

Wasserstoff-Potenzialstudie und -Bewertung einer versiegelten Industriefläche am Beispiel „Rüsselsheim West“ –

Aufbau einer Wasserstoffproduktion und Etablierung eines
Wasserstoffclusters für die Stadt Rüsselsheim am Main, die Rhein-Main-
Region sowie das Land Hessen

Abschlussbericht

Wiesbaden, 01.09.2025

Projektleitung und Durchführung:

David Coleman – hynes GmbH

Daniel Müller – hynes GmbH

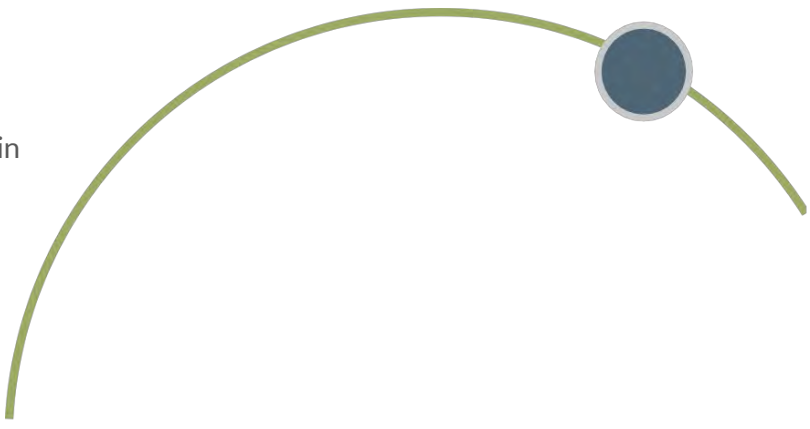
Matthias Werner – hynes GmbH

Kevin Basei Welti – hynes GmbH

Meryem Maghrebi – cruh21 GmbH

Martin Wilferth – cruh21 GmbH

Prof. Dr. Birgit Scheppat – Hochschule RheinMain



Version	Datum	Status	Erstellt	Geprüft	Freigegeben
1.4	02.09.2025	Entwurf	Müller	Werner	Coleman

1. Inhalt

1. Einleitung.....	9
1.1. Ziel und Zweck der Studie.....	9
1.2. Bedeutung der Wasserstofftechnologie.....	9
1.3. Kontext: Rüsselsheim am Main als Standort für Ansiedlung.....	9
1.4. Methodik der Untersuchung.....	11
1.5. Studienaufbau.....	13
2. Grundlagen der Wasserstofftechnologie	15
2.1. Wasserstofferzeugung.....	15
2.1.1. Wasserstoffproduktion: Überblick über Technologien	15
2.1.2. Funktionsweise und Prozess der Elektrolyse	16
2.2. Aufbereitung	17
2.3. Transport und Verteilung	19
2.3.1. Straßentransport	19
2.3.2. Leitungsgebundener Transport.....	20
2.4. Anwendung	23
2.4.1. Verkehr.....	23
2.4.2. Energiewirtschaft	24
2.4.3. Sektorübergreifende Anwendungen	24
3. Potenzialanalyse Wasserstoffprojekt in Rüsselsheim am Main.....	26
3.1. Randbedingungen und Szenariodefinition	26
3.1.1. Produktionsleistung.....	26
3.1.2. Medienver- und -entsorgung.....	26
3.1.3. Zwischenspeicherkapazitäten.....	27
3.1.4. Transportoptionen	27
3.1.5. Flächenbedarf	28
3.2. Standortanalyse für die Elektrolyseanlage.....	28
3.2.1. Standortkriterien für Wasserstoffproduktionsanlagen	28
3.2.2. Bewertung der Potenzialstandorte.....	35
3.3. Regionale und lokale Energieversorgung	39
3.3.1. Strom	39
3.3.2. Gas	42
3.3.3. Wasserstoffkernnetz	44

