölf Züge ausgelegt ist.

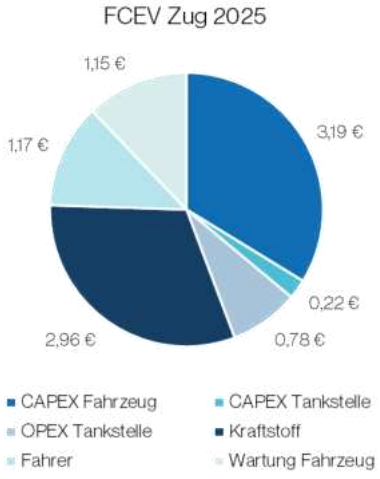


Abbildung 56: Aufschlüsselung der TCO für den FCEV-Zug im Jahr 2025

In der Abbildung 55 sind die einzelnen Kostenbestandteile der TCO von FCEV-Zügen aufgeschlüsselt. Aufgrund der hohen Investitionskosten und der deutlich höheren Fahrleistung fallen die Fahrerkosten mit knapp über 10 % weniger ins Gewicht als bei den beiden zuvor betrachteten Anwendungsfällen. Insgesamt fällt auf, dass die Investitionskosten der Fahrzeuge mit 34 % eine bedeutendere Rolle einnehmen, wodurch die gesamten variablen Kosten (OPEX Tankstelle, Wartung Fahrzeuge, Fahrerkosten, Kraftstoffkosten) nur noch für gut 60 % verantwortlich sind. Die Kraftstoffkosten tragen mit 32 % genauso viel wie bei den FCEV-Bussen zu den Gesamtkosten bei.



Abbildung 57: Entwicklung der TCO von FCEV-Zügen

Abermals werden zwei Alternativszenarien „Optimistisch" und „Konservativ" zur Untersuchung der Sensitivitäten einzelner Rahmenbedingungen gebildet (siehe Tabelle 9). Im optimistischen Szenario wird die Jahresfahrleistung auf 233.000 km erhöht und die Beschaffungskosten deutlich auf 4,5 Mio. € gesenkt [75]. Demgegenüber reduziert sich die Fahrleistung im konservativen Szenario um 20 %. Die restlichen Parameter werden wie in Tabelle 9 bei den FCEV-Zügen variiert.

Wieder werden für die durchschnittlichen TCO des Betrachtungszeitraums die Auswirkungen der Sensitivitätsanalyse in Abbildung 58 in der gleichen Reihenfolge wie bei den FCEV- und BEV-Bussen dargestellt. Die FCEV-Züge reagieren weniger sensitiv auf Variationen der Personalkosten im Gegensatz zu den Bussen, da diese bei den höheren Investitionskosten nicht maßgeblich für die TCO sind. Größter Einflussfaktor sind in diesem Fall die gefahrenen Jahreskilometer, die im optimistischen Szenario um 55 % erhöht werden und dadurch die kilometerspezifischen TCO um rund 20 % auf durchschnittlich 6,26 € / km absenken. Außerdem reagieren die TCO auf Veränderungen der Investitionskosten sehr sensibel, die für mehr als ein Drittel der TCO im Jahr 2025 verantwortlich sind (siehe Abbildung 58). Aufgrund der hohen Investitionskosten zur Beschaffung ist ebenfalls der Einfluss des kalkulatorischen Zinssatzes erhöht.

Tabelle 9: Rahmenbedingungen des Basisszenarios und der beiden Sensitivitätsszenarien „Optimis-tisch" und „Konservativ" für FCEV-Züge (reale Preise)

		Basiswerte			Optimistisch			Konservativ		
		2025	2030	2035	2025	2030	2035	2025	2030	2035
Fahrerkosten	[€ / h]	35,0	35,0	35,0	26,9	29,0	31,3	42,0	42,0	42,0
Kraftstoffpreis	[€ / kg_{H2}]	12,9	8,0	6,0	8	5	5	15	12,5	10
Jahreskilometer	[1.000 km / a]	150	150	150	233	233	233	120	120	120
Investition Fahrzeug	[1.000 €]	6.900	6.210	5.520	4.500	3.600	2.880	6.900	6.555	6.227
Kalkulatorischer Zins	[-]	0,07	0,07	0,07	0,03	0,03	0,03	0,10	0,10	0,10
Wartung Fahrzeug	[-]	0,025	0,025	0,025	0,02	0,02	0,02	0,05	0,05	0,05
Investition Tankstelle	[1.000 €]	6.000	5.400	4.800	3.500	2.800	2.240	6.500	5.200	4.160
Wartung Tankstelle	[-]	0,025	0,025	0,025	0,02	0,02	0,02	0,05	0,05	0,05

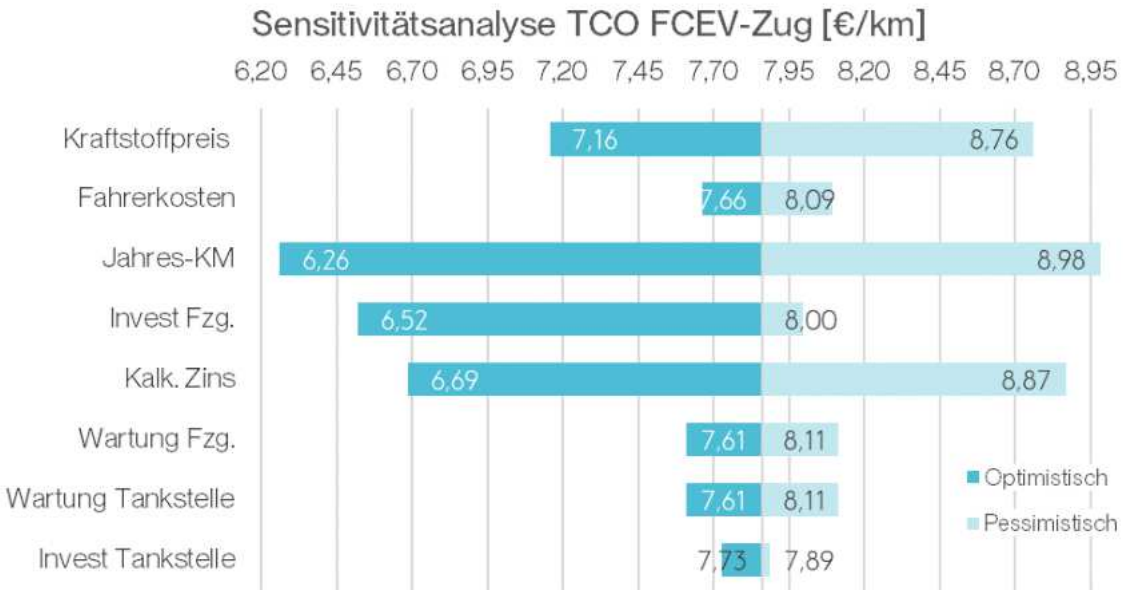


Abbildung 58: Ergebnisse der Sensitivitätsrechnung zum Basisfall mit TCO von 7,86 € / km für FCEV-Züge

6.6. Vergleich der Mobilitätstechnologiepfade

Bei allen Flotten reduzieren sich die TCO über den betrachteten Zeitraum aufgrund der angenommenen Kostendegression der Verbrauchskosten sowie der optimaleren Ausnutzung der Tankinfrastruktur (siehe nachfolgende Abbildung). Dabei liegen die TCO der BEV- und FCEV-Busse in allen Stützjahren auf einem ähnlichen Niveau. Die größte Abweichung tritt unter den getroffenen Annahmen im Jahr 2035 auf und beträgt weniger als 10 %. FCEV-Züge zeichnen sich durch deutlich höhere Passagierkapazitäten aus, was sich in höheren Investitionskosten pro Fahrzeug niederschlägt, wodurch die reine Betrachtung der kilometerspezifischen Kosten nicht aussagekräftig ist und die höheren kilometerspezifischen Kosten begründet.

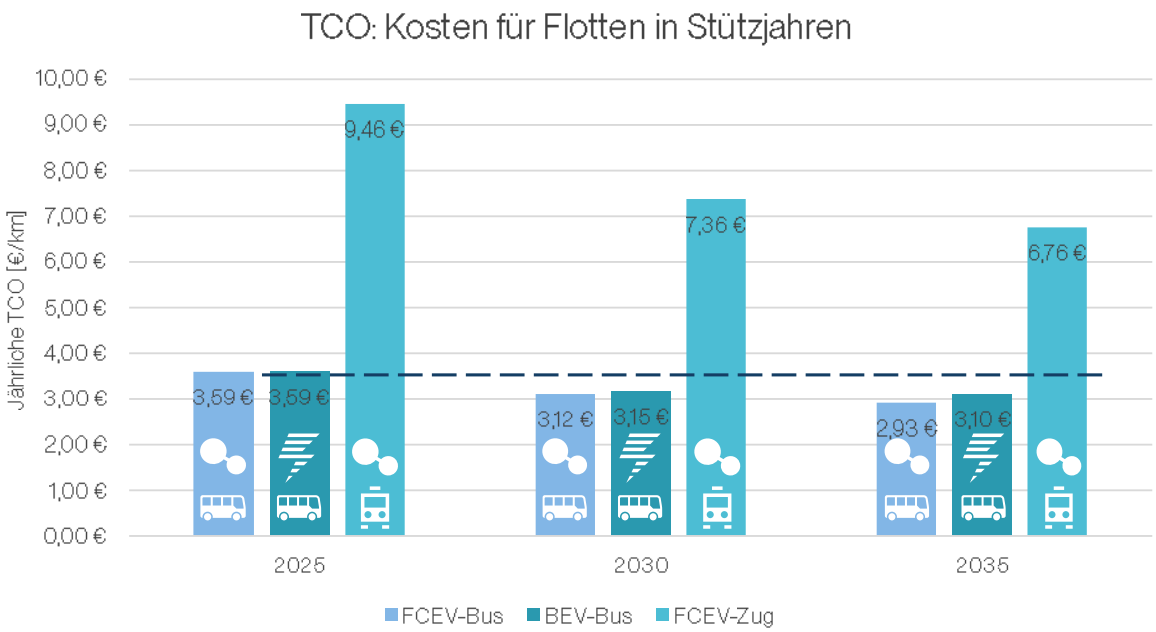


Abbildung 59: Vergleich der kilometerspezifischen TCO von FCEV-Bussen, BEV-Bussen und FCEV-Zügen in den Stützjahren 2025, 2030 und 2035. Die gestrichelte Linie markiert die TCO der günstigsten Mobilitätstechnologie (FCEV-Bus) im ersten Stützjahr 2025

Werden für eine Sensitivitätsrechnung die unterschiedlichen Fahrleistungen angeglichen, sodass alle Technologien mit 70.000 km pro Jahr die postulierte Jahresfahrleistung der FCEV-Busse aufweisen (siehe Abbildung 60), zeigt sich, dass sich die Kostenreihenfolge der beiden Busalternativen vertauscht. Bei gleicher angenommener Fahrleistung sind die BEV-Busse stets geringfügig günstiger als ihre Brennstoffzellenalternativen. Für die FCEV-Züge bedeutet die ungefähre Halbierung der Jahreskilometer einen weiteren Anstieg der TCO.

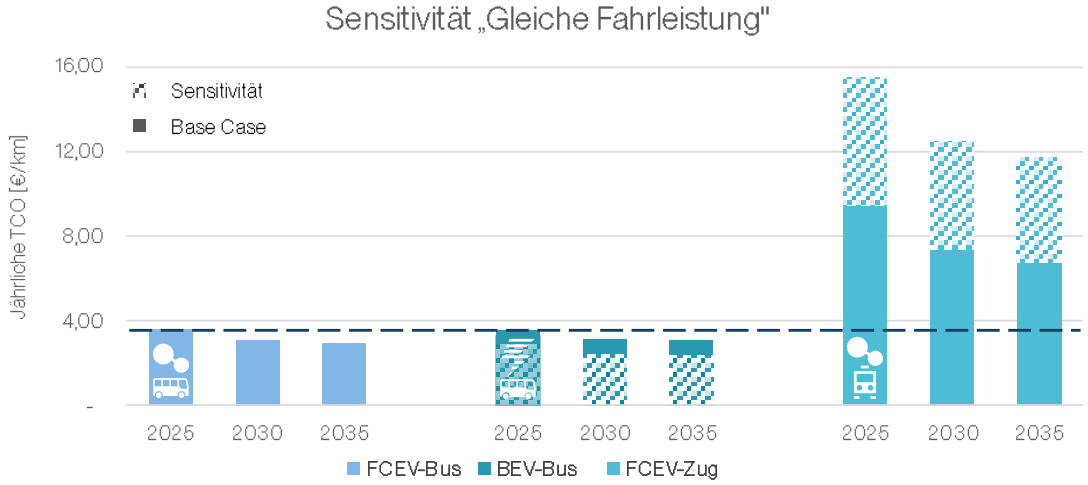


Abbildung 60: Ergebnisse der Sensitivität „Gleiche Fahrleistung". Die gestrichelte Linie markiert die TCO der günstigsten Mobilitätstechnologie (BEV-Bus) im ersten Stützjahr 2025

Wird neben der Fahrleistung zusätzlich die Passagierkapazität berücksichtigt, ergibt sich eine andere Konstellation wie in Abbildung 61 zu sehen ist. Dafür werden die durchschnittliche Auslastung der unterschiedlichen Transportmodi in Deutschland und deren Fahrgastkapazität miteinbezogen [76]. Durch die personenspezifische Betrachtung fallen die Unterschiede zwischen den Verkehrsträgern deutlich geringer aus. Die TCO der Busse bleiben weiterhin gering und bewegen sich zwischen 0,20 und 0,24 € / Personenkilometer. FCEV-Züge sind mit 0,09 bis 0,12 € / Personenkilometer wegen ihrer deutlich größeren Fahrgastkapazität und im Durchschnitt höheren Auslastung nur etwa halb so teuer wie die Busalternativen.

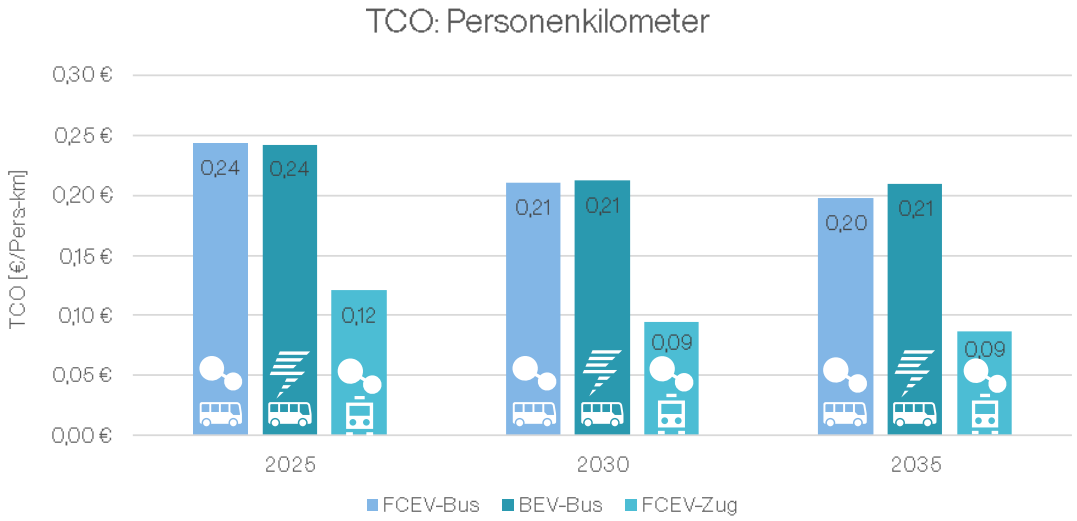


Abbildung 61: TCO bezogen auf die Personenkilometer

7. Strategie mit Roadmap

Die H_2-Strategie für die Region AachenPLUS basiert auf Grundlage der in den vorherigen Kapiteln erarbeiteten Ergebnisse der Ist-Analyse und wurde gemeinsam mit den Akteurinnen und Akteuren der Region erarbeitet. Zur Umsetzung der Strategie wurden Roadmaps für die unterschiedlichen Bereiche der H_2-Wertschöpfungskette entwickelt. Zunächst wird in diesem Kapitel die Vision der Region AachenPLUS vorgestellt. Anschließend wird die zukünftige Zusammenarbeit mit einer exemplarischen Governance-Struktur zur Umsetzung der Strategie präsentiert und es wird auf grenzüberschreitende Aktivitäten eingegangen. Abschließend werden die Strategien mit den Roadmaps für die unterschiedlichen Wertschöpfungsbereiche vorgestellt.

7.1. Unsere Vision

Motiviert durch das Bestreben, den Hochlauf der H_2-Wirtschaft in der Region AachenPLUS sicherzustellen, verständigten sich beteiligte Akteurinnen und Akteure aus Politik, Wirtschaft und Wissenschaft im Rahmen des Projektes HyExperts AachenPLUS auf eine gemeinsame Mission: Den Strukturwandel zusammen mit den beteiligten Gebietskörperschaften stemmen und die Wertschöpfung in der Region durch den Aufbau und Ausbau der Standortfaktoren Wasserstoff und Erneuerbare Energien erhalten und weiter ausbauen. Dies erfordert, die Energieversorgung sektorübergreifend neu zu denken und umzusetzen.

Unser Slogan: Die Vision auf den Punkt gebracht

Überregional und europäisch stehen wir vor der Herausforderung, den Strukturwandel nachhaltig zu gestalten. Das Zielbild des Hochlaufs und der Etablierung einer H_2-Wirtschaft in der Region AachenPLUS steht unter den Prämissen, Versorgungssicherheit zu schaffen, die Standortattraktivität zu erhalten, die Verkehrswende umzusetzen und dabei Arbeitsplätze zu sichern und neue zu schaffen.

Ein Standortvorteil der Region AachenPLUS ist, dass diese eine Wissenschaftsregion in Grenzlage zu Belgien und den Niederlanden ist. Dies bietet die einzigartige Chance, die Region zu einer grenzüberwindenden Modellregion für Wasserstoff zu entwickeln, sodass ein attraktiver Raum für Technologieunternehmen und Forschungseinrichtungen entsteht.

Der Hydrogen Hub Aachen unterstützt dieses Zielbild, indem er u. a. Forschung und Industrie zusammenbringt, den Austausch fördert und eine gemeinsame Position aller Akteurinnen und Akteure vertritt. Dabei gilt es, die verschiedenen Beteiligten aus Industrie, Forschung und Politik mit ihren unterschiedlichen Interessen und Handlungskompetenzen auf das gemeinsame Zielbild zu koordinieren. Um ebendieses Zielbild für die heterogene

Akteurslandschaft zu formulieren, wurden vier Workshops zur gemeinsamen Zielfindung und -priorisierung sowie Ableitung und Formulierung von Strategien und Roadmaps abgehalten. Um zudem die Vision in einem Slogan zu konkretisieren, wurde eine Fishbowldiskussion durchgeführt. Somit werden die Mission und Vision durch folgenden Slogan auf den Punkt gebracht:

H_2-Region AachenPLUS.
Gemeinsam:
Grenzen überwinden - Strukturen wandeln - Wissen schaffen

7.2. Zukünftige Zusammenarbeit

Um die Vision für die Region AachenPLUS verwirklichen zu können, werden in den folgenden Abschnitten Strategien mit Roadmaps für die unterschiedlichen Wertschöpfungsbereiche vorgestellt. Damit diese auch umgesetzt werden, empfiehlt sich die Festlegung einer Governance-Struktur. Eine solche ist exemplarisch in Abbildung 62 dargestellt. Darin werden Strukturen und Prozesse zur Erreichung der übergeordneten Ziele definiert und Verantwortlichkeiten dafür sowie für Meilensteine und Maßnahmen, die zur Zielerreichung notwendig sind, konkret Personen oder Institutionen zugewiesen.

In der dargestellten exemplarischen Governance-Struktur liegt die Gesamtkoordination beim Hydrogen Hub Aachen. Der Hydrogen Hub hält Kontakt zu relevanten Institutionen wie zur Nationalen Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NOW) oder zu Ministerien. Außerdem steht der Hydrogen Hub in Kontakt zu den nationalen und europäischen Nachbarregionen. Er informiert weiterhin die (Fach-)Öffentlichkeit über H_2-aktivitäten in der Region. Hierzu kann unter anderem das im Rahmen des HyExperts entwickelte Konzept für die Entwicklung einer digtialen Plattform, die bereits erarbeitetes Know-how zum Beispiel in Form von Studien oder Projektergebnissen enthält, umgesetzt werden. Das Konzept „Wissensplattform und Kompetenzatlas“ sowie dessen Genese ist ausführlich im Anhang beschrieben.

Derzeit ist der Hydrogen Hub Aachen in die Struktur der Industrie- und Handelskammer Aachen integriert. Die Schaffung eines eigenen rechtlichen Rahmens für den Hydrogen Hub ist zu empfehlen. Hierbei ist im Detail zu klären, welche Rechtsform die Bedürfnisse am besten erfüllt. Ein Beispiel für einen solchen eigenständigen Rechtsrahmen stellt der Wasserstoffverein Hy.Region.Rhein.Ruhr e. V. oder der benachbarte HyCologne – Wasserstoff Region Rheinland e. V. dar. Eine eigenständige Struktur ermöglicht schnelle Entscheidungswege zum Beispiel als Reaktion auf zeitlich begrenzte Fördermöglichkeiten. In der Vereinssatzung oder einem Gesellschaftervertrag sind auch die bereits skizzierten und in der Abbildung weitergehend dargestellten Aufgaben zu präzisieren. Des Weiteren muss eine (Beitrags-)struktur entwickelt werden, die die finanziellen Aufwände des Hydrogen Hubs deckt und möglichst alle Akteurinnen und Akteure der Region AachenPLUS, über die derzeit den Hydrogen Hub

finanzierenden Gebietskörperschaften hinaus, mit einbezieht. Der Hydrogen Hub ist mit dem entsprechend der Aufgaben erforderlichen Personal auszustatten.

In einem zu schaffenden Gremium sind die Gebietskörperschaften der Region AachenPLUS, der Hydrogen Hub sowie Vertreter aus Arbeitsgruppen vertreten. In halbjährlich stattfindenden Treffen informieren die Arbeitsgruppenrepräsentaten über den Fortschritt in ihren Bereichen und es können Entscheidungen getroffen werden. Das Gremium benennt einen H_2-Botschafter für die Region, der über ein starkes Netzwerk verfügt und die Belange der Region in Industrie und Politik entsprechend vertreten kann. Um der regionalen Perspektive auf Bundesebene noch mehr Gehör zu verschaffen, stellt der Beitritt in den diesjährig gegründeten Bund der H_2-Regionen (BdWR) eine sinnvolle Möglichkeit dar. Mit diesem Einfluss können Hemmnisse für die Umsetzung einer H_2-Wirtschaft auch in der Region AachenPLUS beseitigt werden.

Die bereits während des Projektes etablierten Arbeitsgruppen können bestehen bleiben bzw. wie dargestellt thematisch zugeschnitten werden. Eine Repräsentanz relevanter Akteurinnen und Akteure in den Arbeitsgruppen muss gewährleistet sein. Hierzu sind diese gegebenenfalls nochmal verstärkt anzusprechen. Insbesondere ausgewählte Industriepartner sollten verstärkt eingebunden werden. In den Arbeitsgruppen wird je ein Verantwortlicher für die Umsetzung der Roadmap gewählt. Dieser erstattet dem Gremium Bericht. Sollte sich kein Kandidat für die Wahl eines Verantwortlichen finden lassen, wird das Gremium einen Kandidaten stellen. In den Arbeitsgruppen können Kümmerer gewählt werden, die die Verantwortlichen bei der Umsetzung konkret zugewiesener Maßnahmen zur Meilenstein- und Zielerreichung unterstützen.

Zur Umsetzung und Beschleunigung der Strategie ist die Teilnahme an einem weiteren Programm zu empfehlen. Zwar ist derzeit kein weiterer Förderaufruf für ein HyPerformer bekannt, jedoch stellen Hydrogen Valleys eine weitere Möglichkeit dar. Hierbei handelt es sich typischerweise um eine Bündelung von Investitionen, die den Großteil der H_2-Wertschöpfungskette umfassen und auf eine Region fokussiert sind. Der Aufbau von Hydrogen Valleys wird durch das Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU) in Zusammenarbeit mit europäischen Gebietskörperschaften unterstützt. Hydrogen Valleys sollen die regionale wirtschaftliche Entwicklung vorantreiben, dabei Arbeitsplätze schaffen und auf andere Regionen übertragbar sein. Gerade vor dem Hintergrund der grenzüberwindenden Vision der Region AachenPLUS und der damit verbundenen besonderen Fördermöglichkeiten sollen die europäischen Nachbarregionen zukünftig noch stärker mit in die Planung sowie die Umsetzung einbezogen werden. Daher sollte auch grenzüberwindende Zusammenarbeit stark in den Fokus genommen werden.

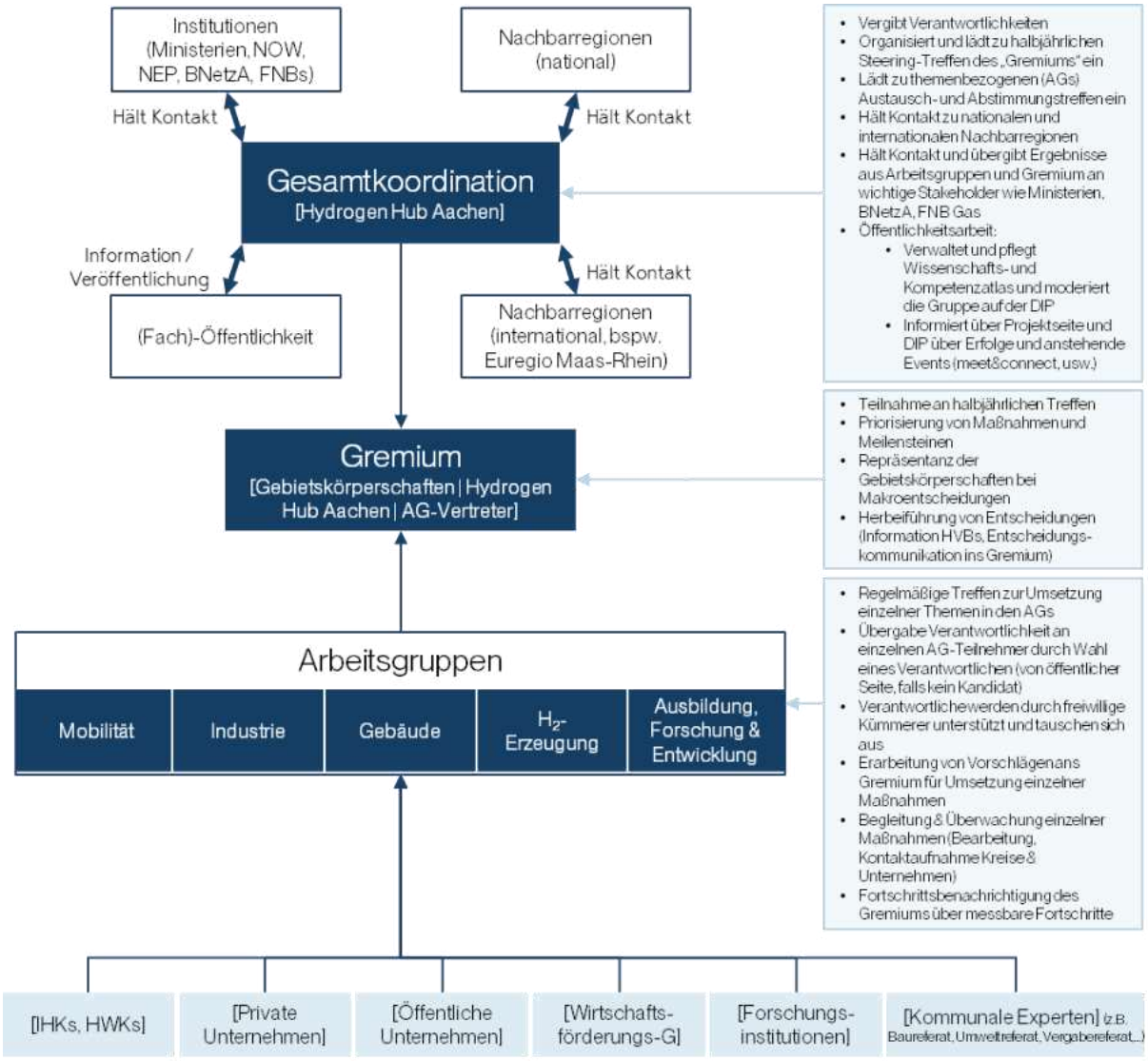


Abbildung 62: Beispielhafte Governance-Struktur zur Umsetzung der H_2-Strategie

7.3. Grenzüberwindende Aktivitäten

Eine **grenzüberwindende Betrachtung** ist für die Region AachenPLUS von entscheidender Bedeutung, um die künftige H_2-Versorgung zu sichern und gemeinsam internationale H_2-Projekte zu entwickeln. In unmittelbarer Grenznähe in den Regionen belgisch- und niederländisch Limburg sowie der Provinz Lüttich sind viele potenzielle Partner aus dem Bereich der H_2-Wirtschaft angesiedelt. Aus vorherigen Analysen ist ersichtlich, dass es keine Fokussierung auf einen Sektor der H_2-Wertschöpfungskette gibt. Die Unternehmen der grenzübergreifenden Region sind entlang der verschiedenen Bereiche wie etwa Erzeugung, Nutzung oder Forschung verteilt, woraus sich das Potenzial ergibt, grenzübergreifend die gesamte H_2-Wertschöpfungskette gemeinsam mit internationalen Partnern abzudecken [77]. Dafür ist es notwendig, im Zuge der **transnationalen Zusammenarbeit**

in der Euregio Maas-Rhein Partner für gemeinsame Projekte zu identifizieren und zu vernetzen. Konkret sollte hierfür die Zusammenarbeit mit den euregionalen Netzwerken, wie etwa Waterstofnet, LIOF, POM Limburg oder dem Cluster TWEED und dem H2hub Wallonia verstärkt werden. Dies kann beispielsweise auch durch die **Gründung einer übergeordneten Struktur für die Koordination der transnationalen Aktivitäten** erfolgen. Hier könnte der europäische Ansatz des Hydrogen Valley Konzepts genutzt werden.

Das H_2-Erzeugungspotenzial zur Deckung der zukünftigen regionalen H_2-Bedarfe in den Grenzregionen ist limitiert und bedarf einer grenzübergreifenden Betrachtung. Regionen wie die Region AachenPLUS werden zukünftig als H_2-Senke gelten und auf Importe angewiesen sein. In den Niederlanden und in Belgien existieren jeweils Pläne für eine nationale H_2-Pipelineinfrastruktur. Die nationalen Infrastrukturunternehmen sehen den Anschluss der industriereichen Regionen im Rheinland und Ruhrgebiet als einen strategisch wichtigen Baustein für die Erschließung künftiger Marktanteile an [26], [78]. Der ca. 30 km von der niederländisch-deutschen Grenze entfernt gelegene Chemiepark Chemelot spielt dabei in den Infrastrukturplänen eine Rolle als signifikante H_2-Senke und wird in das zukünftige H_2-Netz in den Niederlanden integriert werden. Eine Pipelineanbindung der Region AachenPLUS über den Chemiepark Chemelot ermöglicht eine direkte Verbindung der H_2-Quellen in den Niederlanden mit den regionalen Bedarfsregionen sowie dem Ruhrgebiet und Rheinland. Die Lage der Region AachenPlus ist dabei von strategischer Bedeutung, da die bereits geplanten Pipelinevorhaben für eine Verbindung der entstehenden H_2-Netze in Belgien, den Niederlanden und Deutschland unter anderem durch die Region laufen werden (vergleiche Abbildung 63). Im Zuge des Pipelineneubaus Eynatten-Porz (H2ercules Projekt) entsteht eine solche grenzüberschreitende Verbindung. Das Ziel der Region AachenPLUS muss es daher sein als **Ermöglicher und Partner für grenzüberschreitende Pipelinevorhaben** zu agieren und diese Projekte zu nutzen, um den dauerhaften **Zugang zum entstehenden übergreifenden Marktgebiet für Wasserstoff zu ermöglichen** (beispielsweise durch frühzeitige Planung von Verteilnetzstichleitungen in die Region).

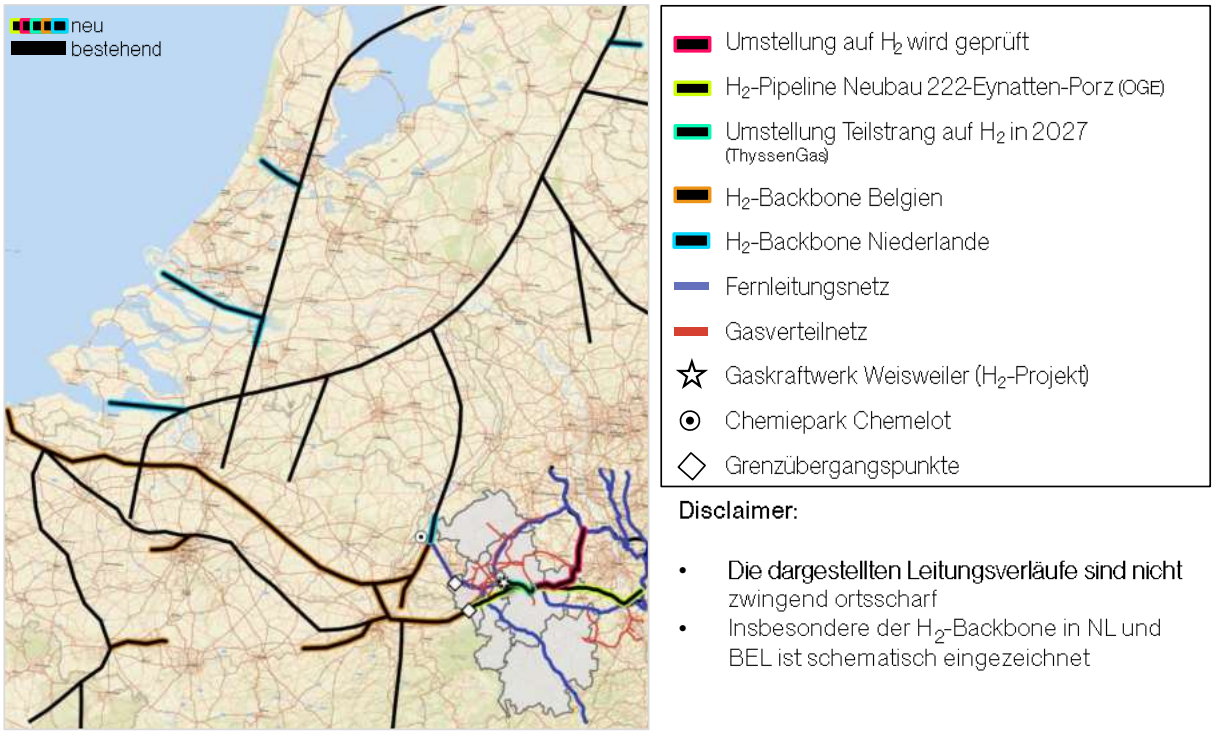


Abbildung 63: Mögliche Anbindungen an das belgische und niederländische H_2-Netz, eigene Abbildung

7.4. Erzeugungspfade und -strukturen

Die Strategie im Bereich **Erzeugungspfade und -strukturen** soll, wie die in anderen Bereichen, der Verwirklichung der gemeinsamen Vision dienen. Hierzu sind bestimmte nachfolgend beschriebene **Ziele** anzustreben.

Zunächst soll der Fokus auf die Erzeugungsseite gelenkt werden. Basis der Erzeugung von Grünem Wasserstoff ist die **Bereitstellung von elektrischer Energie aus Erneuerbaren Quellen**. Das Ziel, den **„Ausbau regionaler EE"** voranzutreiben und zu forcieren, wo immer es geht, kann als „no regret Option" angesehen werden. Die in Kapitel 3 beschriebenen Untersuchungen haben gezeigt, dass in der Region erhebliche Potenziale zum Ausbau von EE existieren. Gleichwohl wird es nicht zu einem bilanziellen Überschuss an EE-Strom kommen, da auch große Verbraucher in der Region ansässig sind und der Verbrauch an elektrischer Energie zunehmen wird. Der EE-Strom wird also bilanziell nicht „im Überfluss" vorhanden sein. Angesichts dieser absehbaren Knappheit an EE-Strom ist der Ausbau der EE eine sichere Strategiekomponente. Die detaillierten Schritte zur Erreichung dieses allgemeingültigen Ziels wurden im Rahmen dieser H_2-Studie nicht weiter untersucht. Sie unterliegen maßgeblich der Planungshoheit der Kommunen.

Die Verwendung des regionalen EE-Stroms kann auf verschiedene sinnvolle Arten Baustein der Strategie sein. Die direkte Verwendung ist zwar ohne Bezug zum Wasserstoff, dennoch aufgrund der hohen Effizienz durch ausbleibende Verluste in Elektrolyse, Transport, Speicherung und gegebenenfalls

Rückverstromung eine gesamtsystemisch begrüßenswerte Nutzungsvariante.

Bezüglich der Wasserstoffstrategie sollte es ein Ziel sein, in sinnvollen Anwendungsfällen den regionalen EE-Strom zur H_2-Produktion zu verwenden **(„Verwendung von regionalem EE-Strom zur Elektrolyse“)**. Diese Fälle sind wichtig für die Hochlaufphase, da Erfahrungen gesammelt und erste Infrastrukturinseln geschaffen werden können. Das Verhältnis zu einem später folgenden Backbone (Anschluss oder Konkurrenz) muss direkt mit bedacht werden. Soll der regionale EE-Strom einer H_2-Erzeugung zugeführt werden, sind hierbei verschiedene Aspekte zu bedenken. Zum einen müssen die Anforderungen der EU-Gesetzgebung berücksichtigt werden. Dies kann beispielsweise durch die zeitgleiche Nutzung und/oder räumliche Verbindung von EE-Anlage und Elektrolyseur erfolgen. Außerdem muss für die Erzeugung von Wasserstoff aus regionalem EE-Strom ein positiver Business Case gegeben sein, d.h. ein Investor muss eine Rentabilität in der Aktivität erkennen. Für diese Überlegung sind insbesondere eine hohe Vollbenutzungsstundenzahl des Elektrolyseurs sowie eine rasche Refinanzierung der Investition ausschlaggebend. Letzteres wird dadurch erforderlich, dass in den 2030er Jahren für den regional erzeugten Wasserstoff mit Konkurrenz aus einem weiträumigen H_2-Pipeline-Backbone zu rechnen ist. Damit Elektrolyse sich als Business Case lohnt, sind also hohe Vollbenutzungsstunden und eine zeitnahe Amortisation Voraussetzung. Insgesamt ist die Verwendung des regionalen EE-Stroms ein Strategieelement, welches im Einzelfall sorgfältig abgewogen werden muss. Daher sollten **Anwendungsbeispiele auf- und vorhandene ausgebaut** werden. In günstigen Konstellationen, zum Beispiel aus lokalem Zusammentreffen von EE-Erzeugung, Standortvorteilen für die Elektrolyse und H_2-Bedarf, können systemisch sinnvolle und wirtschaftlich **lukrative Inseln** der H_2-Produktion aus regionalem Grünstrom entstehen. Hierbei ist es Aufgabe des Hydrogen Hubs, ebensolche lukrativen Inseln zu identifizieren, H_2-Bedarfe zu poolen und die Vernetzung und den Wissensaustausch zwischen den Projekten zu schaffen und sicherzustellen.

Ein zweiter Aspekt desselben Ziels besteht darin, sich auf die **Verwendung von importiertem EE-Strom für Elektrolyse** vorzubereiten. Hierbei ist die Betrachtung als Strategieelement etwas abweichend. Die Erzeugung von Wasserstoff aus importiertem EE-Strom unterliegt bezüglich der Rentabilität denselben Anforderungen eines Investors wie zuvor ausgeführt. Die Randbedingungen sind dabei aber komplexer, denn einerseits ist zu beachten, was die EU-Gesetzgebung für räumlich nicht zusammenliegende Kombinationen von EE-Erzeugung und Elektrolyse vorschreibt. Dies betrifft die Anforderungen an Gleichzeitigkeit der Erzeugung und an die ausschließliche Verwendung von EE-Strom. Ein **PPA ist eine Voraussetzung** zur Nutzung dieses Strategieelements. Andererseits ist die wirtschaftliche Situation schwieriger als bei Standortgleichheit von Elektrolyse und EE-Erzeugung, da Netzentgelte und staatlich induzierte Preiskomponenten ((SIP), also Steuern, Gebühren, Umlagen etc.) den Strom im Business Case eines Investors verteuern. Außerdem ist zu bedenken, dass diese Art der H_2-Erzeugung keinerlei regionale Vorteile aufweist. Sie kann grundsätzlich an jedem Ort in Deutschland stattfinden.

Eine Sonderform dieses Strategieansatzes besteht in der möglichen **Nutzung direkt importierter Windstromerzeugung aus den HGÜ-Trassen,** die die Offshore-Windparks anbinden und von denen eine in die Region

führen soll. Falls es gelingen sollte, diese EE-Mengen mit einem PPA zu kontrahieren, könnten hier die Vorteile der Standortgleichheit (je nach finaler Auslegung der EU durch eine Direktleitung gegeben) mit den hohen Vollbenutzungsstunden des Offshore-Windes kombiniert werden. Zwar ist die Konkurrenz um diese EE-Kontingente voraussichtlich groß, doch stellt die skizzierte Kombination ein interessantes Element der Strategie dar.

Um das zusammenfassende **Ziel der H_2-Bedarfsdeckung durch Eigenproduktion und Import** zu erreichen, ist zudem die **kontinuierliche Koordination und Abstimmung** zwischen den Stakeholdern erforderlich.

Zusammenfassend lässt sich die Strategie und Roadmap im Bereich „Erzeugungspfade und -strukturen" aus den Ziel-Bausteinen

- **„Ausbau regionaler EE"** (gemäß geltenden Plänen der Bundesregierung, auch zur Verwendung in der Elektrolyse),
- **„Verwendung von regionalem EE-Strom für Elektrolyse und von importiertem EE-Strom für Elektrolyse"** (insbesondere „Lukrative Inseln")
- **„H_2-Bedarfsdeckung durch Eigenproduktion und Import"** (Aktivitäten starten / weiterführen) zusammensetzen.



* Synergien mit Roadmap Transmission und Distribution

Abbildung 64: Sektorenroadmap Erzeugungspfade und-strukturen

7.5. Transmission und Distribution

Für die sektorübergreifende Nutzung von Wasserstoff ist die nachhaltige und kostengünstige Versorgung der Region eine grundlegende Voraussetzung. Um dies zu erreichen, wurden drei grundlegende Ziele in Bezug auf den Aufbau von Transmissions- und Distributionspfaden in der Region AachenPLUS definiert. Die mittelfristige **Anbindung an das internationale H_2-Netz bis 2030** ist das entscheidende Element bei der langfristigen Sicherstellung der H_2-Verfügbarkeit in der Region. Um den Wasserstoff in der Fläche der Region zu verteilen, ist das zweite wesentliche Ziel die Sicherstellung der **Verfügbarkeit von Wasserstoff über Trailer, Verteilhubs und Netz.** Der mittelfristige Aufbau bilateraler Versorgungspfade sowie der Ausbau des Verteilnetzes wird langfristig dafür sorgen, dass die Region AachenPlus Teil eines **übergreifenden Marktgebietes für Wasserstoff** wird, in dem Wasserstoff als handelbares Gut flächendeckend verfügbar ist.

Die Analyse aus Kapitel 4 zeigt, dass mittelfristig und langfristig der H_2-Bezug über umgerüstete und neugebaute **H_2-Pipelines die kostengünstigste Beschaffungsoption** darstellt. Eine Anbindung der Region AachenPLUS an den europäischen H_2-Backbone ist ab dem Jahr 2030 zu erwarten. Sowohl westlich der Region AachenPLUS in Belgien und den Niederlanden (Anschlusspunkt Chemiepark Chemelot), als auch östlich und nördlich im Rheinland und Ruhrgebiet wird der Ausbau und Anschluss an das europäische H_2-Netz vorangetrieben. Die Region AachenPLUS wird durch die geografische Lage zwischen den H_2-Hotspots in westlicher (zum Beispiel ZARA-Häfen) und nordöstlicher Lage (zum Beispiel Ruhrgebiet) künftig ein wichtiger Standort für den zusammenwachsenden H_2-Backbone sein. Der Import von Wasserstoff wird laut Veröffentlichung der Vereinigung der Fernleitungsnetzbetreiber Gas e.V. über den Grenzübergangspunkt in Eynatten laufen [19]. Für den Grenzübergangspunkt wird eine Importkapazität von bis zu 3,8 GW Wasserstoff auf Basis der verfügbaren Leitungskapazitäten angegeben. Innerhalb der Region sind zudem die ersten Projekte für H_2-Pipelines konzipiert. Konkrete Planungen bestehen seitens OGE und RWE im Rahmen des H2ercules Projektes, mit dem **Bau einer neuen Pipeline zwischen dem Importpunkt Eynatten und Porz** (Umsetzung im Jahr 2030) und Planung eines 750 MW Elektrolyseurs in Weisweiler bis 2032. Seitens Thyssengas bestehen Planungen für die **Umstellung der Leitung Weisweiler – Düren** (Umsetzung ab dem Jahr 2027) sowie einer Anbindungsleitung von Düren an das Netz der Nordrheinischen Erdgastransportleitungsgesellschaft (NETG) (in Prüfung). Durch die Lage der Region AachenPLUS zwischen den Bedarfshotspots im Rheinland sowie am Chemiepark Chemelot in den Niederlanden und den Erzeugungs- & Importkapazitäten an der Nordseeküste ist die Eintrittswahrscheinlichkeit der Umsetzung der genannten Transportnetzprojekte in der Region als hoch einzustufen. Um den Aufbau des internationalen H_2-Backbones aktiv zu stützen und zu ermöglichen, muss sich die Region als Akteur der Vernetzung zwischen den Europäischen Nachbarn darstellen und ihre Kontakte in die Niederlande und nach Belgien aktiv nutzen, um den Netzausbau zu begleiten. Um den Ausbau des H_2-Transportnetzes seitens der

Kommunen zu unterstützen ist es notwendig, Planungsverfahren rechtssicher und leicht umsetzbar zu machen, um Pipelinevorhaben schnell und effizient zu gestalten. Um entsprechenden Herausforderungen, die bei den Kommunen entstehen können, vorzubeugen soll dafür einen **H_2-Pipeline-Leitfaden entwickelt werden**. Inhalt des Leitfadens sollte sein, regulatorische sowie planungs- und genehmigungsrechtliche Herausforderungen für die Kommunen bei der Umsetzung von Pipelineprojekten auf Transport- und Verteilnetzebene zu identifizieren. Der Leitfaden sollte kurzfristig entwickelt werden und Kommunen-übergreifend bei der **Planung und Genehmigung von Pipelineprojekten** wirken. Neben den bereits in Planung befindlichen Transportpipelineprojekten sollten weitere **Schnittstellen mit dem Transportnetz**, etwa durch eine **Anbindung an das Netz der NETG** geprüft werden. Hieraus ergibt sich die Aufgabe eine **Evaluation der Transportnetzplanung und möglichen Anbindungsmöglichkeiten in die Region** durchzuführen. Bis spätestens 2027 sollen so die Voraussetzungen für den Anschluss von Verteilnetzsträngen an das entstehende Transportnetz geschaffen werden.