3.4.	Integration der Elektrolyseanlage in die bestehende Infrastruktur	45
3.4.1.	Stromversorgung.....	45
3.4.2.	Wärmeversorgung	46
3.4.3.	Wasserversorgung	46
3.5.	Genehmigungsrechtliche Anforderungen	47
3.5.1.	Immissionsschutzrechtliche Genehmigungspflicht	47
3.5.2.	Bauordnungs- und Bauplanungsrecht.....	48
3.5.3.	Störfallrechtliche Anforderungen	48
3.5.4.	Betriebssicherheitsrecht und GasHDrLtgV	48
3.5.5.	Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP).....	48
3.5.6.	Ausgangszustandsbericht (AZB).....	48
3.5.7.	Risiko- und Gefährdungseinschätzung	48
3.6.	Bewertung der Umweltauswirkungen der Verkehrsemissionen	50
3.6.1.	THG und Luftschadstoffemissionen.....	50
3.6.2.	Lärmemissionen.....	51
3.7.	Standortanalyse für Wasserstofftankstellen	52
3.7.1.	Technische Machbarkeit – Stromversorgung & Tankstellentechnik	53
3.7.2.	Versiegelung und Tragfähigkeit	54
3.7.3.	Standortkriterien für Wasserstofftankstellen	55
3.7.4.	Flächenpotenzial und Nutzbarkeit.....	57
3.8.	Wasserstoff im Schienenpersonen- und Güterverkehr.....	62
3.8.1.	Einsatz von Wasserstoffzügen – Stand der Technik.....	63
3.8.2.	Güterzüge als Transport- und Verteiloption für Wasserstoff	64
3.9.	Elektrolyseprojekt-Benchmark in Deutschland.....	66
3.9.1.	SWOT-Analyse Brownfield.....	70
4.	Marktanalyse und wirtschaftliche Perspektiven	73
4.1.	Wasserstoffbedarf Hessen.....	73
4.1.1.	Industrie	74
4.1.2.	Gebäude.....	77
4.1.3.	Verkehr.....	79
4.1.4.	Energiewirtschaft	83
4.1.5.	Zusammenfassung	85
4.2.	Regionale Nachfrage nach Wasserstoff	87
4.3.	Mögliche Abnehmer des Wasserstoffs (Industrie, Verkehr, Energieversorgung)	92

4.4.	Kostenanalyse für die Elektrolyseanlage.....	94
5.	Nachhaltigkeit und Umweltauswirkungen	96
6.	Synergien und Innovationen	99
6.1.	Integration der Wasserstofftechnologie mit anderen städtischen Projekten.....	101
6.1.1.	Herausforderungen der zeitlichen Diskrepanz von Nachfrage und Verfügbarkeit erneuerbarer Stromquellen.....	101
6.1.2.	Rechenzentren und Wärmenetze	102
6.1.3.	Flexible Kraftwerkskapazitäten und Wasserstoffintegration.....	105
6.1.4.	Sauerstoffverwertung	106
6.2.	Kooperationen mit der Industrie und Forschungseinrichtungen.....	107
7.	Wirtschaftliche und gesellschaftliche Auswirkungen	111
7.1.	Schaffung von Arbeitsplätzen durch den Bau und Betrieb der Elektrolyseanlage .	111
7.2.	Auswirkungen auf die lokale Wirtschaft	113
7.3.	Akzeptanz und Beteiligung der Bevölkerung	114
7.4.	Wasserstoffkompetenzzentrum inkl. Multiplikatoreneffekte wie Innovationshub und Tech-Park.....	114
8.	Ergebniszusammenfassung und Handlungsempfehlungen.....	120
8.1.	SWOT Standortanalyse Rüsselsheim am Main	121
8.2.	Flächenpotenziale	123
8.3.	Handlungsempfehlungen:.....	127
9.	Abbildungsverzeichnis.....	130
10.	Tabellenverzeichnis.....	132
11.	Literaturverzeichnis	132
12.	Anhang.....	138
12.1.	Bewertungsmatrix.....	138
12.2.	Modellszenarien	138
12.3.	Genehmigungsleitfaden	138
12.4.	Foliensatz	138
12.5.	Karten	138
12.6.	Sonstige Anhänge.....	138