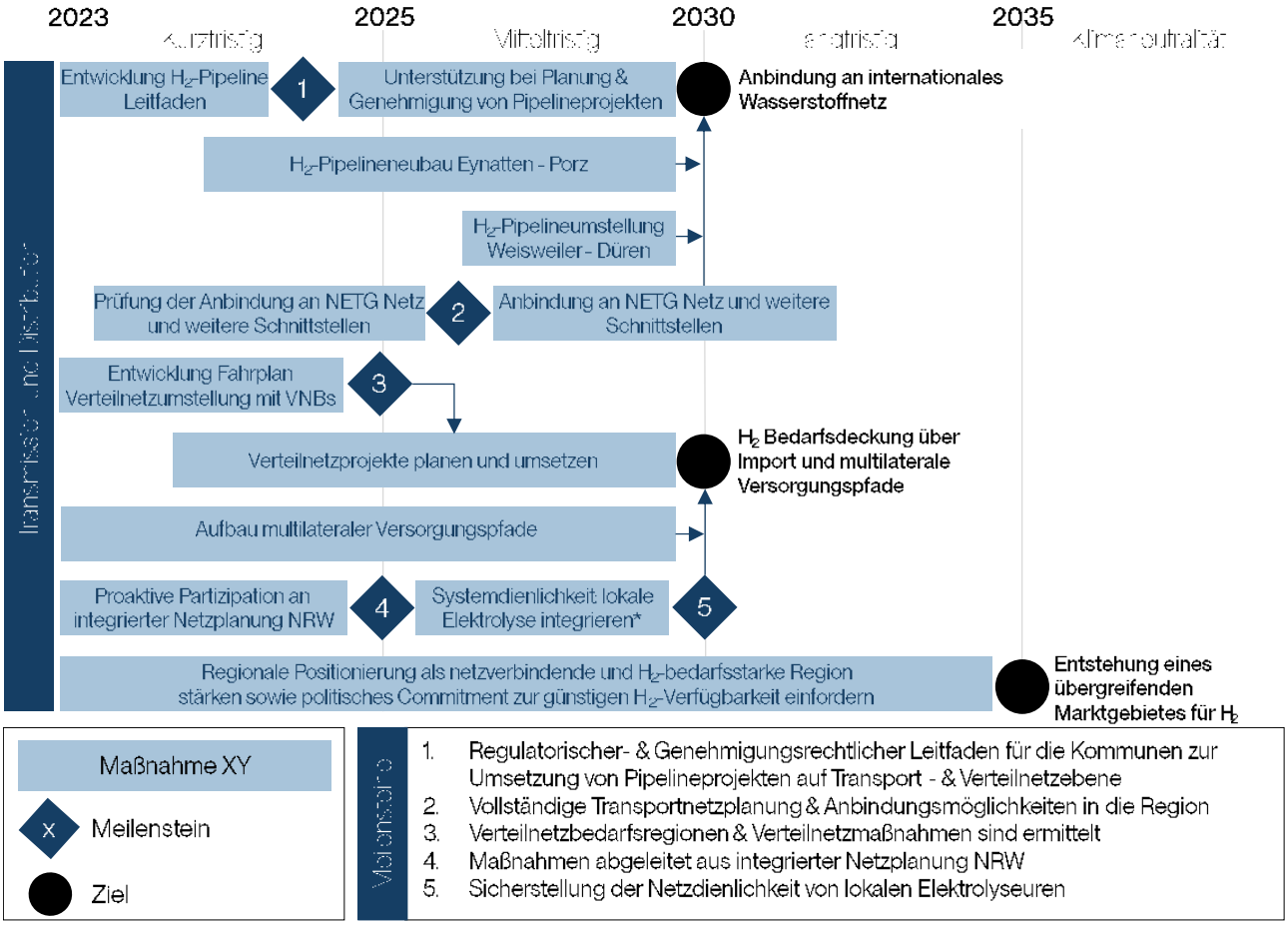
Es ist zu erwarten, dass ausgehend von den H_2-Transportpipelines einzelne Verteilnetzstränge schrittweise auf Wasserstoff umgestellt werden. Voraussetzung dafür ist, solange nur einsträngige Pipelines vorhanden sind, dass neben der ausreichenden Verfügbarkeit von Wasserstoff auch die Bereitschaft der Netzbetreiber und aller Erdgasabnehmer entlang eines Pipelinestranges vorhanden ist, zum gleichen Zeitpunkt auf Wasserstoff umzustellen. Mit dem Projekt H_2-Linnich ist in der Region bereits ein erstes Inselnetz entstanden. Im Zuge des Projektes „Pipeline Hellenthal-Mechernich“ wird eine Anbindung der Industrien in Hellenthal und Kall bis nach Mechernich (Zülpich) initiiert. Eine Investitionsentscheidung soll im Zuge des Projektes bis 2028 erfolgen. Wichtig bei der Planung und Umsetzung von Verteilnetzprojekten ist insbesondere die **Abstimmung mit den angeschlossenen Unternehmen**, die Ihre Planungen hinsichtlich der H_2-Tauglichkeit der Standorte auf einen möglichen Pipelineanschluss abstimmen müssen (siehe Roadmap Industrie in Kapitel 7.7). Zur Aktivierung der gemeinschaftlichen Planung der Verteilnetzmaßnahmen in der Region soll kurzfristig mit der **Entwicklung eines Fahrplans für die Verteilnetzumstellung** gemeinsam mit allen Verteilnetzbetreibern der Region begonnen werden. Der Fahrplan dient der Bestimmung von konkreten Verteilnetzmaßnahmen und ist eng an die Entwicklungen im Transportnetz sowie der regionalen Elektrolysekapazitäten (vergleiche 7.4) geknüpft. Teil des Fahrplans ist es, initial eine **Verteilnetzbedarfsanalyse** durchzuführen, welche als Grundlage für die Bestimmung von Pipelinesträngen für die Umstellung oder etwa den Neubau von Leitungen auf Verteilnetzebene dient (**Verteilnetzmaßnahmen**). Die Erstellung des Fahrplans erfolgt parallel zu bereits in **Planung oder Umsetzung** befindlichen **Verteilnetzprojekten** und integriert diese in den Verteilnetz-H_2-Fahrplan. Weiterhin ist der **Aufbau multilateraler Versorgungspfade** weiter zu priorisieren. Für die Verteilung des Wasserstoffs abseits des Netzes in der Region AachenPLUS werden sich kurz- und mittelfristig verschiedene Infrastrukturpfade entwickeln. Die Analyse in Kapitel 4 zeigt, dass neben den pipelinegebundenen Transporten bei hoher Auslastung vor allem während des Markthochlaufs dem **Transport von gasförmigem Wasserstoff via Trailern** Bedeutung zukommt. Gängige Transportoptionen, wie der Trailertransport von gasförmigem Wasserstoff, werden zunehmend die lokalen Elektrolyseurprojekte mit Abnehmern aus den Bereichen

Mobilität und mittelfristig auch Industrie verbinden, auch wenn die Versorgungskapazitäten limitiert sind. Das Entstehen von bilateralen Versorgungspfaden wird dabei zunächst im Vordergrund stehen, bis sich die Zahl der Abnehmer und die Erzeugungskapazitäten erhöhen. Aufgrund der geographischen Nähe zu den großen Binnenhäfen (Neuss, Duisburg, Köln, Antwerpen) kann langfristig auch der Import von Flüssigwasserstoff via Binnenschiff und anschließendem Trailertransport eine zusätzliche Bezugsoption darstellen. Der Import via Binnenschiff würde den H_2-Bezug diversifizieren. Jedoch ist aufgrund der mangelnden technischen Reife erst langfristig mit einer kommerziellen Verfügbarkeit zu rechnen.

Mögliche Infrastrukturmaßnahmen auf Verteilnetzebene werden im Rahmen der integrierten Netzplanung des Landes Nordrhein-Westfalen stattfinden. Die Zielsetzung im Rahmen dessen muss es sein, die Region AachenPLUS mit den Erzeugungskapazitäten und den spezifischen H_2-Bedarfen insbesondere in den Sektoren Mobilität und Industrie so zu positionieren, dass die Region bei der Planung der zukünftigen Infrastruktur priorisiert berücksichtigt wird. Um dies zu erreichen, ist es notwendig, **proaktiv an der integrierten Netzplanung NRW zu partizipieren und Maßnahmen für die regionale Verteilnetzplanung abzuleiten**. Die übergreifende integrierte Netzplanung NRW verfolgt das Ziel, Energieinfrastrukturen systemübergreifend zu betrachten und unter anderem Maßnahmen für die H_2-Netzplanug sowie die netzdienliche Nutzung lokaler Elektrolyseure zu erarbeiten. Basierend auf der gemeinsamen Entwicklung des beschriebenen Fahrplans zur Verteilnetzumstellung mit den Verteilnetzbetreibern sind im Zuge der integrierten Netzplanung NRW konkrete **Maßnahmen für die Verteilnetzumstellung und den Betrieb von Elektrolyseuren in der Region AachenPLUS abzuleiten**. Um die Region im Rahmen der integrierten Netzplanung NRW richtig zu positionieren und um passende Maßnahmen abzuleiten, besteht eine wichtige Aufgabe darin, die **künftigen H_2-Bedarfe** zu bündeln. Im Zuge der Energiebedarfsabfrage der IHK Aachen mit Stichtag Ende 2022 konnten bereits regionale Energiebedarfe ermittelt werden. Die IHK Aachen steht im Austausch mit der Vereinigung der Fernleitungsnetzbetreiber Gas e. V., um die Bedarfsmeldungen der Region in künftigen Netzentwicklungsplänen zu berücksichtigen. Für die weiteren Aktivitäten innerhalb von AachenPLUS ist es ratsam, auf die weiteren Arbeiten im NEP-Gas sowie der integrierten Netzplanung NRW verstärkt einzuwirken. Dafür sollen die Ergebnisse des geplanten Fahrplans mit den Netzbetreibern kommuniziert und bis 2025 die Ergebnisse der getätigten Energiebedarfsabfrage verdichtet und validiert werden.

Das effektive Zusammenspiel aus dem Ausbau von langfristigen Pipelineinfrastrukturen und die Absicherung mit regionalen Erzeugungskapazitäten für die künftige Versorgungssicherheit mit Wasserstoff und Netzstabilisierung ist unabdingbar. Im Zuge des Hochlaufs der regionalen H_2-Wirtschaft und der erwartbaren gesteigerten Verfügbarkeit von Wasserstoff, werden regionale Elektrolyseure zunehmend auch Netzstabilisierungsfunktionen übernehmen. Dies gilt für bestehende und in Planung befindliche Elektrolyseure, aber insbesondere auch für günstige Standorte, an denen zukünftig Elektrolyseure eine netzdienliche Rolle übernehmen. Im Zuge dessen müssen künftige **Elektrolyseur-Projekte in Bezug auf Ihre Systemdienlichkeit geprüft und in das Gesamtsystem integriert werden**. Durch die Anbindung an das europäische Transportnetz wird für die regionalen Geschäftsmodelle mit Elektrolyse stellenweise eine Wachstumschance, an

anderen Orten aber auch eine Konkurrenzsituation entstehen. Dieses Zusammenspiel gilt es insbesondere im Markthochlauf in der Region zu berücksichtigen (vergleiche Meilensteine 4 und 5 sowie Roadmap Erzeugungspfade- und Strukturen). Eine übergreifende Rolle nimmt die **Positionierung der Region in der Öffentlichkeit** sowie in Politik und Verwaltung ein. Die Bündelung der Bedürfnisse und Forderungen der H_2-Akteure in einer Governance-Struktur wie in Kapitel 7.2 beschrieben, ist ein wesentliches Element bei der Integration der Region in ein künftiges **übergreifendes Marktgebiet für Wasserstoff.**



* Synergien mit Roadmap Erzeugungspfade- und Strukturen

Abbildung 65: Sektorenroadmap Transmission und Distribution

7.6. Mobilität und Verkehr

Der Verkehrssektor produziert mit ca. 150 Mio. t $CO_{2\text{-eq}}$ knapp 20 % der Treibhausgasemissionen in Deutschland [80]. Wasserstoff ist neben der direkten Stromnutzung der vielversprechendste Energieträger für die Dekarbonisierung des Verkehrssektors. In der Region AachenPLUS gibt es bereits unterschiedliche Projektansätze, die sich auf die Nutzung von Wasserstoff als Kraftstoff fokussieren. Anhand der Aktivitäten lassen sich drei wesentliche Ziele für die Region im Sektor Mobilität & Verkehr formulieren. Wichtigstes Ziel ist die Umstellung der Flotten, um emissionsfreie Antriebe auf die Straße/Schiene zu bringen. Das **erste Ziel ist** daher **die Umstellung der 12 geplanten BZ-Züge bis 2026. Die Umstellung aller geplanten BZ-Busse sowie der von den Logistikern geplanten BZ-LKW bis 2035 ist das zweite wesentliche Ziel.** PKW sind kein dezidierter Gegenstand der Strategie, da die H_2-Bedarfe in diesem Sektor gering sind und die Technologieentscheidung eher zu Batteriefahrzeugen tendiert. Parallel zur Beschaffung der Fahrzeuge muss die entsprechende Wartungs- und Betankungsinfrastruktur für die Fahrzeuge errichtet werden. **Dementsprechend ist das dritte Ziel, bis 2035 mindestens die geplanten 13 H_2-Tankstellen in der Region installiert zu haben.**

Die übergeordnete, im Projekt HyExperts AachenPLUS etablierte **Arbeitsgruppe Mobilität sollte über die Projektlaufzeit hinaus weitergeführt werden.** Die Arbeitsgruppe sollte sich zum Ziel setzen, die regionalen Akteure aus dem ÖPNV und der Logistik und die entsprechenden Aktivitäten übergeordnet zu vernetzen, beispielsweise für die koordinierte Planung der Betankungsinfrastruktur. Durch die zentrale Vernetzung kennen die Akteurinnen und Akteure die H_2-Aktivitäten im Mobilitätsbereich über ihre Branche hinaus und können die eigenen Pläne daran ausrichten. Zudem hat die Arbeitsgruppe die Funktion, bei der Initiierung von Projekten zu unterstützen. Weitere Aufgaben sind die gemeinsame Einwerbung von Fördermitteln für Fahrzeuge/Tankstellen oder der überregionale Austausch von Flottenbetreibern oder Gebietskörperschaften.

Im ÖPNV ist die Verfügbarkeit von Fahrzeugen in begrenztem Maße bereits heute gegeben. Daher ist empfohlen, dass die regionalen Akteure WestVerkehr, Rurtalbus / VIAS Bus, Rurtalbahn, ASEAG, REVG und RVK eruieren, inwieweit die **Einrichtung eines Netzwerks in 2023/2024 für die ÖPNV-spezifischen H_2-Aktivitäten** förderlich ist. Dabei sollte geprüft werden, ob die bestehenden Netzwerke der ÖPNV-Betreiber geeignet sind, die Aufgaben zu übernehmen. Die Einrichtung eines zusätzlichen Netzwerks ist immer mit erheblichem organisatorischem und zeitlichem Aufwand aller Beteiligten verbunden. Wie in Kapitel 5.1 beschrieben, kann das Netzwerk gemeinsame Fahrzeugbeschaffungen anstoßen, Konzepte für eine gemeinsame Wartungs- und Werkstattinfrastruktur entwickeln, Planungen für die H_2-Betankungsinfrastruktur auf den Betriebshöfen vornehmen oder die Beschaffung des Wasserstoffs für die Tankstellen organisieren. Wichtig sind zudem Erfahrungsaustausch und Wissenstransfer. Die Erfahrungen im Umgang mit den Fahrzeugen, Vor- und Nachteile der einzelnen Modelle und weitere Erkenntnisse können im Regionen- bzw. Akteursverbund zwischen den

relevanten Organisationseinheiten (wie den Fahrerinnen und Fahrern) ausgetauscht werden. Diese Synergieeffekte kommen allen Akteuren zugute und verstärken die Vernetzung. Eine weitere Aufgabe des Netzwerks können **gemeinsam organisierte Schulungen** bzw. Einführung der Fahrerinnen und Fahrer bzw. Mechanikerinnen und Mechaniker in Bezug auf die Wasserstoff- bzw. Brennstoffzellentechnologien in den Fahrzeugen sein. Im weiteren Zeitverlauf kann das Spektrum je nach Bedarf des Netzwerks erweitert oder zurückgefahren werden. Analog zum ÖPNV-Bereich sollte die Etablierung eines **Netzwerks der Logistiker** angedacht werden. Auch hier ist vorher zu prüfen, wie hoch die Eigenmotivation der Akteure ist und ob bestehende Netzwerke oder Verbände der Logistikunternehmen genutzt werden können.

Die Rurtalbahn plant die Inbetriebnahme von bis zu 17 Brennstoffzellen-Personenzügen bis 2026, die einen H_2-Bedarf von ca. 500 t / a aufweisen. Die ersten beiden Züge sollen als Pilotprojekt bereits 2024 zum Einsatz kommen. Dieser Umstand sollte strategisch dazu genutzt werden, eine erste Keimzelle der H_2-Infrastruktur rund um den Einsatzort der Brennstoffzellen-Rurtalbahn aufzubauen. So liefert beispielsweise die H_2-Infrastruktur zur Betankung für die Züge einen Standortvorteil für die Errichtung einer H_2-Tankstelle für die Busse. **Bis 2035 ist die Anschaffung von insgesamt 344 Bussen durch die ASEAG (49 Busse), die WestVerkehr (125 Busse) und Rurtalbus/VIAS Bus (170 Busse) geplant.** Dadurch entsteht in den „Endausbaustufen" ein Bedarf von über 1.600 Tonnen Wasserstoff pro Jahr. Um Synergieeffekte bei der Beschaffung der Busse bis 2035 und insbesondere der Entwicklung der notwendigen Infrastruktur in der Region zu heben, sollte jeder Akteur **(zum Teil bereits erfolgt) eine individuelle Flottenanalyse vornehmen. Im Jahr 2024 sollte ein Konzept vorliegen, welche Akteurinnen und Akteure zu welcher Zeit welche Anzahl an Brennstoffzellenbussen beschaffen.** Für die Fahrzeugklasse der schweren Nutzfahrzeuge (Zugmaschinen und LKW) ergibt sich aus der durchgeführten Umfrage unter den Unternehmen der Region und der Szenario-basierten Hochrechnung der künftigen Marktdurchdringung eine H_2-Nachfrage zwischen 800 t / a und 2.500 t / a. Das spiegelt sowohl das Potenzial dieser Fahrzeugklassen als auch das Interesse der regionalen Logistikunternehmen an der Brennstoffzelle wider. Die Brennstoffzelle verspricht hohe Reichweiten bei wenig Zusatzgewicht. Herausfordernd für die interessierten Unternehmen ist gegenwärtig insbesondere die fehlende Marktverfügbarkeit der Fahrzeuge und die fehlende Betankungsinfrastruktur. Die Durchdringung von H_2-Fahrzeugen in den schweren LKW-Klassen der regionalen Logistikunternehmen wird erst Richtung 2027 bzw. 2028 an Fahrt aufnehmen. Dennoch sollten die Akteure schon frühzeitig Maßnahmen und Prozesse anstoßen. Mit den konkreten Fahrzeugbedarfen kann das Netzwerk der Logistiker früh und gebündelt an die Fahrzeughersteller herantreten, um Interesse und Ernsthaftigkeit der Anschaffungsabsicht zu signalisieren. Das Beispiel der Markteinführung der ersten Hyundai Xcient Fuel Cell in der Schweiz im Jahr 2020 hat den Erfolg dieser Strategie gezeigt. In der Logistik ist jedoch ausdrücklich die Konkurrenzsituation zu berücksichtigen und entsprechende Geheimhaltungsbedingungen bei der Organisation der Beschaffungsvorhaben einzuhalten.

Der adäquate Betrieb der BZ-Fahrzeuge ist nur dann möglich, wenn parallel zur Fahrzeugbeschaffung eine geeignete Tankstelleninfrastruktur errichtet wird. **Die Region will bis 2035 ein Netzwerk aus 13 H_2-Tankstellen**

installieren. Für einige Tankstellen sind die Standorte bereits ausgewählt, teilweise ist die Standortwahl noch offen. Idealerweise werden die Tankstellenstandorte strategisch so ausgewählt, dass möglichst viele Unternehmen bzw. Fahrzeuge effizienten Zugriff haben. Dadurch sind die Tankstellen von Beginn an möglichst stark ausgelastet, wodurch die Wirtschaftlichkeit des Tankstellenbetriebs steigt. Dazu ist einerseits **wichtig, dass die Akteurinnen und Akteure gemeinsam strategisch günstige Standorte in den Arbeitsgruppen oder dem übergeordneten Netzwerk identifizieren**. Im Rahmen vom HyExperts wurde zum Beispiel von den beteiligten Akteuren das Autobahnkreuz Aachen genannt. Dort fällt unter anderem der Durchgangsverkehr Richtung Belgien und die Niederlande an, welcher durch die Tankstelle bedient werden könnte. Bei der Entwicklung eines Konzepts für die Betankungsinfrastruktur ist zudem die AFIR-Richtlinie der Europäischen Kommission zu berücksichtigen, die den europäischen Mitgliedsstaaten Vorgaben für den Aufbau der H_2-Tankstelleninfrastruktur macht [81]. So sollen in vorgegebenen Abständen im TEN-Verkehrsnetz sowie in allen städtischen Knoten öffentlich zugängliche H_2-Tankstellen errichtet werden. Andererseits sollte das Netzwerk frühzeitig die wirtschaftliche Auslastung der Tankstelle(n) durch Sicherstellung ausreichender Wasserstoffnachfragemengen gewährleisten. Die individuellen Fahrzeugbedarfsanalysen sollten dafür zusammengeführt und für eine lokalisierte Erhebung der Wasserstoffbedarfe genutzt werden. Zusätzlich könnte die Verbindlichkeit der Wasserstoffabnahme z. B. durch LoI's interessierter Akteure verankert werden. Diese Aufgaben könnte ebenfalls das Netzwerk übernehmen. Bei dieser Planung ist außerdem das Routenprofil der Fahrzeuge herausfordernd. H_2-betriebene LKW beispielsweise werden insbesondere auf langen Routen zum Einsatz kommen, die über die Region Aachen-PLUS hinaus reichen. Daher ist die Planung der notwendigen Betankungsinfrastruktur komplex und ist auf die Entwicklungen auf europäischer und nationaler Ebene (beispielsweise über die AFR-Verordnung) angewiesen. Akteure, die in ihren Aktivitäten bereits sehr konkret sind, sollten unter anderem bei der Planung der Betankungsinfrastruktur oder der Wartungs- und Werkstattinfrastruktur eingebunden werden, um Synergieeffekte zu nutzen bzw. doppelte Infrastrukturplanungen zu vermeiden. Für die Errichtung der Betankungsinfrastruktur sollten das Netzwerk bzw. die Arbeitsgruppen auf die Unternehmen zugehen, die sich für den Aufbau der nationalen HRS-Infrastruktur in Position bringen, beispielsweise H2Mobility, JET H2 Energy oder Total Energies. Diese Unternehmen unterstützen bei der Planung bzw. dem Aufbau der H_2-Tankstellen und können bzw. wollen die Tankstellen später auch betreiben. Unter deren Dienstleistungen fällt auch die Beschaffung des Wasserstoffs, sodass die regionalen Akteure die Versorgung der Tankstellen nicht organisieren müssen. Im Gegenzug müssen die Tankstellennutzer im Rahmen der Tankstellenplanungen eine ausreichende und kontinuierliche Abnahme garantieren, welche durch die Bündelung der Aktivitäten gewährleistet werden kann. Bei der Ansprache potenzieller Tankstellenbetreiber sowie bei der Etablierung des Netzwerks können die Gebietskörperschaften eingebunden werden.

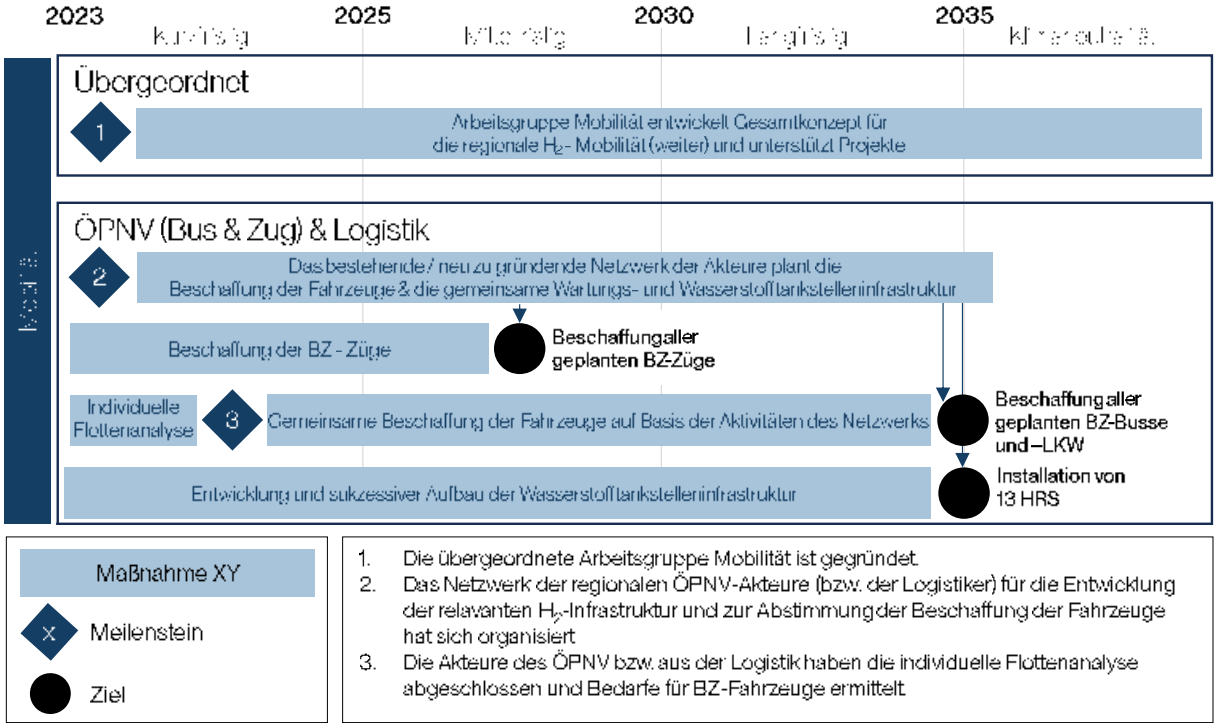


Abbildung 66: Sektorenroadmap Mobilität und Verkehr

7.7. Industrie

Industrielle Produktionsprozesse in der Region AachenPLUS erfordern Wasserstoff zur Defossilisierung, um den zukünftigen Anforderungen an Emissionsminderung bzw. Treibhausgasneutralität gerecht zu werden. Ohne Verbesserung der Rahmenbedingungen, wie genügend EE-Stromproduktion bzw. ausreichende Anschlussleistung an das Übertragungsnetz sowie den Auf- und Ausbau der H_2-Infrastruktur in der Region für die H_2-Versorgung in ausreichender Menge zu kompetitiven Preisen, kann es zur Standortabwanderung in Gebiete mit besserer Anbindung und günstigeren Energieversorgungskosten kommen.

Dabei ist es zunächst notwendig, die **H_2-Bedarfe der Industriebetriebe zu quantifizieren**, in einer Granularität, die über den Auftrag der vorliegenden Studie hinausgeht. Auf diese Weise kann aufbauend auf der bereits kurzfristigen Bedarfsanalyse die Distribution zu den H_2-Senken in Absprache mit den lokalen Verteilnetzbetreibern koordiniert werden (siehe Roadmap Transmission und Distribution 7.5.).

Die Firmen – mit Fokus auf der Papier- und Glasindustrie sowie der Metallverarbeitung – müssen bereits in den nächsten Jahren Unterstützung in Form von Infoveranstaltungen, Leitfäden und Entscheidungshilfen erfahren, um nachhaltige Energieversorgungskonzepte für die Zukunft aufzustellen. Wie bereits erwähnt, ist Wasserstoff dabei eine Option zur Defossilisierung, wo dies darstellbar und wirtschaftlich sinnvoll ist. Eine grobe Weichenstellung über das **zukünftige Energieversor-**

gungskonzept sollte von jedem Unternehmen schnellstmöglich, spätestens nach Veröffentlichung der kommunalen Wärmeplanung gefällt werden.

Aufgrund der zunehmenden Elektrifizierung ist trotz Effizienzgewinnen mit einem steigenden Strombedarf und einer höheren nachgefragten elektrischen Leistung zu rechnen. Daher ist im Rahmen der Entscheidung über die zukünftige Energieversorgung auch die derzeitige **Netzanschlusssituation** und neben der Verstärkung des Transportnetzes durch die geplanten Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungs-Leitungen nach Rommerskirchen und Oberzier (siehe Kapitel 3) auch eine **intelligente Verstärkung des Verteilnetzes zu prüfen**.

Als **Meilenstein** treffen die Unternehmen schnellstmöglich, optimalerweise bis zum Jahr 2025, auf Grundlage der Überlegungen, Entscheidungen über die **zukünftige Energieversorgung** und den **zugrundeliegenden Energieträger**. Falls Wasserstoff auf diesen individuellen Dekarbonisierungspfaden der Unternehmen einen relevanten Beitrag leistet, wird dies an die zentrale Gesamtkoordinationsstelle gemeldet (siehe Governance-Struktur 7.2), die die einzelnen Meldungen sammelt und aggregiert.

Als Meilenstein treffen die Unternehmen schnellstmöglich, optimalerweise bis zum Jahr 2025, auf Grundlage der Überlegungen, Entscheidungen über die zukünftige Energieversorgung und den zugrundeliegenden Energieträger. Falls Wasserstoff auf diesen individuellen Dekarbonisierungspfaden der Unternehmen einen relevanten Beitrag leistet, wird dies an die zentrale Gesamtkoordinationsstelle gemeldet (siehe Governance-Struktur 7.2), die die einzelnen Meldungen sammelt und aggregiert.

Im Nachgang werden aufbauend auf den Vorüberlegungen die genauen **industriellen H_2-Bedarfe** in einer **Energiebedarfsprognose** unternehmensscharf kalkuliert. Dies geschieht entweder firmenintern, wobei von öffentlicher Seite durch die Wirtschaftsförderungsgesellschaften bei Bedarf Hilfeleistungen angeboten werden. Eine andere Möglichkeit stellt die programmgestützte Analyse dar, bei der gesamte Regionen mit Hilfe eines Layertools auf ihre zukünftigen H_2-Bedarfe hin untersucht werden. Entsprechende modellgestützte Untersuchungen können sehr granular auf einzelne Regionen angewandt werden und können in Kooperation mit bspw. regionalen Forschungsinstituten oder spezialisierten externen Dienstleistern durchgeführt werden. Unabhängig vom Zustandekommen der Ergebnisse, ist es auch hier immanent wichtig, H_2-Bedarfe gesammelt an die Verteil- und Transportnetzbetreiber zu melden, sodass H_2-Senken beim Netzplanungsprozess berücksichtigt werden können und auf diese Weise schnellstmöglich mit dem Netzausbau und -umbau gestartet wird. Aufgrund der aktuellen noch hohen Unschärfe bei H_2-bezogenen Themen und der dynamischen Entwicklung, empfiehlt sich die H_2-Bedarfsprognose regelmäßig, in Abständen von fünf Jahren zu wiederholen, um Entscheidungen in der Versorgungsplanung auf Grundlage möglichst aktueller Daten zu treffen.

Sobald die Entscheidung über die individuelle zukünftige Energieversorgung gefällt ist, müssen unternehmensseitig Energieversorgungskonzepte erarbeitet werden. Bei der anstehenden **Elektrifizierung, Umstellung auf Wasserstoff oder anderen Dekarbonisierungsmaßnahmen werden die Unternehmen durch die Gebietskörperschaften begleitet**, etwa durch Informationsangebote über bestehende Landes-, Bundes- und EU-Förderprogramme aber auch die **Initiierung**

von Austauschrunden industrieller H_2-Nutzer. Im Großen und Ganzen ist es nötig, für die betroffenen Unternehmen **Austauschmöglichkeiten zu schaffen**, in denen sich die H_2-Anwender über die Unsicherheiten und Schwierigkeiten, die eine neue Technologie mit sich bringt, aber auch über Erfolge und Fortschritte austauschen können. Eine solche Gesprächsmöglichkeit wurde vom Hydrogen Hub Aachen mit der „Hydrogen meet&connect" Gesprächsreihe bereits initiiert und sollte zukünftig ausgebaut werden, bis Wasserstoff in der Industrie das Stadium der Marktaktivierung überwunden hat.

Sobald die H_2-Bedarfe in den einzelnen Städten und Kreisen des Regionenverbunds bekannt sind, ist es das oberste Ziel, die **H_2-Versorgung der industriellen Verbraucher sicherzustellen**.

Hierbei besteht die Problematik, dass zukünftig, aufgrund der zunehmenden Elektrifizierung und weiterer Energieeffizienzmaßnahmen die Gasnachfrage insgesamt zurückgehen wird. Dadurch wird es herausfordernd, die verbleibenden H_2-Ankerkunden kostendeckend in tendenziell unterausgelasteten, privatbetriebenen Gasnetzen zu versorgen. Kommunale Entscheidungsträger können dem entgegenwirken, indem H_2-gestützte Wärmenetze in Nähe der industriellen Großabnehmer unterstützt werden, um die H_2-Nachfrage zusätzlich zu steigern und damit den Netzbetrieb ökonomischer zu gestalten. Eine wichtige Maßnahme kommt außerdem der Arbeitsgruppe „Industrie" (siehe Governancestruktur 7.2) zuteil, die kurzfristig **synergetische Geschäftsmodelle für die H_2-Erzeugung und -Nutzung in Gewerbegebieten** entwickelt. Durch die gesamtheitliche Verwertung aller Elektrolyseprodukte (Wasserstoff, Sauerstoff und Wärme) wird ein hoher Ausnutzungsgrad des zu Beginn noch teuren Energieträgers erreicht und ermöglicht vielversprechende Anwendungsfälle. Gebietskörperschaften und regionale Genehmigungsstellen können auf diesem Feld unterstützen, indem beispielsweise Bebauungspläne aktualisiert bzw. ausgewiesen werden oder genehmigungsrechtliche Anfragen, die die H_2-Wertschöpfungskette betreffen, priorisiert bearbeitet werden. Die gestarteten Referenzprojekte wie „H2HS", „EnergieArbeit Türnich" und „COSiMa" verfolgen bereits ganzheitliche Konzepte, bei denen mehrere H_2-Verbraucher in einem Gewerbegebiet die anfallenden Nebenprodukte synergetisch ausnutzen.

Die Arbeiten der Arbeitsgruppe führen zum Erreichen des nächsten **Meilensteins**, sodass bis zum Jahr 2025 alle **Gewerbe- und Industriegebiete bekannt sind**, in denen die **H_2-Versorgung als gesichert** anzusehen ist, da sie etwa wegen zuverlässiger H_2-Abnahmesituationen eigene dezentrale Elektrolyseprojekte starten oder die aufgrund der Nähe zum geplanten H_2-Backbone mittel- bis langfristig vom leitungsgebundenem H_2-Import profitieren. Die dadurch getroffene Aussage der gesicherten H_2-Versorgung ist ein Standortvorteil, der über die Region hinaus Strahlkraft erzeugt.

Aufgrund des zukünftig zu beobachtenden Rückgangs der Gesamtgasnachfrage, wird Wasserstoff nicht in der Breite verfügbar sein, wie es derzeit bei Erdgas der Fall ist. Durch **Clusterung** von H_2-Bedarfen sind eigene dezentrale Elektrolyseprojekte ökonomisch tragfähiger, eine trailerbasierte H_2-Versorgung lässt sich einfacher realisieren und auch der wirtschaftliche Anreiz für Gasnetzbetreiber zur Erschließung des Gebiets – entweder durch Neubau oder Umwidmung bestehender Pipelines – ist größer. Dies alles zahlt auf die sichere Versorgung mit Wasserstoff ein.

Bei der industriellen H_2-Versorgung wird im Laufe der Zeit eine Verschiebung zu beobachten sein. Zu Beginn wird es zuvorderst um **bi- oder multilaterale Kooperationen unter Industrieakteuren** kommen, die bereits frühzeitig auf eine H_2-Versorgung angewiesen sind. Beispielsweise wird ein Elektrolysebetreiber ein Nachbarunternehmen per Trailer mit Wasserstoff beliefern und so seinen Elektrolyseur besser auslasten, respektive damit den Business Case Elektrolyseur profitabler machen. Mittelfristig muss jedoch die Arbeitsgruppe „Industrie" gemeinsam mit der Arbeitsgruppe „H_2-Erzeugung" unter Mitwirkung des „Gremiums" (siehe Governancestruktur 7.2) eine **überregionale H_2-Bezugsstrategie formulieren**, sodass als **Meilenstein** noch vor dem Anschluss an den H_2-Backbone eine gemeinsame Bezugsstrategie zur überregionalen H_2-Beschaffung entwickelt wird. Ein Teil der Strategie wird der langfristige Zusammenschluss der H_2-Industriegebiete in der Region AachenPLUS sein, um gemeinsam als ein Großakteur auf dem europäischen H_2-Markt aufzutreten. Durch den H_2-Backbone wird Wasserstoff zum ersten Mal in größeren Mengen verfügbar. Das gemeinsame Auftreten ermöglicht den H_2-Import zu einem früheren Zeitpunkt und zu attraktiveren Konditionen, als es mittelständischen Einzelakteuren möglich ist.

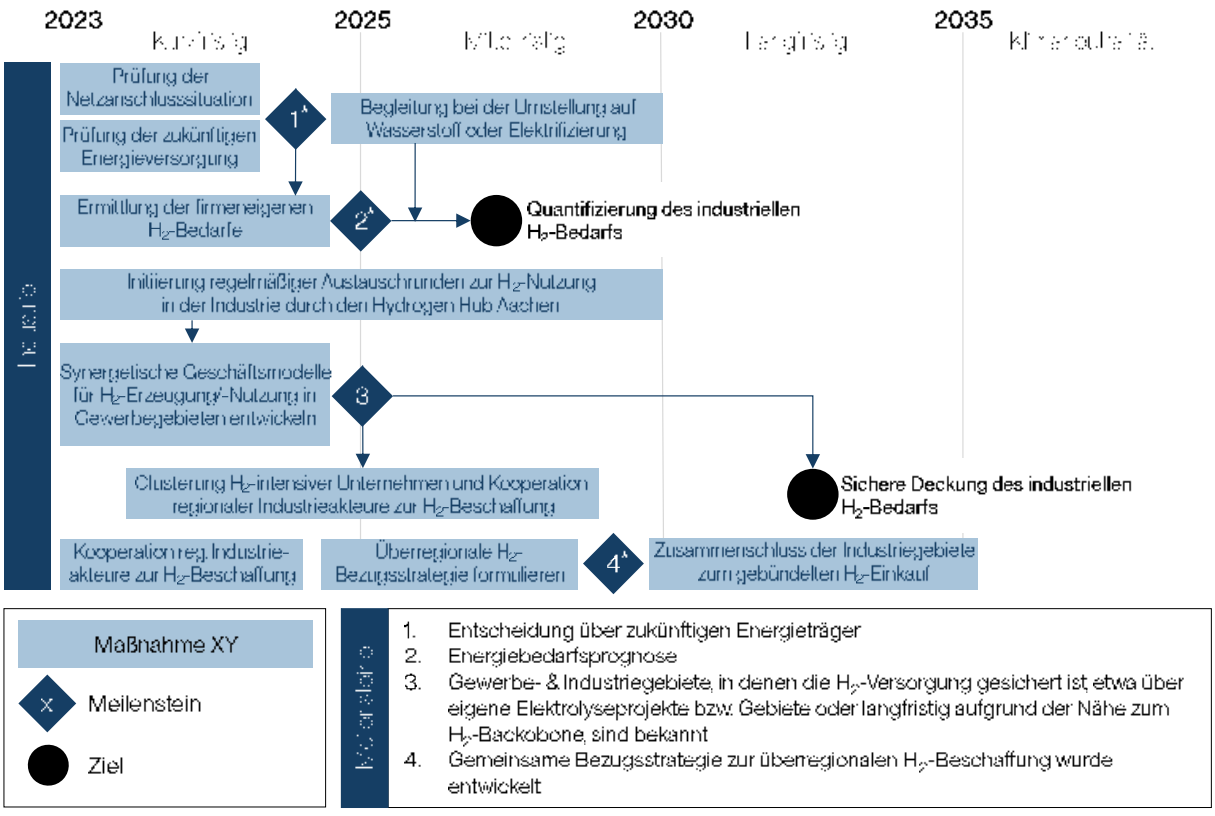


Abbildung 67: Sektorenroadmap Industrie

7.8. Gebäude

Die Ausgangslage für Wasserstoff in der Gebäudebeheizung ist in vielerlei Hinsicht schwierig, wie in Kapitel 5.3 erarbeitet wurde. Eine Herausforderung besteht in der Geräteumstellung, die auch auf Grund der Verteilinfrastruktur möglicherweise nur langsam in die Umsetzung kommt, denn die Konkurrenz durch Wärmepumpen und, wenn lokal vorhanden, Fernwärme ist groß. Ein zweiter Punkt ist die herausfordernde Umstellung der Verteilinfrastruktur, die auf Grund hoher Kosten und knapper Ressourcen voraussichtlich nicht flächendeckend erfolgen wird. Als drittes Argument lässt sich anführen, dass Wasserstoff absehbar ein knappes Gut bleiben wird und andere Anwendungen (vor allem Langzeitspeicher und Rückverstromung sowie Industrieprozesse) aus systemischer Sicht von höherer Priorität sind. Vor diesem Hintergrund ist das Strategieelement „Wasserstoff im Gebäude" auf **synergetische Sonderfälle** und einzelne, besondere Konstellationen begrenzt.

Um das Ziel der Wärmeversorgung durch **„Wasserstoff in Gebäuden in sinnvollen Fällen"** zu erreichen, ist es zunächst erforderlich, auf externe Maßnahmen aufzusetzen. Dies ist einerseits die **Kommunale Wärmeplanung**, aus der Vorzugsgebiete für bestimmte Formen der Wärmebereitstellung hervor gehen werden. Ein koordiniertes Vorgehen innerhalb der Region AachenPLUS ist erstrebenswert. Andererseits spielt die Maßnahme **„Klärung Zielnetze H_2"** aus dem Themengebiet „Erzeugungspfade und -strukturen" eine ergänzende Rolle.

Beide flankieren den Prozess der **Identifikation von H_2-Versorgungsfällen** im Gebäudebereich. Zu diesem Prozess zählt es, individuelle Besonderheiten der jeweiligen Versorgungsaufgabe im Gebäude zu identifizieren und Synergien zu erkennen. Als Anhaltspunkt und Orientierung können Projekte, wie die das Quartier Alter Schlachthof der EUGEBAU in Euskirchen oder auch andere Quartierslösungen dienen, aus denen Erfahrungswerte abgeleitet werden können.

Die konkrete **Organisation der Versorgung** mit Wasserstoff erfolgt in einer weiteren Phase in Abhängigkeit von den bestehenden Möglichkeiten (zum Beispiel Verteilnetzanbindung), und muss individuell umgesetzt werden. Um dies zu ermöglichen, ist auch im Bereich „Gebäude" die Organisation eines **geregelten Austauschs** zwischen den Stakeholdern angeraten. Dabei soll die Region den Austausch und den Wissenstransfer zwischen den einzelnen Projekten sicherstellen. In der breiten Masse der Anwendungen wird Wasserstoff im Sektor der Gebäudewärme voraussichtlich nicht von strategischer Bedeutung sein, in einzelnen Liegenschaften oder Quartieren kann er aber gegebenenfalls problematische Konstellationen wirksam entschärfen, sofern günstige Voraussetzungen bestehen.