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Begriff
ADR	European Agreement Concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road
AEL	Alkalische Elektrolyseure
AP	Arbeitspakete
AZB	Ausgangszustandsbericht
BASt	Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen
BEMU	Battery Electric Multiple Units
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
CAPEX	Capital Expenditure (Investitionsausgaben)
CCS	Carbon Capture and Storage
CCU	Carbon Capture and Utilization
CENA	Centre of Competence for Climate, Environment and Noise Protection in Aviation
CGH ₂	Compressed Gaseous Hydrogen (kontextuell aus CGH ₂ -Tube-Trailer und CGH ₂ -MEGC-Trailer abgeleitet)
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DI-Wasser	Deionisiertes Wasser
DN	Nenndurchmesser
DP	Druckstufe
EE	Erneuerbare Energien
EHB	European Hydrogen Backbone
EnWG	Energiewirtschaftsgesetz
FCH JU	Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking
FNB	Fernleitungsnetzbetreiber
FNP	Flächennutzungsplan
GasHDrLtGv	Gashochdruckleitungsverordnung
GH ₂	Gasförmiger Wasserstoff
GIS	Geoinformationssystem
H ₂	Wasserstoff
HEMU	Hydrogen Electric Multiple Unit
HHV	Oberer Heizwert
HOLM	House of Logistics & Mobility
HRS	Hydrogen Refueling Station ("Wasserstofftankstelle")
IE	Industrieemissionen (aus IE-Richtlinie)
IMDG	International Maritime Dangerous Goods Code
IPCEI	Important Project of Common European Interest
KEO	Konsortium Energieversorgung Opel
KI	Künstliche Intelligenz
KMW	Kraftwerke Mainz-Wiesbaden AG
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
KWS	Kraftwerksstrategie
KWSG-E	Kraftwerkssicherheitsgesetz
LCOH	Levelised Cost of Hydrogen
LEA	LandesEnergieAgentur Hessen GmbH

LH2	Liquid Hydrogen
LHV	Unterer Heizwert
LOHC	Liquid Organic Hydrogen Carriers
MEGC	Multi-Element Gas Container
METG	Mittelrheinische Erdgastransportleitungsgesellschaft
NETG	Nordrheinische Erdgastransportleitungsgesellschaft
NWS	Nationale Wasserstoffstrategie
O2	Sauerstoff
OEM	Original Equipment Manufacturer
OGE	Open Grid Europe GmbH
OPEX	Operational Expenditure (Betriebsausgaben)
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
PED	Pressure Equipment Directive
PEMEL	Protonen-Austausch-Membran-Elektrolyseure
PtG	Power to Gas
PtG2P	Power-to-Gas-to-Power
PUE	Power Usage Effectiveness
RID	Ordnung für die internationale Eisenbahnbeförderung gefährlicher Güter
RLS-19	Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen
RMV	Rhein-Main-Verkehrsverbund
SDG	Sustainable Development Goals
SOEL	Festoxid-(Hochtemperatur-) Elektrolyseure
TCO	Total cost of ownership
THG	Treibhausgase
TREMOD	Transport Emission Model
UA/UW	Umspannanlage/Umspannwerk
UN	Vereinte Nationen
UVP	Umweltverträglichkeitsprüfung
UVPG	Umweltverträglichkeitsprüfungsgesetz
ZGM	Zulässige Gesamtmasse

Executive Summary

Die vorliegende Studie untersucht das Potenzial für den Aufbau einer Wasserstoffproduktion und die Etablierung eines Wasserstoffclusters in Rüsselsheim am Main, exemplarisch analysiert an der Industriefläche „Rüsselsheim West“ (ehem. Opelflächen). Ziel ist es, eine Entscheidungsgrundlage für Politik, Stadtentwicklung und Investoren zu schaffen und eine übertragbare Blaupause für die Reaktivierung von Brownfield- und Bestandsflächen in Hessen zu entwickeln.