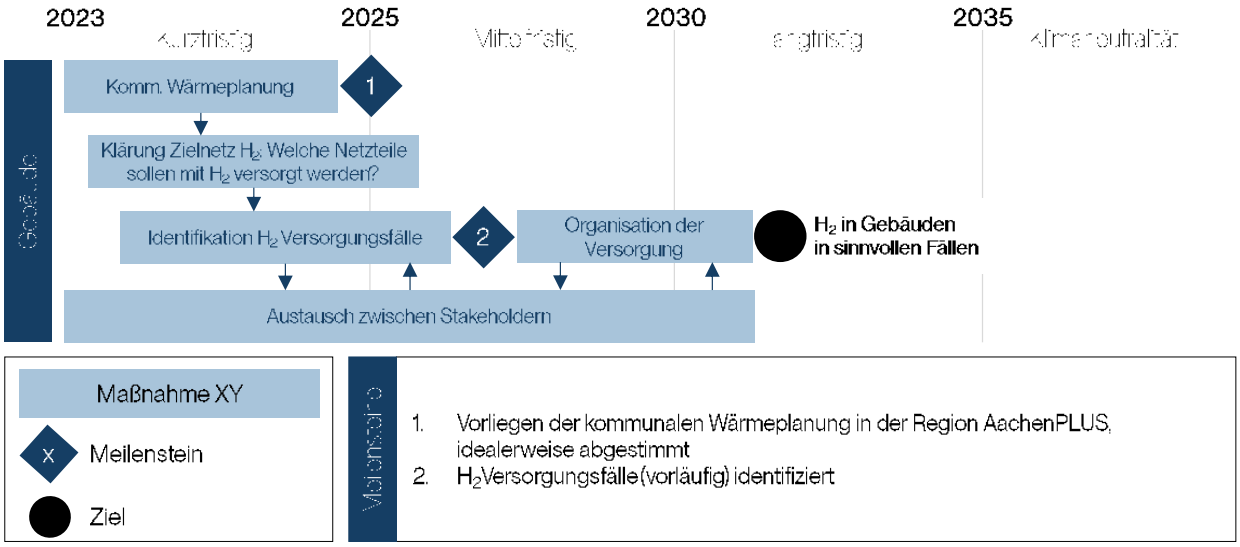


Abbildung 68: Roadmap Gebäude

7.9. Forschung, Entwicklung und Implementierung

Die Maßnahmen und Meilensteine innerhalb der Sektorenroadmap zu Forschung, Entwicklung und Implementierung lassen sich grob den Zielen „**Berufliche Aus- und Weiterbildung sowie (hoch-) schulische Bildung**“, „**Wissenstransfer – F&E als Technologiepartner für den Industriemittelstand**“ und „**Wissensstandort als Wirtschaftsstandortvorteil**“ zuordnen.

Die flächendeckende **Aus- und Weiterbildung** auf dem Gebiet Wasserstoff beginnt mit der schulischen Bildung. Das Interesse an Wasserstoff und seinen Einsatzmöglichkeiten kann dabei weiter durch **öffentliche Infoveranstaltungen und Besuche an Schulen und Universitäten** gestärkt werden, in denen aktuelle Forschung und ihre Anwendung in der Praxis vermittelt werden.

Neben der schulischen Ausbildung ist die **berufliche Aus- und Weiterbildung** genauso wichtig, damit ausreichend Fachkräfte für die sich im Rahmen der Energiewende ändernden technischen Anforderungen und Technologien qualifiziert werden. Aufgrund der Komplexität der Lehrinhalte werden **Kooperationen mit Hochschulen** bei der **Gestaltung von entsprechenden Lehr- und Anschauungsmaterialien** sowie bei der Vermittlung einzelner Ausbildungsinhalte notwendig. Bis zum Jahr 2025 werden Anschauungsmaterialien erstellt und (berufs)schulische Besuche an Infozentren stattfinden.

Die Umsetzung der Energiewende erfordert zudem **exzellent ausgebildete und qualifizierte Fachkräfte**. Für diese müssen besondere Anstrengungen bei der beruflichen Ausbildung unternommen werden. Hierfür müssen kurzfristig neue **spezialisierte Berufsbildungszentren und Berufsschullehrgänge** u. a. für den sicheren Umgang mit Wasserstoff, H_2-Heizungen, H_2-Transport, Brennstoffzellen, und H_2-Mobilität initiiert werden. Als **Meilenstein** soll bereits kurzfristig mindestens ein **neues Aus- und Weiterbildungszentrum initiiert** sowie ein **Berufsschul-**

lehrgang entwickelt werden. Da die Ausbildung neuer Fachkräfte den Fachkräftebedarf allein nicht bedienen kann, sollten zudem umfängliche **Weiterbildungsmaßnahmen**, beispielsweise über die Handwerks- oder Industrie- und Handelskammern koordiniert und angeboten werden. Sollte der Bedarf trotz verstärkter Aus- und Weiterbildungsmaßnahmen die verfügbaren Fachkräfte signifikant übertreffen, sollten darüber hinaus ausländische Spezialisten gezielt angeworben werden.

Eine besondere Bedeutung kommt dem **Transfer von der Wissenschaft zur Wirtschaft** zuteil. Erst durch die praktische Anwendung von Erkenntnissen in Produkten und Services entsteht tatsächliche, skalierbare Wertschöpfung. So verhelfen beispielsweise Ausgründungen aus Forschungsinstituten der lokalen Wirtschaft zu einem innovativen Technologieeintrag und bringen das Potenzial vieler hochqualifizierter Arbeitsplätze mit sich. Deswegen empfiehlt es sich, **Technologiestartups und Ausgründungen aus dem Themengebiet Wasserstoff gezielt zu fördern**, etwa in Form von Beratungsleistungen wie Businesscoachings, aber auch über die Zurverfügungstellung von Büroflächen und Tagungsräumen oder der anteiligen Übernahmen von Mietkosten. Neben der direkten Förderung ist die Unterstützung beim Aufbau eines eigenen Netzwerks genauso wertvoll. Dafür können bspw. Ansprechpartner potenzieller Kooperationspartner aus der Wirtschaft vermittelt werden, um auf diese Weise innovative Ideen und arrivierte Mittelständler zusammen zu bringen. Bereits im Jahr 2024 soll mit der gestarteten Zusammenarbeit zwischen der Koordinierungsstelle (siehe Governance-Struktur 7.2) und dem etablierten H2ub, das Start-ups mit Unternehmen, Hochschulen, Forschungseinrichtungen und Investoren vernetzt, der nächste **Meilenstein** erreicht sein.

Um den **Wissenstransfer von der Forschung und Entwicklung in die Wirtschaft** zur Implementierung der gewonnenen Erkenntnisse zu stärken, sollen zusätzliche **Kooperationen von Projektpartnern aus Forschung und Mittelstand** bei anwendungsnahen Umsetzungsprojekten begünstigt werden, bei denen beide Seiten voneinander profitieren und einzelne Entwicklungen vor der Marktreife zur Anwendung bringen. Solche frühen Anwendungsprojekte eignen sich hervorragend als Keimzelle lokaler H_2-Ökosysteme, da neben der Gerätetechnik über die Projektlaufzeit hinaus Know-how aufgebaut wird, was in der Region verbleibt. Dazu ist zunächst die **Vernetzung regionaler Akteurinnen und Akteure aus Wirtschaft sowie Forschung und Entwicklung** notwendig. Neben digitalen Netzwerkmöglichkeiten zur Kooperationsanbahnung (siehe Kapitel I - Anhang), unterstützen vor allem auch analoge Austauschformate den Kontaktaufbau und Wissenstransfer. Der Hydrogen Hub Aachen wie auch das Zukunftscluster Wasserstoff sowie das Helmholtz-Cluster HC-H2 am Forschungszentrum Jülich leisten auf diesem Gebiet bereits umfangreiche Arbeit, unter anderem durch regelmäßige Austauschtreffen und Informationsveranstaltungen zu ausgewählten Themengebieten. Kooperationen können u. a. bei der Unterstützung von Entwicklungsaktivitäten, der Nutzung von Laboratorien, Teststänaden und Demonstratoren oder dem Anbieten von Zertifizierungslehrgängen bestehen. Ebenso begünstigt verstärkte Förderung anwendungsorientierter Forschung den positiven Einfluss der Wissenschaft auf die Industrie, wie beispielsweise das Projekt HyGlass zeigt, in dem die Auswirkungen von Wasserstoff im Schmelzprozess auf die Glasproduktqualität erforscht werden. Als **Meilenstein** sind bis

zum Jahr 2025 mehrere neue **anwendungsorientierte Umsetzungsprojekte** unter Beteiligung von Forschung und regionalen Unternehmen gestartet.

Die Region AachenPLUS ist international anerkannt für ihre Spitzenforschung u. a. im Themenbereich Wasserstoff an Forschungseinrichtungen der Hochschulen, an außeruniversitären Forschungseinrichtungen der Grundlagen- und angewandten Forschung sowie in der industriellen Forschung. Dabei zeigt diese Untersuchung, dass sich H_2-Technologieunternehmen und deren Projekte häufig in direkter räumlicher Nähe zu den Forschungsstandorten befinden (siehe Kapitel 5.4). Eine innovative und gut vernetzte **Forschungslandschaft ist damit ein immanent wertvoller Standortvorteil für die Region.** Um gut ausgebildete Fachkräfte und damit Wertschöpfung im Regionenverbund zu behalten, ist es unerlässlich, die Aufmerksamkeit attraktiver, technologieaffiner Arbeitgeber in die Region AachenPLUS zu lenken, sodass diese hier Dependancen mit Forschungs- und Entwicklungsschwerpunkt eröffnen und gut ausgebildete Absolventen für Jobs innerhalb der Region gewinnen können. Um dies zu erreichen, sollen im Zeitraum der H_2-Marktaktivierung geführte **Reisen von in- und ausländischen Wirtschaftsdelegationen zu H_2-Referenzprojekten, Unternehmen und Forschungseinrichtungen** durch die Industrie- und Handelskammern der Region angeboten werden, bei denen der Mehrwert der exzellenten Forschungslandschaft verdeutlicht wird. Als **Meilenstein** soll bereits im Jahr 2024 die erste Wirtschaftsdelegation durch die Region geführt worden und der Besuch einer Wirtschaftsdelegation aus der südkoreanischen Partnerstadt Ansan vorbereitet worden sein.

Zur Ausstellung des im Regionenverbunds vorhandenen H_2-Know-hows wird die bereits existierende **H_2-Messe weiter ausgebaut** und über das Regionalmarketing offensiv beworben, sodass als **Meilenstein** bis zum Jahr 2025 mindestens eine **Verdopplung bei der Aussteller- und Besucherzahl** im Vergleich zur vorherigen Ausgabe erreicht wird.

Damit auch ansässige Mittelständler vom Forschungs- und Ausbildungsstandort profitieren, empfiehlt sich die Einführung von regionalen **Unternehmensstipendien zur Bindung wissenschaftlicher Nachwuchskräfte an Unternehmen aus der Region unter Schirmherrschaft des Hydrogen Hub Aachen.** Durch monatliche Zuwendungen während der Ausbildung und Studium von Seiten der Unternehmen und der Möglichkeit Praktikumsmöglichkeiten, binden Unternehmen motivierte Studentinnen und Studenten an sich, bei denen die Wahrscheinlichkeit auf den direkten Berufseinstieg und den Verbleib in der Region signifikant erhöht wird.

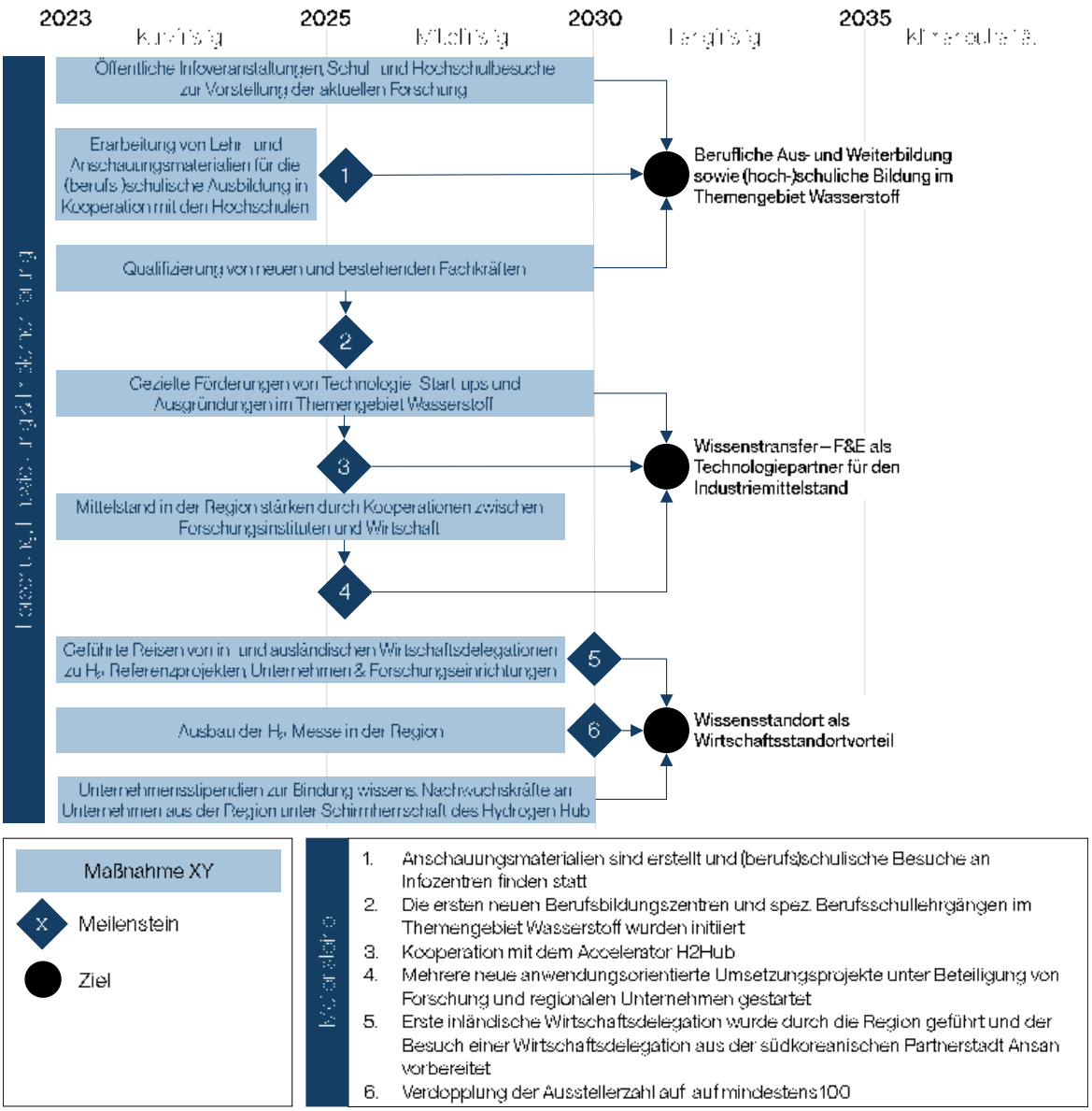


Abbildung 69: Sektorenroadmap Forschung, Entwicklung & Implementierung

Anhang

I. Wissensplattform und Kompetenzatlas

Für eine nachhaltige Bereitstellung von durchgeführten Studien und bereits erarbeiteten Know-hows sowie zur Vernetzung involvierter Akteure und der Informierung der Öffentlichkeit ist eine zentrale, digitale Plattform notwendig. Das Konzept für eine solche digitale Wissensplattform inklusive Kompetenzatlas wird im folgenden Kapitel dargelegt. Bisher hat noch keine vergleichbare HyExperts-Initiative eine eigene interaktive und informierende Internetseite eingerichtet. Das Konsortium HyExperts AachenPLUS ist in dieser Hinsicht Vorreiter.

Hauptaussagen auf einen Blick

Existierendes Wissen zentral bündeln
Die beteiligten Gebietskörperschaften haben in der Vergangenheit bereits eigene Analysen und Untersuchungen zum Aufbau einer H_2-Infrastruktur durchgeführt. Derzeit sind die einzelnen Ergebnisse jedoch nicht frei zugänglich oder falls veröffentlicht, nicht an einem zentralen Punkt gebündelt. Dies wird mit einer gemeinsamen Wissensplattform geändert. Die Sichtung der vorangegangenen Studien dient zudem als Grundlage aller Arbeiten in den nachfolgenden Arbeitspaketen.

Nutzung bereits existierender Plattformen
Bei der Vielzahl bereits existierender H_2-Plattformen soll die Wissensplattform auf eine bereits existierende Plattform aufgesetzt werden, sodass keine weiteren Doppelstrukturen aufgebaut werden.

Landingpage des HyExpert AachenPLUS beim Hydrogen Hub Aachen
Die statische Landingpage wird auf der Webseite des Hydrogen Hub Aachen implementiert. Diese gilt als Ausgangspunkt für Informationen über den HyExpert AachenPLUS, die beteiligten Gebietskörperschaften und assoziierte H_2-Projekte. Außerdem vermittelt sie H_2-Basiswissen an Interessierte und informiert über bevorstehende Veranstaltungen.

Netzwerkfunktionen auf der Hyperegio DIP
Zurückgreifen auf die bereits etablierte Digitalplattform Hyperegio DIP für die interaktiven Vernetzungsfunktionen. Dort können H_2-Akteure aus dem Regionenverbund AachenPLUS potenzielle Kooperationspartner suchen bzw. ihnen werden über einen Matchmakingalgorithmus mögliche Projekte und Akteure vorgeschlagen.

Umsetzung der Implementierung durch Medienagentur gestartet
Die IHK Aachen als Host des Hydrogen Hub Aachen hat bereits eine Medienagentur beauftragt, um die Wissensplattform auf ihrer Webseite zu implementieren. Des Weiteren wurde eine HyExpert AachenPLUS Gruppe auf der Hyperegio DIP gegründet und die im Prozess involvierten H_2-Aktuere auf die Plattform eingeladen.

Bedeutung für die Region AachenPLUS

Studien und wissenschaftliche Untersuchungen sind das Fundament erfolgreich umgesetzter H_2-Projekte. Die Wissensplattform und der Kompetenzatlas erreichen genau das und machen bislang nur zerstreut vorhandenes Spezialwissen an einem zentralen Ort und für alle Gebietskörperschaften verfügbar. Zur Förderung von Kooperationen einzelner H_2-Akteure aus dem Regionenverbund über die Digitalplattform sind viele Nutzer und ein lebendiges Netzwerk Voraussetzung. Dies kann zu Beginn durch institutionellen Nutzer und konkrete Einladungen sowie Werbemaßnahmen gefördert werden.

Ziel der Wissensplattform

Die konzipierte Wissensplattform dient der Erfüllung von zwei zentralen Funktionen. Zum einen fungiert die Wissensplattform als Visitenkarte des HyExperts AachenPLUS, indem zentrale Informationen zum Hintergrund und Status des Projekts kommuniziert werden. Zum anderen werden Informationen zu den beteiligten Gebietskörperschaften sowie den unterstützenden Netzwerken und Agenturen veröffentlicht. Insbesondere bei Weiterentwicklung des HyExperts AachenPLUS zu einem konkreten H_2-Ökosystem, bestehend aus mehreren Einzelprojekten, sollen diese auf der zentralen Wissensplattform einzeln vorgestellt und in das Gesamtprojekt eingeordnet werden. Zudem wird über die Wissensplattform die interessierte Öffentlichkeit niedrigschwellig über die Entwicklung des HyExperts AachenPLUS sowie daraus entstehender konkreter Umsetzungsprojekte informiert. Damit das Informationsangebot die breite Öffentlichkeit erreicht, muss die Webseite durch die gängigen Suchmaschinen auffindbar sein und durch den Verzicht auf eine Benutzerregistrierung eine niedrige Zugangsschwelle ermöglicht werden.

Neben der Öffentlichkeitsarbeit dient die Wissensplattform dem Wissensmanagement und zur Vernetzung der einzelnen Akteure entlang der H_2-Wertschöpfungskette untereinander. Unter dem Menüpunkt „Wissensmanagement" wird Basiswissen über Wasserstoff in Form von kurzen Infoposts aufbereitet. Diese Inhalte reichen von der grundlegenden Frage, was Wasserstoff überhaupt ist, über dessen Eigenschaften und technische Herausforderungen bis zu den vielfältigen Einsatzzwecken von Wasserstoff. Zusätzlich vermitteln weiterführende Informationen bezüglich unterschiedlicher Erzeugungsoptionen, der H_2-Farbenlehre, sowie der vielfältigen Speicher- und Transportmöglichkeiten für Wasserstoff interessierten Stakeholdern fundiertes Wissen entlang der gesamten H_2-Wertschöpfungskette.

Die einzelnen Gebietskörperschaften haben in der Vergangenheit bereits umfangreiche, themenspezifische Untersuchungen durchgeführt und werden auch in der Zukunft weitere Studien durchführen und veröffentlichen. Die H_2-Offensive Düren [82] oder H_2-Roadmap Euskirchen [83] sind dabei nur zwei Beispiele aus der jüngsten Zeit. Daneben bietet die Wissensplattform die Möglichkeit, dass H_2-Akteure sich und ihre Projekte vorstellen und Angebote sowie Gesuche zur Kooperation aufgeben können. Ein intelligenter Matchmaking-Algorithmus wird darauf aufbauend bei der Verknüpfung der H_2-Akteure untereinander helfen, wodurch unabhängig vom Projekt AachenPLUS neue H_2-Projekte begünstigt werden und die Region als Ganzes als H_2-Hub gestärkt wird. Die Kontaktaufnahme und darauffolgende Vernetzung wird über eine Nachrichtenfunktion und die Möglichkeit zum Austausch von Kontaktinformationen qualifizierter Ansprechpersonen erleichtert.

Auswahl einer geeigneten Plattform

Bereits früh im Bearbeitungsprozess fällt die Entscheidung gegen eine Neuentwicklung einer eigenen Plattform, um dem Risiko zu entgehen, dass diese bei der Vielzahl bereits etablierter Netzwerke untergeht. Stattdessen soll analysiert werden, welche der bereits existierenden Plattformen genutzt werden kann, um die im vorherigen Kapitel beschriebenen Zielstellungen bestmöglich zu erreichen.

Überblick über existierende Plattformen

Im Rahmen des HyExperts AachenPLUS werden sieben existierende Plattformen analysiert und im Hinblick auf ihre Eignung untersucht. Die sieben Pattformen sind:



Abbildung 70: Analysierte Plattformen

- Digitale Innovationsplattform (DIP) [84]
- Hydrogen Hub Aachen [85]
- H2Pro3 [86]
- H2Connect [87]
- Plattform H2BW [88]
- H2Land NRW [89]
- ZRR Projektkarte Strukturwandel [90]

Die **Digitale Innovationsplattform** wurde im Rahmen des Interreg-Projektes EarlyTech für die Euregio Maas-Rhein, bestehend aus fünf Regionen in drei europäischen Ländern, ins Leben gerufen und fokussiert nicht alleinig H_2-Themen, sondern steht allen innovativen Technologien und Projekten offen. Der Fokus liegt auf der Vermittlung von Partnern oder Kunden zur Umsetzung zukünftiger, innovativer Projekte. Die DIP ist deswegen in ihrer Aufmachung den bekannten sozialen Netzwerken LinkedIn oder Facebook nachempfunden, um die Vernetzung von Benutzern in den Vordergrund zu stellen und eine hohe Benutzerfreundlichkeit zu bieten. Ein Matchmaking-Algorithmus findet für einen passenden Kunden die Kooperationspartner und Projekte. Zudem besteht die Möglichkeit, eigene Gesuche oder Angebote zu veröffentlichen und passende Angebote auszuwählen.