Durch die freiwerdenden Flächen des Stellantis/Opel-Geländes (ca. 120 ha) bietet sich eine Chance für eine zukunftsweisende, ökonomisch und ökologisch wirksame Transformation. Die detaillierte Standortanalyse bewertete acht potenzielle Flächen, von denen sich „Mainzer Straße Süd“, „Mainzer Straße Nord“ und „Gewerbepark West“ als besonders geeignet für den Aufbau einer Wasserstoffproduktion erwiesen. Diese Flächen punkten durch ihre derzeitige Größe, die bestehende gewerbliche Ausweisung und eine gute infrastrukturelle Anbindung.

Ein entscheidender Standortvorteil für die H₂-Wirtschaft ist die **Nähe zum geplanten Wasserstoff-Kernnetz**, das westlich an Rüsselsheim am Main vorbeiführen soll und bis 2032 eine überregionale Anbindung an Produktions- und Verbrauchszentren sichert. Dies schafft langfristige Versorgungssicherheit und Skalierungsmöglichkeiten. Trotz dieser Anbindung wird eine dezentrale Erzeugung vor Ort als strategisch sinnvoll erachtet, um frühzeitig lokale Bedarfe zu decken und die regionale Resilienz zu stärken.

Verwiesen wird auf das Potenzial von **Wasserstoff als Impulsgeber für die Weiterentwicklung des bestehenden Automotive-Clusters** und der regionalen Wirtschaft allgemein. Global agierende Unternehmen wie **Opel/Stellantis, Hyundai und der Engineering-Dienstleister SEGULA Technologies** sind bereits am Standort in der Forschung und Entwicklung von Brennstoffzellentechnologien aktiv. Die Nähe zu Frankfurt als wirtschaftlicher und industrieller Anker und dem Frankfurter Flughafen können wirtschaftsclusterstrategisch genutzt werden. Die Ansiedlung einer Wasserstoffproduktion würde diese Aktivitäten noch stärker bündeln und Rüsselsheim als Innovationszentrum positionieren.

Verstärkt wird dieses Ökosystem durch die enge Kooperation mit der Wissenschaft. Das **Wasserstofflabor der Hochschule RheinMain am Campus Rüsselsheim** bietet eine gute Grundlage für anwendungsorientierte Forschung, die Ausbildung von Fachkräften und den Technologietransfer zwischen Wissenschaft und Industrie. **Bereits ansässige Start-ups mit Bezug zur Wasserstoffwirtschaft** - wie z.B. das mehrfach ausgezeichnete Start Up Archigas - stärken den Standort zusätzlich und können durch ein wachsendes Cluster weiter gefördert werden.

Ergänzend zur Wasserstoffproduktion analysiert die Studie das Potenzial für die Errichtung einer öffentlichen Wasserstofftankstelle (HRS), die der entscheidende Baustein für die Anwendung von Wasserstoff im Verkehrssektor wäre. Die Standortanalyse identifizierte mehrere geeignete Flächen im gesamten Stadtgebiet. **Besonders aussichtsreich sind Standorte entlang der Hauptverkehrsadern wie der Mainzer Straße und der B43, die eine ideale Anbindung für den Schwerlast- und Logistikverkehr bieten.** Eine solche Tankstelle würde die lokale Wasserstofferzeugung optimal ergänzen, die Dekarbonisierung der Mobilität vorantreiben und als sichtbarer Impulsgeber für die regionale Energiewende fungieren.

Die Etablierung einer Wasserstoffwirtschaft verspricht wirtschaftliche und gesellschaftliche Impulse. Sie schafft nicht nur direkte Arbeitsplätze in Bau und Betrieb der Anlagen, sondern stimuliert durch Multiplikatoreffekte die gesamte regionale Wirtschaft. Dies bietet eine Chance zur Diversifizierung der lokalen Wirtschaftsstruktur und zur Kompensation von Arbeitsplatzverlusten im Zuge der Transformation der Automobilindustrie. Die Studie empfiehlt die

Schaffung eines Wasserstoff-Kompetenzzentrums, um Innovationen zu fördern und Synergien, beispielsweise mit der wachsenden Anzahl an Rechenzentren im Rhein-Main-Gebiet, zu heben.