Der **Hydrogen Hub Aachen** ist eine gemeinsame Initiative der Stadt und StädteRegion Aachen sowie der Kreise Düren, Euskirchen, Heinsberg und der Industrie- und Handelskammer (IHK) Aachen. Ziel ist eine ganzheitliche H_2-Strategie in der Region zu entwickeln und ein umfangreiches H_2-Netzwerk aufzubauen, um sich frühzeitig als starke H_2-Modellregion zu positionieren. Die Webseite des Hydrogen Hub Aachen fungiert bisher als Informationswebseite mit der Möglichkeit sich im Netzwerk zu registrieren. Darüber hinaus werden die Beteiligten kurz vorgestellt, in einem Kalender vergangene und bevorstehende Veranstaltungen öffentlich angekündigt und H_2-spezifische Nachrichten veröffentlicht.

H2Pro3 ist eine digitale Plattform des Konsortiums aus HyCologne, der Technischen Hochschule Köln und der coac GmbH mit dem klaren Fokus auf H_2-Technologien innerhalb des Rheinischen Reviers. Das Netzwerk strukturiert sich entlang der H_2-Wertschöpfungskette und soll Informationen sowie aktuelle H_2-Projekte aus der Region präsentieren. Derzeit sind vor allem kurze, gut aufbereitete Infoposts zu unterschiedlichen Technologien entlang der H_2-Wertschöpfungskette zu finden.

Der Fernleitungsnetzbetreiber Open Grid Europe GmbH (OGE) hat die H_2-Projektkarte **H2Connect** ins Leben gerufen, die als kostenlose App und Webanwendung nutzbar ist. Auf dieser werden H_2-Vorhaben in ganz Europa kartografisch dargestellt und mit einer Kurzbeschreibung vorgestellt. Allerdings liegt der Fokus bislang auf Projekten innerhalb Deutschlands. Über einen Zeitregler am unteren Bildschirmrand kann der zeitliche Fortschritt der derzeit geplanten H_2-Transportinfrastruktur abgerufen werden. Neue H_2-Projekte und -Vorhaben können von allen Benutzerinnen und Benutzern jederzeit hinzugefügt werden und sind nach einer Überprüfung der Daten auf der Karte sichtbar.

Die **Plattform H2BW** der Landesagentur für neue Mobilitätslösungen und Automotive Baden-Württemberg (e-mobil BW GmbH) richtet sich vor allem an Unternehmen, Forschungseinrichtungen sowie Kommunen. Die vom Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg geförderte Plattform bündelt die Aktivitäten und Kompetenzen rund um Wasserstoff im Bundesland Baden-Württemberg an einer zentralen Stelle. Neben einer übersichtlichen Darstellung aller H_2-Projekte im Bundesland auf einer interaktiven Karte werden ebenso aktuelle Meldungen zu H_2-Themen veröffentlicht. Große H_2-Projekte, wie die vom Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) geförderten H_2-Modellregionen oder der HyPerformer H2Rivers, verfügen über eine eigene Sektion auf H2BW, in welcher detailliert über die Vorhaben informiert wird und weiterführende Links zu den Projektwebseiten zu finden sind. Des Weiteren tragen eigene Studien und Publikationen, die zentral und kostenfrei abrufbar sind, zum Wissensaufbau und -transfer bei.

Mit der **H2Land NRW** Landkarte verfolgt das Ministerium für Wirtschaft, Industrie, Klimaschutz und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen (NRW) das Ziel, einen Überblick über die zahlreichen Projekte, Initiativen, Institutionen und Unternehmen rund um das Thema Wasserstoff zu geben. Die Vorhaben werden dabei in die Bereiche „Innovationsprojekt", „Forschungseinrichtung", „H_2-Tankstelle", „H_2-Pipeline", „Hubs, Cluster & Netzwerke", sowie „H_2-Region" unterteilt, zu denen jeweils eine Kurzbeschreibung abrufbar ist.

Einen ähnlichen Ansatz, auf das Rheinische Revier konzentriert, verfolgt die **ZRR Projektkarte Strukturwandel** ebenfalls vom Ministerium für Wirtschaft, Industrie, Klimaschutz und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen. Auch hier werden in einer Kartendarstellung im Rahmen des Strukturwandels initiierte Projektideen und Projekte angezeigt, wodurch neben dem Zukunftsfeld „Energie & Industrie", in welchem H_2-Projekte zu finden sind, weitere Innovationsprojekte aus den Bereichen „Ressourcen & Agrobusiness", „Innovation & Bildung" und „Raum & Infrastruktur" dargestellt werden. Durch Klicken auf die Kartenicons gelangt der Nutzer zu einer Beschreibung des Vorhabens. Darüber hinaus wird kein Grundlagenwissen vermittelt oder aktive Unternehmen in den Zukunftsfeldern vorgestellt.

Die beschriebenen Plattformen unterscheiden sich im Hinblick auf ihre Spezifität, Zielregion und Interaktivität stark voneinander. So liegt der alleinige Fokus bei der H2Pro3 beispielsweise auf der H_2-Technologie, während die ZRR-Projektkarte im Zuge des Strukturwandels initiierte Innovationsprojekte darstellt. Bezieht sich die H2Connect-Plattform in ihrer Darstellung auf Gesamtdeutschland, ist die Plattform H2BW alleinig für Projekte in Baden-Württemberg bestimmt. Andere Plattformen, wie zum Beispiel H2Land NRW, beschränken sich größtenteils auf die geografische Lokalisierung nebst Projektkurzbeschreibung, wohingegen die DIP eine umfassende Plattform mit vielen Netzwerkfunktionen ähnlich wie bekannte soziale Netzwerke bietet.

Die vorgestellten Karten und Plattformen werden anschließend bewertet, um die für den Regionenverbund AachenPLUS optimale Lösung zu identifizieren. Bewertungskriterien bilden:

- der Umfang geplanter Inhalte und Funktionen
- die öffentliche Zugänglichkeit
- die Etablierung der bestehenden Plattform
- die Aktualität und Diversität der gepostenten Inhalte und Nutzer
- das Design und die Nutzerfreundlichkeit
- der technische Reifegrad

Die nachfolgende Tabelle gibt eine genaue Übersicht über die genannten Bewertungskriterien und deren Beschreibung. Die Gewichtung der Kriterien ist über die maximal erreichbaren Punkte dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Funktionalität und angebotenen Inhalte der Plattformen einen zentralen Stellenwert in der Bewertung einnehmen.

Tabelle 10: Bewertungskriterien zur Auswahl der geeigneten Wissensplattform

Kriterium	Beschreibung	Max. Punktzahl
Umfang der (geplanten) Inhalte & Funktionen	*Wissensfelder *Akteure (Unternehmen, Institutionen) *Kompetenzen *Match-Making *Projekte *Karte *News 1 Punkt je Funktion	7
Öffentlicher Zugang	Ohne Registrierung: 0 – keine Einsicht; 1 – eingeschränkte Einsicht, 2 – volle Einsicht	2
Etablierung	Nutzerzahl, 0 – keine Nutzer; 1 – < 500 Nutzer, 2 – > 500 Nutzer	2
Aktualität & Diversität	Aktualität der Inhalte und Diversität der Nutzer Posts in den letzten 2 Monaten: 0 – < 10, 1 - > 10 , 2 – von mehr als 5 Parteien	2
Design & Nutzerfreundlichkeit	Ist das Design ansprechend, übersichtlich und selbsterklärend? Subjektive Einschätzung und Punkte von 0 schlecht bis 3 sehr gut	3
Reifegrad	Wie weit ist die Implementierung der Plattform fortgeschritten? 0 – Launch noch geplant; 1 – Launch durchgeführt	1

Disclaimer: Die Bewertung bezieht sich dabei auf die Nutzbarkeit im Rahmen des HyExperts AachenPLUS und verwehrt sich einer Bewertung bezüglich ihres originären Zieles.

Die beiden Plattformen Digitale Innovationsplattform sowie H2BW bieten die meisten der geforderten Inhalte für den Aufbau einer Wissensplattform für den HyExperts AachenPLUS. Da der Fokus von H2BW jedoch alleinig auf dem Bundesland Baden-Württemberg liegt, wird diese Lösung nicht weiter in Betracht gezogen, sodass die Webumgebung des Hydrogen Hub Aachens an Bedeutung gewinnt. Auf Basis dieser beiden Plattformen entsteht im Rahmen des HyExperts AachenPLUS eine digitale Wissensplattform für den Regionenverbund. Die Bewertung der drei am besten geeigneten Plattformen ist in nachfolgender Tabelle dargestellt.

Tabelle 11: Bewertungsergebnisse der Top 3 der vorstellten Plattformen

Plattform	Punktzahl / 17	Kommentar
Digitale Innovationsplattform – DIP	13	+ Ausgereifte, interaktive Plattform mit hoher Reichweite + Fokus auf die Region Euregio Maas-Rhein + Einbindung von externen Projektseiten und Newsfeed möglich
Plattform H2BW	13	+ Umfangreiche Plattform – Fokus auf Baden-Württemberg
Hydrogen Hub Aachen	9	+ Viele Funktionalitäten für Projekt -Landingpage vorhanden - Darstellung der Partner & Kompetenzen, Interaktion fehlt

Konzept der Wissensplattform

Die Wissensplattform wird in ein duales Konzept überführt, bestehend aus einer statischen Landingpage und interaktiven Funktionen. Die Landingpage ist auf der Website des Hydrogen Hub Aachen eingebettet und ermöglicht den Informationsabruf für Faktenwissen zu Wasserstoff, während die interaktiven und dynamischen Funktionalitäten durch die Integration der Digitalen Innovationsplattform erfolgt. Diese ermöglicht unter anderem die Vorstellung von H_2-Akteuren und deren Vernetzung via intelligenten Matchmaking-Algorithmus sowie einen personalisierten Newsfeed. Diese beiden Kernelemente werden nachfolgend beschrieben.

Statische Landingpage auf Hydrogen Hub Aachen

Das regionenübergreifend sichtbare Projekt HyExperts AachenPLUS wird auf einer neuen Unterseite des Hydrogen Hub Aachen eingebettet, die als zentraler Ausgangspunkt für Informationen über den HyExperts AachenPLUS und assoziierte H_2-Projekte dient (siehe Abbildung 71).



Abbildung 71: Konzept des neuen Webseitenheaders des Hydrogen Hub Aachen mit Unterseite AachenPLUS

Die Landingpage unterteilt sich weiter in die Kategorien „Start", „Über uns", „Basiswissen H_2", „News & Events", „Projekte" und „Vorstudien". Diese werden nachfolgend im Detail beschrieben.

Zunächst wird auf der Startseite die Grundidee des HyExperts AachenPLUS vorgestellt sowie die sich daraus abgeleitete Vision und Mission präsentiert. Zudem wird ein Überblick über den Regionenverbund gegeben und Hinweise auf die Fördergeber sind ebenfalls zu finden (siehe Abbildung 72).

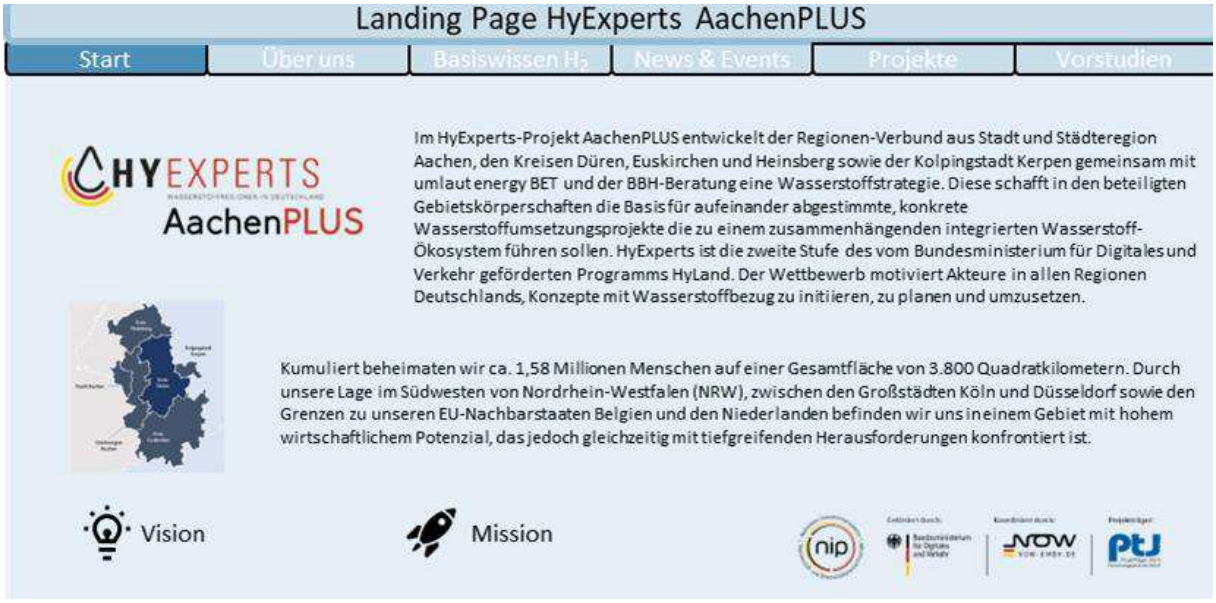


Abbildung 72: Konzeptionelle Darstellung der Startseite der Projektlandingpage

Im nächsten Reiter „Über uns" (siehe Abbildung 73) werden die beteiligten Gebietskörperschaften – Stadt Aachen, StädteRegion Aachen, Kreis Düren, Kreis Euskirchen, Kreis Heinsberg und Kolpingstadt Kerpen – vorgestellt. Weiterführende Links führen zu den jeweiligen H_2-Themeninternetseiten. Neben den Gebietskörperschaften sind auch die Unterstützer – die IHK Aachen, die Aachener Gesellschaft für Innovation und Technologietransfer (AGIT), der Hydrogen Hub Aachen und HyCologne, das Netzwerk der Wasserstoff Region Rheinland, repräsentiert.

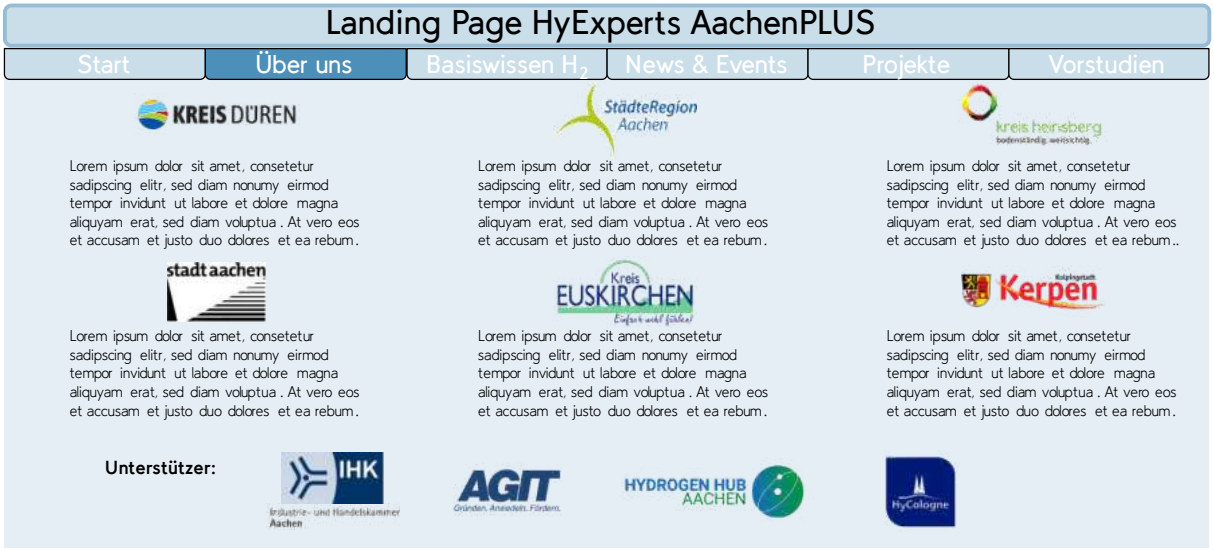


Abbildung 73: Konzeptionelle Darstellung des Reiters „Über uns" der Projektlandingpage

Im Abschnitt „Basiswissen H_2" (siehe Abbildung 74) wird den interessierten Besuchern, von Privatpersonen über verantwortliche Akteure auf kommunaler Ebene, bis hin zu Vertretern aus Industrie und Wirtschaft, der einfache Einstieg in die Themenwelt Wasserstoff ermöglicht. In kurzen und prägnanten Infoposts werden hierbei die Grundlagen der H_2-Technologien entlang der H_2-Wertschöpfungskette erläutert. Unter dem Menüpunkt H_2-Erzeugung wird auf verschiedene Möglichkeiten der H_2-Produktion eingegangen sowie die grundlegenden Eigenschaften von Wasserstoff erläutert und die daraus erwachsenden Möglichkeiten und Herausforderungen erklärt. Daneben werden Möglichkeiten der H_2-Veredlung, wie die Methanisierung oder Herstellung von weiteren synthetischen Kraftstoffen, angesprochen, genauso wie zahlreiche H_2-Speicheroptionen und deren Vor- und Nachteile. Ebenso wird über H_2-Transport und -Distributionslösungen aufgeklärt und abschließend ein Überblick über die potenziellen H_2-Nutzungsoptionen in den Sektoren Gebäude, Industrie und Mobilität gegeben. Da viele Anbieter, wie beispielsweise H2Pro3, bereits gut aufbereitete Inhalte zur H_2-Wissensvermittlung anbieten, wird empfohlen, im Rahmen von Kooperationen mit Medienpartnern auf deren Informationsmaterial zurückzugreifen und zu verweisen.

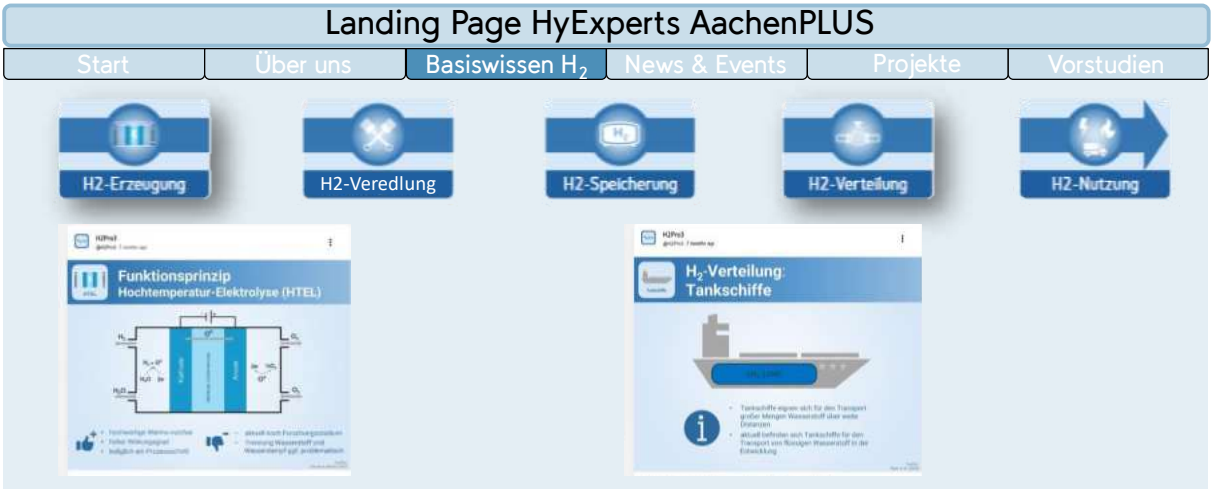


Abbildung 74: Konzeptionelle Darstellung des Reiters „Basiswissen H_2" der Projektlandingpage mit Inhalten von H2Pro3 [86]

Unter dem Reiter News & Events (siehe Abbildung 75) werden regelmäßig Nachrichten über den Projektfortschritt und aktuelle H_2-spezifische Neuigkeiten aus dem HyExperts AachenPLUS und assoziierter H_2-Projekte aus den beteiligten Gebietskörperschaften veröffentlicht. Daneben wird über relevante Neuerungen im H_2-Themenbereich, wie beispielsweise veröffentlichte Förderungen oder regulatorische Änderungen wie der EU-Definition von Grünem Wasserstoff berichtet. Ein weiteres Kernelement der News & Events Sektion macht ein öffentlicher Kalender aus, in dem anstehende Veranstaltungen der Allgemeinheit angezeigt werden. Dies sind beispielsweise öffentliche Informationsveranstaltungen, H_2-Messen, Inbetriebnahme einer Produktionsanlage oder Termine zur Vorstellung der H_2-Strategie



Abbildung 75: Konzeptionelle Darstellung des Reiters „News & Events" der Projektlandingpage

Um Interessenten aus der Öffentlichkeit sowie aus anderen Bereichen über die H_2-Aktivitäten im Regionenverbund zu informieren, bietet sich besonders eine übersichtliche Kartendarstellung der existierenden und geplanten H_2-Projekte auf dem Gebiet aller Gebietskörperschaften an einer zentralen Stelle an. Nach dem Vorbild von H2Land NRW und der ZRR-Projektkarte entsteht im Seitenreiter Projekte eine interaktive Regionenkarte, in welcher H_2-Projekte der Region – unterteilt nach Erzeugung, Forschung, Mobilität, Speicherung, Übertragung und Industrie – abgebildet sind (siehe Abbildung 76). Zur Erhöhung der Übersichtlichkeit sind durch Klicken auf die Kategorienlegende einzelne Bereiche an- oder abwählbar. Wird der Mauszeiger über ein bestimmtes Projektsymbol geführt und ausgewählt, erscheint eine Kurzbeschreibung des ausgewählten Projektes mit den wichtigsten Informationen zu Projektziel und Projektinhalten, den Beteiligten und dem Projektzeitraum. Falls vorhanden, wird über Links auf die eigenen Projektwebseiten verwiesen.

Bereits von einzelnen Gebietskörperschaften durchgeführte Studien, aber auch neue Untersuchungen, werden im Reiter Vorstudien zentral gesammelt und nach Veröffentlichung der Öffentlichkeit bereitgestellt. Die Bereitstellung ermöglicht einen spezifischen und gezielten Wissenstransfer, da Kommunen beim Aufbau einer H_2-Infrastruktur häufig mit denselben Problemstellungen konfrontiert sind. Durch den Wissenstransfer können Synergien zwischen Kommunen und Projekten genutzt und Silodenken gemindert werden, was erhebliche Zeiteinsparungen und einen bedeutenden Mehrwert für den gesamten Regionenverbund AachenPLUS schafft und Ressourcen sowie Kapazitäten zur Lösung einzelfallspezifischer Problemstellungen freilegt. Auf der Landingpage werden die vorhandenen Studien mit aussagekräftigen Schlagwörtern wie beispielsweise „Roadmap“, „Machbarkeitsstudie“, „Potenzialanalyse“ oder „Mobilität“ indiziert. Dies ermöglicht das gezielte Heraussuchen geeigneter Studien für eine ähnliche Fragestellung, die auf der Landingpage des HyExpert AachenPLUS direkt heruntergeladen werden können (siehe Abbildung 77).

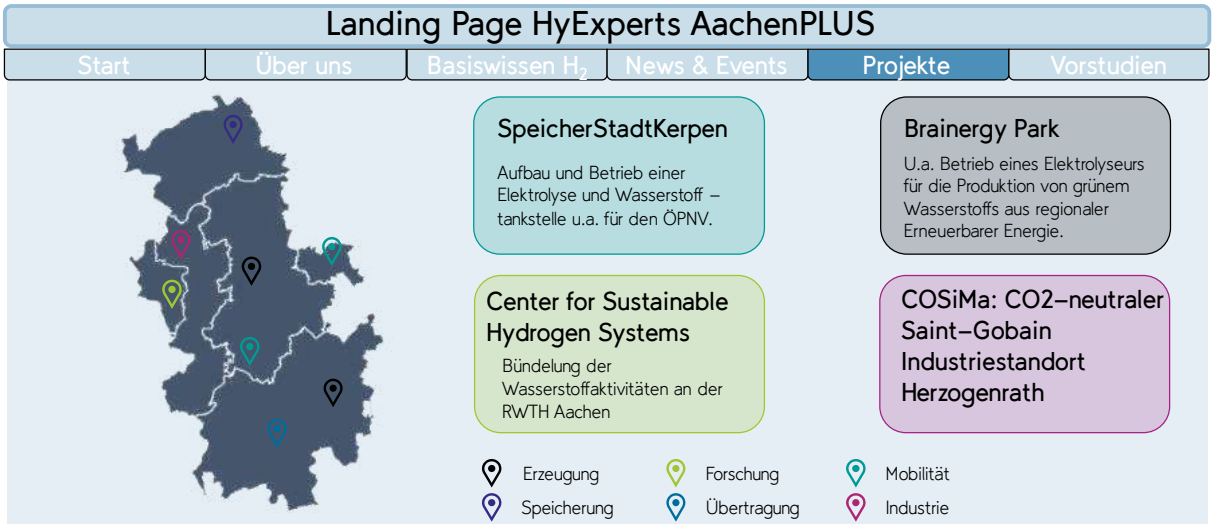


Abbildung 76:Konzeptionelle Darstellung H_2-Projektkarte auf dem Reiter „Projekte“

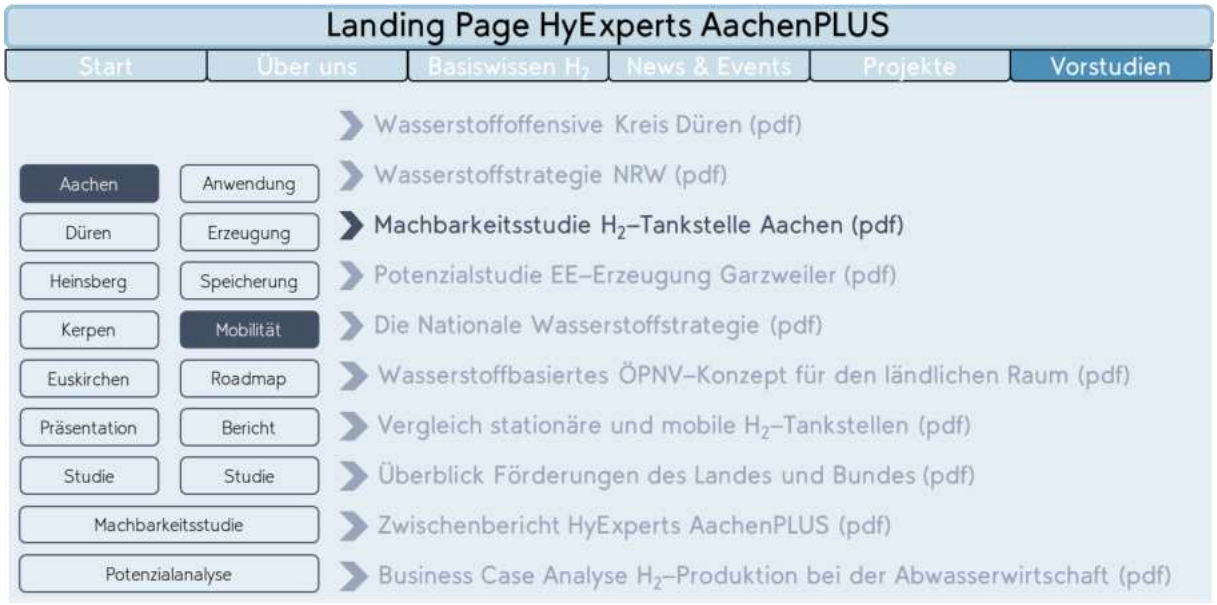


Abbildung 77: Konzeptionelle Darstellung der gesammelten Vorstudien und Selektion der relevanten Ergebnisse zum Wissenstransfer

Digitalplattform Hyperegio DIP

Neben den statischen Inhalten der Projektseite, welche auf der Seite des Hydrogen Hub integriert werden, wird für die interaktiven Vernetzungsfunktionen auf die bereits etablierte Digitalplattform Hyperegio DIP zurückgegriffen. Die DIP wurde im Jahr 2019 im Rahmen eines Interreg-Projektes der Euregio Maas-Rhein gegründet. Zielgruppe sind vor allem Start-Ups, Unternehmen, Forschungseinrichtungen und Kommunen, aber auch Privatpersonen können sich auf der Plattform registrieren und präsentieren. Dabei fokussiert sich die DIP nicht alleinig auf H_2-Themen, sondern steht allen Innovationsthemen offen, wodurch die potenzielle Anwendergruppe und die Reichweite enorm gesteigert wird. So wird die DIP derzeit bereits von anderen Innovationsprojekten, wie zum Beispiel EMR H2 Booster oder MATMED aktiv genutzt.

Wie von anderen sozialen Netzwerken bekannt, ist die Startseite eines jeden Nutzers der personalisierte Feed, der basierend auf den eigenen Interessen, Aktivitäten und Netzwerk individuell zusammengestellt wird. Dieser personalisierte Feed dient als Ausgangspunkt zur Informationsbeschaffung oder Recherche potenzieller Kooperationspartner. Das Zusammenbringen potenzieller Partner ist der Hauptzweck der Hyperegio DIP. Dazu haben Unternehmen, Forschungseinrichtungen und Kommunen die Möglichkeit, Angebote und Gesuche zu platzieren. In diesen beschreiben sie ihr Vorhaben und teilen mit, welche Kooperationspartner sie noch benötigen oder welche Leistungen sie bieten. Neben dem manuellen Browsen durch Angebote und Gesuche bringt, auf Grundlage der gefundenen Schlagworte in den Angeboten, Gesuchen und angegebenen Interessen, ein intelligenter Matchmaking-Algorithmus zielgerichtet Partner und Kunden für die Umsetzung zukünftiger innovativer Projekte zusammen bzw. schlägt potenzielle Interessenten vor. Die darauffolgende Kontaktaufnahme kann über die Nachrichtenfunktion direkt auf der DIP

stattfinden. Verbundvorhaben, wie beispielsweise das HyExperts AachenPLUS, haben zudem die Möglichkeit, geschlossene oder öffentliche Gruppen zu erstellen. Neben der Präsentation des HyExperts mit seinen Projektzielen lädt die spezifische HyExperts-Gruppe in einer fokussierten Umgebung zum Netzwerken ein. Zusätzlich besteht die Option, wichtige Dokumente zentral abzulegen, sodass jede Institution und jeder Nutzer darauf zugreifen kann. Alle Funktionen, die global über die gesamte DIP angeboten werden, wie der Marktplatz mit den Angeboten und Gesuchen, stehen auch innerhalb der Gruppe zur Verfügung. Zudem informieren Veröffentlichungen über den Status einzelner Vorhaben und den Fortschritt des Gesamtprojektes. Über einen Gruppenkalender sind anstehende Veranstaltungen im Rahmen des HyExperts AachenPLUS transparent für alle Gruppenmitglieder zugänglich.

Konzept des Kompetenzatlas

Die Region AachenPLUS verfügt über ein breites Spektrum an Kompetenzen, Interessen und Aktivitäten im Bereich Wasserstoff. Zur Sicherstellung der notwendigen Transparenz der Marktakteure wird im Zuge des Projektes ein Konzept für einen Kompetenzatlas entwickelt. Die Zielsetzung des Kompetenzatlas ist es, eine umfassende und stets aktuelle Übersicht aller Akteure und Aktivitäten in der Region zu liefern. Darüber hinaus erfolgt die einfache Zuordnung und Verortung der Akteure durch eine geografische und kompetenzbasierte Clusterung der ansässigen Industrie. Für die Etablierung des Kompetenzatlas ist es notwendig, relevante Informationen der Akteure, Projekte, Kompetenzen und Aktivitäten zu sammeln. Im Zuge einer Metaanalyse wird eine umfangreiche Sammlung aktueller Studien, Projekte und Netzwerke angefertigt. Ergänzend werden unternehmensspezifische Daten, wie Adressdaten, Kompetenzen im Bereich Wasserstoff und Kontaktdaten der Ansprechpartner, durch eine standardisierte Datenabfrage mittels geeigneter Umfrageprogramme, wie beispielsweise Microsoft Forms, gesammelt. Aufbauend auf dieser Datenbasis werden die verschiedenen Akteure und Aktivitäten entlang der H_2-Wertschöpfungskette sowie weiteren Querschnittsfunktionen verortet. Dies kann durch die Verteilung von mehreren Keywords für jeden Akteur erfolgen. Mithilfe der Adressdaten wird so eine Karte erstellt, welche die relevanten Akteure in der Region verortet (siehe exemplarisch Abbildung 78).



Abbildung 78: Umsetzungsvorschlag Kompetenzatlas

Der interaktive Kompetenzatlas wird der Öffentlichkeit zugänglich gemacht und zentral angeboten. Dafür bietet es sich an, den Kompetenzatlas auf der Seite des Hydrogen Hub Aachen zu integrieren. Durch das Sichtbarmachen der regionalen Kompetenzen und der Akteursvielfalt gelingt es nicht nur innerhalb der Region die Vernetzung und den Austausch zu fördern, sondern auch die Sichtbarkeit der Region überregional zu erhöhen.

Umsetzung der Wissensplattform und des Kompetenzatlas

Die IHK Aachen, die für den Hydrogen Hub Aachen verantwortlich ist, hat bereits Kontakt mit einer Medienagentur aufgenommen, welche die Implementierung der Landingpage mit den vorgestellten Funktionalitäten auf der Webseite des Hydrogen Hub Aachen umsetzt. Ein Austausch zwischen den Verantwortlichen der beauftragten Medienagentur und des Teams der Hyperegio DIP wurde arrangiert, bei dem die Schnittstellen für die reibungslose Synchronisation der News- und Kalenderaufträge definiert wurden. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass in Zukunft die gleichen Infoposts mit Neuigkeiten aus den H_2-Projekten des Regionenverbunds AachenPLUS sowie Einladungen zu öffentlichen Veranstaltungen sowohl auf der Landingpage als auch auf der Hyperegio DIP zu finden sind. Auf der Digitalen Innovationsplattform wurde eine öffentliche Gruppe zum HyExpert AachenPLUS gegründet und Einladungen an alle beteiligten Gebietskörperschaften sowie die weiteren in den Prozess involvierten Akteure aus Industrie und Forschung geschickt. Darüber hinaus werden die Mitglieder des H_2-Netzwerks Hydrogen Hub Aachen regelmäßig an den Beitritt erinnert. Da die Qualität eines jeden Netzwerks stark von der Interaktion ihrer Nutzerinnen und Nutzer abhängt, sollen neue Anwenderinnen und Anwender sowie deren Aktivitäten durch regelmäßige Statusmeldungen zum Fortschritt des Projektes gesteigert werden.

II. Tabellen zu Kapitel 5.2

Tabelle 12: H_2-Bedarfe der betrachteten Landkreise pro Stützjahr, nach Schlüsselbranche [GWh / a]

	Kreis Düren	Kreis Euskirchen	Kreis Aachen	Kolping-stadt Kerpen	Kreis Heinsberg
H_2-Bedarfe im Jahr 2025 [GWh / a]					
Glasindustrie	0	13	66	0	21
Papierindustrie	38	18	0	4	0
Metallverarbeitung	2	1	3	0	3
H_2-Bedarfe im Jahr 2030 [GWh / a]					
Glasindustrie	0	32	164	0	52
Papierindustrie	95	45	0	11	0
Metallverarbeitung	5	3	8	0	8
H_2-Bedarfe im Jahr 2035 [GWh / a]					
Glasindustrie	0	51	263	0	83
Papierindustrie	153	72	0	18	0
Metallverarbeitung	8	5	12	0	12

Tabelle 13: Stoffwerte und verbrennungstechnische Kenngrößen von Wasserstoff und Methan [25 °C / 0 °C]

	Einheit	CH_4	H_2	Relative Abweichung [%]
Normdichte	[kg / m_{N^3}]	0,7175	0,0899	- 87,47
volumetrischer Heizwert	[MJ / m_{N^3}]	35,89	10,79	- 69,74
volumetrischer Brennwert	[MJ / m_{N^3}]	39,83	12,74	- 68,00
oberer Wobbe-Index	[MJ / m_{N^3}]	55,47	50,14	- 9,61
untere Zündgrenze	[Vol.-%]	5,00	4,00	- 20,00
obere Zündgrenze	[Vol.-%]	15,00	74,20	394,60
adiabate Flammentemperatur ($\lambda = 1$)	[°C]	2774,00	2761,00	- 0,47
min. Sauerstoffbedarf	[$m_{N^3} O_2$ / m_{N^3} Gas]	2,00	0,50	- 75,00

III. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Gesamtroadmap Teil 1 5
Abbildung 2: Gesamtroadmap Teil 2 6
Abbildung 3: Karte der HyExperts Region AachenPLUS 8
Abbildung 4: Vergleich zwischen Szenariorahmen und den „Big-Five-Studien": Onshoreausbau für Deutschland 13
Abbildung 5: Vergleich zwischen Szenariorahmen und den „Big-Five-Studien": Photovoltaik 14
Abbildung 6: Potenzial vs. Ausbaupfad der Onshore-Windenergie in AachenPLUS 15
Abbildung 7: Potenzial vs. Ausbaupfad der PV in AachenPLUS 16
Abbildung 8: EE-Erzeugung vs. Stromverbrauch in AachenPLUS 17
Abbildung 9: Auswahl der Leistung eines Elektrolyseurs 19
Abbildung 10: Anschlusspunkte der Offshore-Anbindung gemäß NEP Strom (ungefähre Lage) 21
Abbildung 11: Technologiesteckbrief am Beispiel H_2-Druckspeicher 23
Abbildung 12: Vergleich von Kosten und technischer Reife von Speicher- und Infrastrukturtechnologien nach [18]–[25] 24
Abbildung 13: H_2-Netze Gasunie in 2030 [19] 26
Abbildung 14: Netzausbauvisionen des Port of Rotterdam: Der „Delta-Corridor" [20] 27
Abbildung 15: Status quo potenziell nutzbarer H_2-Infrastrukturen (eigene Abbildung) 28
Abbildung 16: H_2-Netze nach NEP Gas 2022-32 in 2027 (links) und 2032 (rechts), Einfärbung nach Einspeisung [21] 30
Abbildung 17: Verwendete Technologiebausteine für die Distributionskonzepte 31
Abbildung 18: Mittel- und langfristige Distributionsoptionen für die Region AachenPLUS 32
Abbildung 19: Ausgewählte Distributionskonzepte der Region AachenPLUS 33
Abbildung 20: Kostenvergleich der Distributionskonzepte und zeitliche Entwicklung 34
Abbildung 21: Übersicht der geplanten Projekte zur Integration von Brennstoffzellenfahrzeugen in der Region AachenPLUS (Anschaffung der Fahrzeuganzahl bis zum jeweiligen Jahr) 38
Abbildung 22: Überschlägiger Hochlauf des H_2-Bedarfs resultierend aus der Mobilität anhand zwei verschiedener Analyseansätze 40
Abbildung 23: H_2-Bedarf der Stützjahre und Skizzierung einer Tankstelleninfrastruktur (Radius 15 km) 43
Abbildung 24: H_2-Infrastruktur für den Schienenverkehr (Schienennetz Stand 2023) 44
Abbildung 25: Industrielle H_2-Bedarfe für Prozesswärme in AachenPLUS nach Stützjahren 48
Abbildung 26: Industrielle H_2-Bedarfe für Raumwärme und Warmwasser nach Schlüsselbranchen und Stützjahren 50
Abbildung 27: Prozesskette der Glasherstellung (Quelle: BV Glas [45]) 53
Abbildung 28: Stufen der Umsetzung von Vorhaben im H_2-Bereich 65
Abbildung 29: Einordnung der Akteure entlang der H_2-Wertschöpfungskette 67
Abbildung 30: Geografische Einordnung der Akteure aus Forschung und Wissenschaft 68
Abbildung 31: Karte zu Forschungseinrichtungen und Projekten in der Region AachenPLUS 70
Abbildung 32: Auswahlmöglichkeiten verschiedener Antriebstechnologien 72

Abbildung 33: Well-to-Wheel-Analyse nach DIN EN 16258 [61] 73
Abbildung 34: Grenzen der Well-to-Wheel-Analyse nach DIN EN 16258 [68] 74
Abbildung 35: Well-to-Wheel-spezifische Annahmen verschiedener Antriebstechnologien 74
Abbildung 36: Wirkungsgradverluste der Antriebstechnologien 75
Abbildung 37: Vergleich der Energieverbräuche WtT und TtW der Busantriebstechnologien 76
Abbildung 38: Vergleich der Energieverbräuche WtT und TtW der Zugantriebstechnologien 77
Abbildung 39: Vergleich der THG-Emissionen WtT und TtW der Busantriebstechnologien 78
Abbildung 40: Vergleich der THG Emissionen WtT und TtW von FCEV-, BEV-, FT-Diesel-, und Diesel Zug 78
Abbildung 41: Einfluss des Strommixes auf die THG-Emissionen am Beispiel BEV-Bus 79
Abbildung 42: Vergleich: WtW Energieverbräuche und THG-Emissionen der Antriebstechnologien 80
Abbildung 43: Übersicht der betrachteten Kostenstrukturen bei der TCO-Analyse 81
Abbildung 44: Annahmen der FCEV-Fahrzeuge für die TCO-Betrachtung © Foto: Caetano Bus | Toyota 82
Abbildung 45: Kostenannahmen der Tankinfrastruktur für die TCO-Betrachtung 83
Abbildung 46: Entwicklung der TCO von FCEV-Bussen im ländlichen Raum 83
Abbildung 47: Aufschlüsselung der TCO für den FCEV-Bus im ländlichen Raum im Jahr 2025 84
Abbildung 48: Ergebnisse der Sensitivitätsrechnung zum Basisfall mit TCO von 3,21 € / km für FCEV-Busse im ländlichen Raum 85
Abbildung 49: Kostenannahmen der Ladeinfrastruktur für die TCO-Betrachtung von BEV-Bussen 87
Abbildung 50: Annahmen der BEV-Busse für die TCO-Betrachtung © Foto: Daimler Truck 87
Abbildung 51: Entwicklung der TCO von BEV-Bussen im städtischen Raum 87
Abbildung 52: Aufschlüsselung der TCO für den BEV-Bus im städtischen Raum im Jahr 2025 88
Abbildung 53: Ergebnisse der Sensitivitätsrechnung zum Basisfall mit TCO von 3,28 € / km für BEV-Busse im städtischen Raum 89
Abbildung 54: Annahmen der FCEV-Züge für die TCO-Betrachtung © Foto: ALSTOM 90
Abbildung 55: Kostenannahmen der Tankstelleninfrastruktur für die TCO-Betrachtung von FCEV-Zügen 91
Abbildung 56: Aufschlüsselung der TCO für den FCEV-Zug im Jahr 2025 91
Abbildung 57: Entwicklung der TCO von FCEV-Zügen 91
Abbildung 58: Ergebnisse der Sensitivitätsrechnung zum Basisfall mit TCO von 7,86 € / km für FCEV-Züge 93
Abbildung 59: Vergleich der kilometerspezifischen TCO von FCEV-Bussen, BEV-Bussen und FCEV-Zügen in den Stützjahren 2025, 2030 und 2035. Die gestrichelte Linie markiert die TCO der günstigsten Mobilitätstechnologie (FCEV-Bus) im ersten Stützjahr 2025 94
Abbildung 60: Ergebnisse der Sensitivität „Gleiche Fahrleistung". Die gestrichelte Linie markiert die TCO der günstigsten Mobilitätstechnologie (BEV-Bus) im ersten Stützjahr 2025 94
Abbildung 61: TCO bezogen auf die Personenkilometer 95
Abbildung 62: Beispielhafte Governance-Struktur zur Umsetzung der H_2-Strategie 99

Abbildung 63: Mögliche Anbindungen an das belgische und niederländische H_2-Netz, eigene Abbildung 101
Abbildung 64: Sektorenroadmap Erzeugungspfade und-strukturen 103
Abbildung 65: Sektorenroadmap Transmission und Distribution 107
Abbildung 66: Sektorenroadmap Mobilität und Verkehr 111
Abbildung 67: Sektorenroadmap Industrie 114
Abbildung 68: Roadmap Gebäude 116
Abbildung 69: Sektorenroadmap Forschung, Entwicklung & Implementierung 119
Abbildung 71: Analysierte Plattformen 123
Abbildung 71: Konzept des neuen Webseitenheaders des Hydrogen Hub Aachen mit Unterseite AachenPLUS 127
Abbildung 72: Konzeptionelle Darstellung der Startseite der Projektlandingpage 127
Abbildung 73: Konzeptionelle Darstellung des Reiters „Über uns" der Projektlandingpage 128
Abbildung 74: Konzeptionelle Darstellung des Reiters „Basiswissen H_2" der Projektlandingpage mit Inhalten von H2Pro3 [86] 129
Abbildung 75: Konzeptionelle Darstellung des Reiters „News & Events" der Projektlandingpage 129
Abbildung 76:Konzeptionelle Darstellung H_2-Projektkarte auf dem Reiter „Projekte" 130
Abbildung 77: Konzeptionelle Darstellung der gesammelten Vorstudien und Selektion der relevanten Ergebnisse zum Wissenstransfer 131
Abbildung 78: Umsetzungsvorschlag Kompetenzatlas 133