Es wird ein schrittweiser Einstieg mit einer Elektrolyseanlage moderater Leistung (5-20 MW) empfohlen, um einen Kristallisationspunkt zu schaffen. Das Potenzial zum Leistungswachstum korreliert mit der Verfügbarkeit von (erneuerbarem Überschuss-)Strom. Zentral sind die frühzeitige Koordination mit Netzbetreibern zur Sicherung der Stromversorgung, die Entwicklung eines integrierten Energie- und Wärmekonzepts sowie die strategische Verankerung der Wasserstoffwirtschaft in der Stadtentwicklungs- und Bauleitplanung. Zu Bedenken gilt es, dass der Bau eines Elektrolyseurs nur ein initiales Moment schaffen kann: Die schrittweise Etablierung einer Wasserstoffwirtschaft muss als Pfadentscheidung verstanden werden, die über Jahre immer weiter in die regionale Wertschöpfung eingeflochten werden muss, um ihre Potenziale entfalten zu können.

1. Einleitung

1.1. Ziel und Zweck der Studie

Ziel der Studie ist es, anhand einer Potenzialanalyse am Beispiel der versiegelten Industriefläche „Rüsselsheim West“ den Aufbau einer Wasserstoffproduktion sowie die Etablierung eines Wasserstoffclusters für die Stadt Rüsselsheim am Main, die Rhein-Main-Region und das Land Hessen zu untersuchen.

Die Studie soll eine erste Grundlage für Politik, Stadtentwicklung und potenzielle Investoren hinsichtlich des Aufbaus, Integration und Skalierung einer Wasserstoffwirtschaft in Rüsselsheim am Main liefern.

Darüber hinaus verfolgt das Land Hessen mit der Studie das Ziel, eine übertragbare Blaupause für die Reaktivierung derzeit nicht genutzter Industrieflächen zu schaffen. Am Beispiel von „Rüsselsheim West“ soll gezeigt werden, wie durch Industriekonversion neue technologische Wertschöpfung – insbesondere im Bereich der Wasserstoffwirtschaft – ermöglicht werden kann. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen anderen Städten und Gemeinden als Orientierung dienen, um vergleichbare Transformationsprozesse anzustoßen und umzusetzen.

Die Erstellung der Studie wurde durch die finanzielle Unterstützung des Landes Hessen über die Landesstelle Wasserstoff der LEA LandesEnergieAgentur Hessen GmbH ermöglicht.

1.2. Bedeutung der Wasserstofftechnologie

Die Dekarbonisierung der Energieversorgung ist eine der größten Herausforderungen unserer Zeit. Deutschland hat sich das Ziel gesetzt, bis 2045 die Emission von Treibhausgasen (THG) auf Nettonull zu senken. Hierfür muss es seinen Energiebedarf aus THG-neutralen Quellen decken. Dabei spielt Wasserstoff, als sauberer und vielseitiger Energieträger, eine entscheidende Rolle. Zur Steigerung des Potenzials von Wasserstoff und zur Förderung einer sicheren, bezahlbaren und umweltverträglichen Energieversorgung hat die Bundesregierung 2020 die Nationale Wasserstoffstrategie (NWS) verabschiedet und 2023 mit einer Fortschreibung auf aktuelle Entwicklungen angepasst. Diese stellt den Rahmen für die zukünftige Entwicklung von Wasserstofftechnologien in Deutschland dar. Sie legt den Fokus der verschiedenen Handlungsfelder auf die Etablierung von Wasserstoff als Schlüsseltechnologie der Energiewende, die Schaffung von regulatorischen Voraussetzungen für den Markthochlauf der Wasserstofftechnologien, eine Stärkung der internationalen Konkurrenzfähigkeit und des Exports sowie die Versorgung mit grünem Wasserstoff. Dies setzt jedoch neben dem Aufbau einer nationalen Erzeugungsstruktur für Elektrolyseure, Brennstoffzellen und Wasserstoff auch die Etablierung einer deutschen Wasserstoffinfrastruktur voraus. Auf Landesebene werden durch die Hessische Wasserstoffstrategie wichtige Rahmenbedingungen für den Aufbau einer sektorübergreifenden Wasserstoffwirtschaft geschaffen, mit dem Ziel die sektorübergreifende Verfügbarkeit von Wasserstoff bereits ab 2030 zu gewährleisten. (1)

1.3. Kontext: Rüsselsheim am Main als Standort für Ansiedlung

In Rüsselsheim am Main steht der gesamte Bereich „Rüsselsheim West“ vor einer umfassenden Neuordnung, da sich die hier ansässige Automobilproduktion künftig auf einem kompakteren Werksstandort zwischen der Mainzer Straße und der Bahnstrecke konzentrieren wird. Im Westen des Stadtgebiets von Rüsselsheim am Main stehen somit auf dem ehemaligen

Stellantis/Opel-Betriebs- und Produktionsgelände künftig Flächen in einer Größe von insgesamt rund 120 ha für eine Neuentwicklung zur Verfügung (siehe Abbildung 1-1).

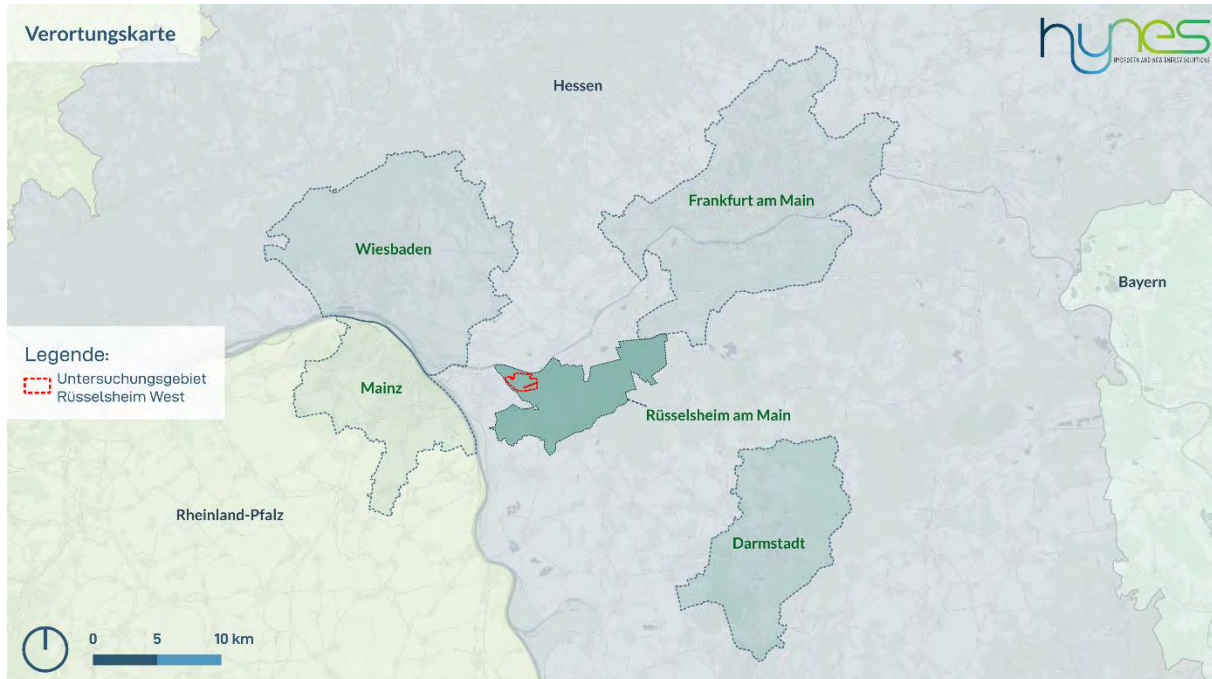


Abbildung 1-1: Verortungskarte - Lage Rüsselsheim am Main (eigene Darstellung)