IV. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Transportpipelines in der Region und potenzielle H_2-Kapazitäten 29
Tabelle 2: Verfügbarkeit und regionale Wertschöpfung der Distributionskonzepte 35
Tabelle 3: Kalkulierte H_2-Bedarfe aus studienbasierter Fahrzeugentwicklung und Bedarfen aus ÖPNV-Projektvorhaben – inklusive potenzieller Bedarfe ‚durch Personenzüge in Düren [+XX] 42
Tabelle 4: Prozesswärmebedarfe der regionalen Schlüsselbranchen nach Temperaturniveaus [GWh / a] [35] 46
Tabelle 5: Zu substituierende Prozesswärmebedarfe der Schlüsselbranchen nach Temperaturintervallen pro Stützjahr [GWh / a] 47
Tabelle 6: Kurzvorstellung der RWTH Aachen [71], des FZJ [72] und FH Aachen [73] 66
Tabelle 7: Rahmenbedingungen des Basisszenarios und der beiden Sensitivitätsszenarien „Optimistisch“ und „Konservativ“ für FCEV-Busse im ländlichen Raum (reale Preise) 85
Tabelle 8: Rahmenbedingungen des Basisszenarios und der beiden Sensitivitätsszenarien „Optimistisch“ und „Konservativ“ für BEV-Busse im städtischen Raum (reale Preise 89
Tabelle 9: Rahmenbedingungen des Basisszenarios und der beiden Sensitivitätsszenarien „Optimis-tisch“ und „Konservativ“ für FCEV-Züge (reale Preise) 92
Tabelle 10: Bewertungskriterien zur Auswahl der geeigneten Wissensplattform 125
Tabelle 11: Bewertungsergebnisse der Top 3 der vorstellten Plattformen 126
Tabelle 12: H_2-Bedarfe der betrachteten Landkreise pro Stützjahr, nach Schlüsselbranche [GWh / a] 134
Tabelle 13: Stoffwerte und verbrennungstechnische Kenngrößen von Wasserstoff und Methan [25 °C / 0 °C] 134

V. Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
AGIT	Aachener Gesellschaft für Innovation und Technologietransfer
ASEAG	Aachener Straßenbahn und Energieversorgungs-AG
BEMU	Battery Electric Multiple Unit (batterieelektrischer Zug)
BEV	Battery Elecrtric Vehicle (batterieelektrisches Fahrzeug)
BMDV	Bundesministerium für Digitales und Verkehr
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
BV Glas	Bundesverband Glasindustrie
CAPEX	Capital Expenditure (Investitionsausgaben)
CCfD	Carbon Contracts for Difference
CO_2	Kohlenstoffdioxid
DA	Delegated Act (Delegierter Rechtsakt)
DIP	Digitale Innovationsplattform
DN	Nenndurchmesser
EE	Erneuerbare Energie
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EFRE	Europäische Fonds für regionale Entwicklung
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle (Brennstoffzellenfahrzeug)
FH Aachen	Fachhochschule Aachen
FNB	Ferngasleitungsnetzbetreiber
FT-Diesel	Fischer-Tropsch-Diesel
FZ Jülich	Forschungszentrum Jülich
GWI	Gas- und Wärmeinstitut Essen
H_2	Wasserstoff
H_2O_2	Wasserstoffperoxid
H2BW	Plattform Wasserstoff für Baden-Württemberg
HEMU	Hydrogen Electric Multiple Unit (Brennstoffzellenzug)
HGÜ	Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung
HRS	Hydrogen Refueling Station (H_2-Tankstelle)
IHK Aachen	Industrie- und Handelskammer Aachen
LANUV	Landesamts für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen
LOHC	liquid-organic hydrogen carrier (flüssige, organische H_2-Träger)
MENA-Region	Middle East and North Africa (Mittlerer Osten und Nordafrika)
MoU	Memorandum of Understanding (Absichtserklärung)

NEP	Netzentwicklungsplan
NETG	Nordrheinische Erdgastransportleitungsgesellschaft
NRW	Nordrhein-Westfalen
OGE	Open Grid Europe GmbH
OPEX	Operational Expenditure (Betriebskosten)
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
PPA	Power Purchase Agreement (Stromkaufvereinbarung)
PV	Photovoltaik
QSL-Verfahren	Verfahren zur Verhüttung von Blei
RED II	Renewable Energy Directive II
RWTH Aachen	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
SIP	Staatlich induzierte Preiskomponente
SzR	Szenariorahmen
TCO	Total Cost of Ownership (Gesamtkosten über Produktlebensspanne)
TRL	Technology Readiness Level (Technologie-Reifegrad)
TtW	Tank-to-Wheel („vom Tank bis zum Rad“)
Vbh	Vollbenutzungsstundenzahl
WtT	Well-to-Tank („vom Bohrloch bis in den Tank“)
WtW	Well-to-Wheel („vom Bohrloch bis zum Rad“)
ZRR	Zukunftsagentur Rheinisches Revier GmbH

VI. Literaturverzeichnis

[1] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), „Die Nationale Wasserstoffstrategie". Juni 2020.
[2] Rat der Europäischen Union, „Fit für 55". [Online]. Verfügbar unter: https://www.consilium.europa.eu/de/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/
[3] „HyLand - Wasserstoffregionen in Deutschland". [Online]. Verfügbar unter: https://www.hy.land/
[4] „Was ist das HyExperts-Programm?" [Online]. Verfügbar unter: https://www.hy.land/wp-content/uploads/2022/04/Flyer-Du%CC%88ren_V03.pdf
[5] „Potenzial für Neues. ‚HYDROGEN HUB Aachen', wer, was, warum?" [Online]. Verfügbar unter: https://hydrogenhubaachen.de/ueber-uns.html
[6] „Potenzialstudie Windenergie NRW, LANUV-Fachbericht 124". April 2022.
[7] „Potenzialstudie Erneuerbare Energien NRW, Teil 2 - Solarenergie, LANUV-Fachbericht 40". 2023.
[8] „Szenariorahmen zum Netzentwicklungsplan Strom 2037 mit Ausblick 2045, Version 2023".
[9] dena, „dena Leitstudie Abschlussbericht". 2021.
[10] Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende, „Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann. - Langfassung". 2021.
[11] BDI, „BDI (2021) | Bundesverband der deutschen Industrie e. V. (Hrsg.) (BDI): KLIMAPFADE 2.0 – Ein Wirtschaftsprogramm für Klima und Zukunft.", 2021, [Online]. Verfügbar unter: https://bdi.eu/publikation/news/klimapfade-2-0-ein-wirtschaftsprogramm-fuer-klima-und-zukunft/
[12] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), „Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland 3". [Online]. Verfügbar unter: https://www.langfristszenarien.de/enertile-explorer-de/dokumente/
[13] Forschungsprojekt Ariadne, „Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität". [Online]. Verfügbar unter: https://ariadneprojekt.de/publikation/deutschland-auf-dem-weg-zur-klimaneutralitat-2045-szenarienreport/
[14] „Bedarfsermittlung 2023 - 2037 / 2045, Genehmigung des Szenariorahmens 2023 - 2037 / 2045". Juli 2022.
[15] Europäische Kommission, „Pressemitteilung der Europäischen Kommission: Komission legt Vorschriften für erneuerbaren Wasserstoff fest". 13. Februar 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/ip_23_594
[16] NASA, „Technology Readiness Level". 2012. [Online]. Verfügbar unter: https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/engineering/technology/technology_readiness_level
[17] umlaut energy GmbH - Part of Accenture, *Wasserstoffwertschöpfungskette im Rheinischen Revier*. Zukunftsagentur Rheinisches Revier, 2022.
[18] E. Rivard, M. Trudeau, und K. Zaghib, „Hydrogen Storage for Mobility: A Review", *Materials*, Bd. 12, Nr. 12, S. 1973, Juni 2019, doi: 10.3390/ma12121973.
[19] Charlotte van Leeuwen, University of Groningen, „Innovative large-scale energy storage technologies and Power-to-Gas concepts after optimisation". Store&Go, 2018.
[20] Kearney Energy Transition Institute, „Hydrogen applications and business models". 2020.

[21] M. Niermann, S. Drünert, M. Kaltschmitt, und K. Bonhoff, „Liquid organic hydrogen carriers (LOHCs) – techno-economic analysis of LOHCs in a defined process chain", *Energy Environ. Sci*, Bd. 12, Nr. 1, S. 290–307, 2019, doi: 10.1039/C8EE02700E.
[22] J. Andersson und S. Grönkvist, „Large-scale storage of hydrogen", *Int. J. Hydrog. Energy*, Bd. 44, Nr. 23, S. 11901–11919, Mai 2019, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.03.063.
[23] V. Dias, M. Pochet, F. Contino, und H. Jeanmart, „Energy and Economic Costs of Chemical Storage", *Front. Mech. Eng.*, Bd. 6, S. 21, Mai 2020, doi: 10.3389/fmech.2020.00021.
[24] M. Reuß, T. Grube, M. Robinius, und D. Stolten, „A hydrogen supply chain with spatial resolution: Comparative analysis of infrastructure technologies in Germany", *Appl. Energy*, Bd. 247, S. 438–453, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.04.064.
[25] IEA, „Global Hydrogen REVIEW 2021", 2021.
[26] Port of Rotterdam, „DELTA CORRIDOR CONNECTING INDUSTRIES", Apr. 2021.
[27] FNB Gas - Der Fernleitungsnetzbetreiber, „Netzentwicklungsplan Gas 2022 - 2032. Zwischenstand". [Online]. Verfügbar unter: https://fnb-gas.de/wp-content/uploads/2022/07/2022_07_06_NEP-Gas-2022-2032-Zwischenstand.pdf
[28] DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfachs e. V, „Der Gasnetzgebietstransformationsplan Ergebnisbericht 2022", Sep. 2022.
[29] ASEAG, „Vision 2027 ASEAG". 2019. [Online]. Verfügbar unter: https://www.aseag.de/fileadmin/aseag_media/documents/Vision2027/Vision_2027_ASEAG.pdf
[30] RVK, „Zukunftsthema Wasserstoff im Kreis Euskirchen", 2021. https://www.rvk.de/pressemitteilungen/detail/zukunftsthema-wasserstoff-im-kreis-euskirchen
[31] West-Verkehr, „Die erhoffte Anschaffung von wasserstoffbetriebenen Linienbussen im Kreis Heinsberg wird umgesetzt", 2022. https://www.west-verkehr.de/index.php/de/west-news
[32] Kolpingstadt Kerpen, „RealLabor SpeicherStadt Kerpen", 2019. https://www.stadt-kerpen.de/media/custom/1708_13894_1.PDF?1595338148
[33] Stadt Aachen, „Pionierarbeit: Aachen nimmt zwei Wasserstofffahrzeuge für die Abfallsammlung in Betrieb". https://www.aachen.de/DE/stadt_buerger/aachener_stadtbetrieb/wasserstofffahrzeuge.html
[34] B. Gillessen, J. Kuhn, T. Pöll, M. Robinius, und D. Stolten, „Wasserstoffoffensive Kreis Düren". Kreis Düren, 2021.
[35] S. Cerniauskas, T. Grube, A. Praktiknjo, D. Stolten, und M. Robinius, „Future Hydrogen Markets for Transportation and Industry: The Impact of CO2 Taxes", 2019.
[36] SCI4climate.NRW, „Quantitativer Vergleich aktueller Klimaschutzszenarien für Deutschland", 2022. https://www.energy4climate.nrw/fileadmin/Service/Publikationen/Ergebnisse_SCI4climate.NRW/Szenarien/2022/samadi-2022-vergleich-aktueller-klimaschutzszenarien-fuer-deutschland-cr-sci4climatenrw.pdf
[37] bast - Bundesanstalt für Straßenwesen, „Automatische Dauerzählstellen auf Autobahnen und Bundesstraßen". https://www.bast.de/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/v2-verkehrszaehlung/zaehl_node.html
[38] Verbund Umweltverträglichkeitsprüfung der Länder, „Planfeststellungsverfahren für die Elektrifizierung der Euregiobahn, Bahnhof Herzogenrath (Pfa 3)", 2021. https://www.uvp-verbund.de/trefferanzeige?docuuid=14C93744-A9C3-4C50-A236-42E41E48B9D1
[39] Rurtalbahn, „Erster Wasserstoffzug auf der Rurtalbahn-Strecke im Test", 2020. https://www.rurtalbahn.de/2020/02/18/bonn-ist-in-diesem-jahr-zum-driten-mal-ziel-der-kreis-dueren-tage/
[40] Umwelt Bundesamt, Deutsche Emissionshandelsstelle, „Register Emissionshandelspflichtige Anlagen, 2019", 2020. https://www.dehst.de/SharedDocs/downloads/DE/anlagenlisten/2019.pdf?__blob=publicationFile&v=3

[41] „Agentur für Erneuerbare Energien e.V.: Industrieller Wärmebedarf nach Wirtschaftszweifen." 2017. [Online]. Verfügbar unter: https://www.unendlich-viel-energie.de/mediathek/grafiken/industrieller-waermebedarf-nach-wirtschaftszweigen
[42] AG Energiebilanzen, „AG Energiebilanzen (2020). Energiebilanz Bundesrepublik Deutschland 2019". 2020.
[43] „HyGlass - Abschlussbericht", 2022.
[44] Umweltbundesamt, „Entwicklung und Zielerreichung der Treibhausgasemissionen in Deutschland im Sektor Industrie des Klimaschutzgesetzes (KSG)". 2023.
[45] DIE PAPIERINDUSTRIE, „DIE PAPIERINDUSTRIE: Leistungsbericht PAPIER 2021. Bonn. 2021". [Online]. Verfügbar unter: https://www.papierindustrie.de/papierindustrie/statistik/papier-2022-herunterladen
[46] BMWK, „Effiziente Nutzung von Wasserstoff in der Glas-, Keramik-, Papier- und NE-Metallindustrie", 2022.
[47] Erdwich - Shredding unlimited, „Reject Aufbereitung". [Online]. Verfügbar unter: https://www.erdwich.com/einsatzbereiche/reject/
[48] Regionalstatistik Genesis, „Betriebe und beschäftigte Personen nach Wirtschaftszweigen (WZ 2008)." [Online]. Verfügbar unter: 1.1.1 https://www.regionalstatistik.de/genesisws/downloader/00/tables/42111-02-03-4_00.csv
[49] Franz Joseph Dreyhaupt (Hrsg.), „VDI-Lexikon Umwelttechnik." VDI-Verlag Düsseldorf 1994.
[50] Stadt Stolberg, „Lexikon der Stadt Stolberg: Alphabet der Heimatkunde - Buchstabe Q - QSL-Verfahren". [Online]. Verfügbar unter: http://www.stolberg-abc.de/htdocs/qtxt.htm
[51] Chemie.de, „Chemie.de / Lexikon / Blei". [Online]. Verfügbar unter: https://www.chemie.de/lexikon/Blei.html#_ref-2/
[52] NRE.Energy4Climate, „NRW.Energy4Climate: Best Practice - HyGlass", 2021. https://www.energy4climate.nrw/themen/best-practice/hyglass
[53] Zier, M. et al., „Zier, M., et al. (2021). A review of decarbonization options for the glass industry", 2021.
[54] FEVE - The European Container Glass Federation, „A Fundamental Milestone Towards Climate-Neutral Glass Packaging", *Quantitativer Vergleich aktueller Klimaschutzszenarien für Deutschland*, 2022. https://feve.org/glass-industry/projects/furnace-future/
[55] BV Glas, „Behälterglasindustrie auf dem Weg zu 50 Prozent CO2-Reduktion", 2021. https://www.bvglas.de/detail/news/behaelterglasindustrie-auf-dem-weg-zu-50-prozent-co2-reduktion/
[56] W. Voß, „Industriegruppensekretär Glas der IG BCE".
[57] Destatis, „Erdgaspreise für Nicht-Haushalte: Deutschland, Jahre, Jahresverbrauchsklassen, Preisbestandteile". [Online]. Verfügbar unter: https://www-genesis.destatis.de/genesis/online?sequenz=tabelleErgebnis&selectionname=61243-0015&language=de#abreadcrumb
[58] S. „Verband der bayrischen Wirtschaft (vbw)", „Strompreisprognose", 2022, [Online]. Verfügbar unter: https://www.vbw-bayern.de/Redaktion/Frei-zugaengliche-Medien/Abteilungen-GS/Wirtschaftspolitik/2022/Downloads/vbw_Strompreisprognose.pdf
[59] Umwelt Bundesamt, „Emissions trading rings up record revenues: More than 13 billion euros for climate protection. Emissions trading squares ambitious climate action with social compatibility and economic competitiveness." [Online]. Verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/en/press/pressinformation/emissions-trading-rings-up-record-revenues-more
[60] Umweltbundesamt, „Umweltbundesamt 2022, Kohlendioxid-Emissionsfaktoren für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen", 2022. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/361/dokumente/co2_ef_liste_2022_brennstoffe_und_industrie_final.xlsx

[61] Statista, „Um wieviel Prozent dürfte ein nachhaltig und umweltschonend hergestelltes Produkt maximal teurer sein als ein konventionell erzeugtes Produkt, damit Sie es für einen Kauf in Erwägung ziehen würden?“, 2020. https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1154639/umfrage/umfrage-zur-preisbereitschaft-bei-nachhaltigen-produkten/#:~:text=Rund%20die%20H%C3%A4lfte%20der%20Befragten,f%C3%BCr%20ein%20nachhaltiges%20Produkt%20zahlen
[62] Statista, „Kostenstruktur der deutschen Glasindustrie im Jahr 2020“, 2022. https://de.statista.com/statistik/daten/studie/613013/umfrage/kostenstruktur-der-deutschen-glasindustrie/
[63] „Energiewende in der Industrie. Potenziale und Wechselwirkungen mit dem Energiesektor. Branchensteckbrief Glasindustie“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiewende-in-der-industrie-ap2a-branchensteckbrief-glas.pdf?__blob=publicationFile&v=4
[64] BMWi, „Was sind eigentlich Carbon Contracts for Difference?“ [Online]. Verfügbar unter: https://www.bmwi-energiewende.de/EWD/Redaktion/Newsletter/2020/12/Meldung/direkt-erklaert.html
[65] „Glasindustrie 2021 - Herausforderungen für die Unternehmen der Glasindustrie“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.efzn.de/fileadmin/documents/Niedersaechsische_Energietage/Vortr%C3%A4ge/2021/NET2021_Nelles.pdf
[66] BMWK, „Förderprogramm Klimaschutzverträge“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Klimaschutz/klimaschutzvertraege.html
[67] Deutsche Förschungsgemeinschaft e.V., Hrsg., „Förderatlas 2021“. 2022.
[68] „Norm EN 16258 ‚Methode zur Berechnung und Deklaration des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen bei Transportdienstleistungen‘:“
[69] Umweltbundesamt, „Marktanalyse Ökostrom II“, Aug. 2019.
[70] „ElektroMobilität NRW“, „Förderung von Elektrobussen nach §13 Absatz 1 Nr.6 ÖPNVG NRW“. https://www.elektromobilitaet.nrw/fileadmin/Daten/Download_Dokumente/Foerderungen/Produktblatt_E-Busfoerderung.pdf
[71] „Sphera Solutions GmbH“, „Programmbegleitforschung Innovative Antriebe und Fahrzeuge - Innovative Antriebe im straßengebundenen ÖPNV“, [Online]. Verfügbar unter: https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2022/04/NOW_Abschlussbericht_Begleitforschung-Bus.pdf
[72] „Hydrogen Council“, „Path to hydrogen competitiveness. A cost perspective“, 2020. [Online]. Verfügbar unter: https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2020/01/Path-to-Hydrogen-Competitiveness_Full-Study-1.pdf
[73] C. Moll, P. Plötz, K. Hadwich, und M. Wietschel, „Are Battery-Electric Trucks for 24-Hour Delivery the Future of City Logistics?—A German Case Study“, *World Electr. Veh. J.*, Bd. 11, Nr. 1, S. 16, Feb. 2020, doi: 10.3390/wevj11010016.
[74] W. Klebsch, N. Guckes, und P. Heininger, *Bewertung klimaneutraler Alternativen zu Dieseltriebzügen: Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen am Praxis-Beispiel› Netz Düren‹*. VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik eV, 2020.
[75] F. Frank und T. Gnann, „Alternative Antriebe im Schienenverkehr“, Working Paper Sustainability and Innovation, 2022.
[76] „Durchschnittliche Auslastung im öffentlichen Personennahverkehr im Jahr 2017 nach Verkehrsmitteln“, *statista*, 21. Januar 2022. https://de.statista.com/statistik/daten/studie/975534/umfrage/auslastung-des-oeffentlichen-personennahverkehrs-nach-verkehrsmitteln/
[77] EMR BOOSTER H2, „Deliverable 1B Mapping of industrial players in the field of green hydrogen“, Sep. 2022.

[78] Fluxys, „Indicative Investment Plan Fluxys Belgium & Fluxys LNG 2022-2031“, Feb. 2022.
[79] Ministerium für Wirtschaft, Industrie, Klimaschutz und Energie und des Landes Nordrhein-Westfalen, „Integrierte Netzplanung NRW Gemeinsam eine effiziente Energieinfrastruktur schaffen“, Feb. 2023.
[80] „Treibhausgasemissionen in Deutschland nach Sektoren des Klimaschutzgesetzes in den Jahren 1990 bis 2021 und Prognose für 2030 (in Millionen Tonnen CO2-Äquivalent).“ [Online]. Verfügbar unter: https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1241046/umfrage/treibhausgasemissionen-in-deutschland-nach-sektor/
[81] „Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe und zur Aufhebung der Richtlinie 2014/94/EU des Europäischen Parlaments und des Rates.“ [Online]. Verfügbar unter: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:dbb134db-e575-11eb-a1a5-01aa75ed71a1.0008.02/DOC_1&format=PDF
[82] umlaut, ETC, und EMCEL, „Wasserstoffoffenisve Kreis Düren“, [Online]. Verfügbar unter: https://www.kreis-dueren.de/pdfs/aemter/Broschuere_H2O_DINA4.pdf
[83] eifel.info, „Wasserstoff-Roadmap für den Kreis Euskirchen - Konkrete Initiativen statt Papiertiger: Wie kann de regionale Wirtschaft von Energieträger Wasserstoff profitieren? Bis Sommer sollen konkrete Handlungsempfehlungen erarbeitet werden.“ [Online]. Verfügbar unter: https://wirtschaft.eifel.info/2022/04/15/wasserstoff-roadmap-fuer-den-kreis-euskirchen-konkrete-initiativen-statt-papiertiger-wie-kann-die-regionale-wirtschaft-vom-energietraeger-wasserstoff-profitieren-bis-sommer-sollen-konkrete-handlun/
[84] Innoloft GmbH, „Hyperegio DIP - Digitale Innovationsplattform“, *DIP | Die Innovationsplattform*. https://hyperegio-dip.eu/
[85] IHK Aachen, „Hydrogen Hub Aachen“, *HYDROGEN HUB Aachen*. https://hydrogen-hubaachen.de/
[86] HyCologne, TH Köln, und coac GmbH, „H2Pro3“, *H2Pro3*. https://www.h2pro3.de/
[87] Open Grid Europe GmbH, „H2Connect“, *H2-App*. https://app.h2connect.energy/
[88] e-mobil BW GmbH, „Plattform H2BW“, *Plattform Wasserstoff für Baden-Württemberg*. https://www.plattform-h2bw.de
[89] Ministerium für Wirtschaft, Industrie, Klimaschutz und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen, „H2Land NRW“, *Wasserstoffkarte NRW*. https://www.h2land-nrw.de/
[90] Ministerium für Wirtschaft, Industrie, Klimaschutz und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen, „ZRR Projektkarte Strukturwandel“, *Projekte - Strukturwandel Rheiisches Revier*. https://www.revier-gestalten.nrw/projekte

HYDROGEN HUB AACHEN

Gefördert durch:

Bundesministerium für Digitales und Verkehr

Koordiniert durch:

NOW GMBH.DE

Projektträger:

Projektträger Jülich
Forschungszentrum Jülich