Für die rund 120 ha freiwerdenden Industrieflächen „Rüsselsheim West“ bietet sich die Chance, eine Transformation bislang abgeschotteter Areale hin zu nutzungsgemischten, kleinteiligen Quartieren im Sinne nachhaltiger Stadtentwicklung anzustoßen. Die Stadt Rüsselsheim am Main hat im Jahre 2021 in Kooperation mit der damaligen Flächeneigentümerin Stellantis/Opel das „Rahmenkonzept Rüsselsheim West“ sowie eine „Zielgruppenanalyse Rüsselsheim“ erarbeiten lassen, um die Nutzbarkeit der freiwerdenden Flächen einzuschätzen und im Rahmen der Flächenentwicklung Positiveffekte für das Stadtgebiet sichern zu können. Im Jahr 2022 wurden erste Vorschläge zur baulichen Nutzung der künftig freigesetzten Flächen in Form eines in Varianten ausgearbeiteten „Städtebaulichen Zielkonzepts“ erarbeitet, das im März 2023 durch die Stadtverordnetenversammlung der Stadt Rüsselsheim am Main zur Kenntnis genommen und als Grundlage für die weiteren Planungen beschlossen wurde. (2)

Die Fläche kann grundsätzlich als geeignet für eine wasserstoffbezogene Nachnutzung betrachtet werden (näheres siehe Kapitel 3), sofern die Rahmenbedingungen im Zuge der weiteren Entwicklung konkretisiert und zwischen allen Beteiligten abgestimmt werden. Der Standort verbindet Flächenverfügbarkeit, infrastrukturelle Anbindung und Möglichkeiten der Skalierbarkeit, was zentrale Voraussetzungen für den erfolgreichen Aufbau eines Wasserstoffökosystems sind. Die Untersuchung liefert hierzu eine erste Einschätzung und stellt die planerischen und technischen Grundlagen für eine vertiefte Standortentwicklung bereit.

Die Lage im Rhein-Main-Gebiet bietet grundsätzlich gute verkehrliche Anbindung an das intra- und interregionale Straßen-, Schiene- und Wasserstraßennetz. Perspektivisch könnte eine Integration in das geplante Wasserstoff-Kernnetz erfolgen, was für den mittel- bis langfristigen Aufbau eines Wasserstoffökosystems relevant sein kann. Der Standort liegt in relativer Nähe zu potenziellen Abnehmern, darunter Unternehmen aus dem Bereich Logistik, Industrie und Luftverkehr. Auch die Möglichkeiten einer Anbindung für künftige Rechenzentrumsprojekte und die Nutzung bestehender Kraftwerksstandorte werden betrachtet.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung ist zu bewerten, ob ein Teil der Flächen „Rüsselsheim West“ die technischen, genehmigungsrechtlichen und infrastrukturellen Voraussetzungen für eine Wasserstoffproduktion mittels Elektrolyse erfüllen. Dabei sind unter anderem Netzanschlusskapazitäten, Wasserverfügbarkeit, Flächenzuschnitte, emissionsrechtliche Anforderungen sowie Fragen des Denkmalschutzes und möglicher Altlasten zu berücksichtigen. Zu den Einschränkungen zählen mengenabhängige Genehmigungsfähigkeit, der Denkmalschutz im Bereich des historischen Gebäudebestands sowie Limitierungen des Stromnetzanschlusses.

Ausgangslage:

- 120 Hektar freiwerdenden Flächen des ehemaligen Stellantis/Opel-Geländes („Rüsselsheim West“)
- Revitalisierung und Umnutzung dieser Flächen, die unter dem Zielkonzept „Rüsselsheim West“ künftig entwickelt werden, bieten enormes Potenzial für die gesamte Region
- Querschnittstechnologie Wasserstoff als Wachstums- und Wirtschaftsfaktor für Rüsselsheim am Main identifiziert



Abbildung 1-2: Übersichtskarte Untersuchungsgebiet "Rüsselsheim West" (eigene Darstellung)

1.4. Methodik der Untersuchung

Die Inhalte der Studie wurden anhand nachfolgender Arbeitspakete (AP) erarbeitet.

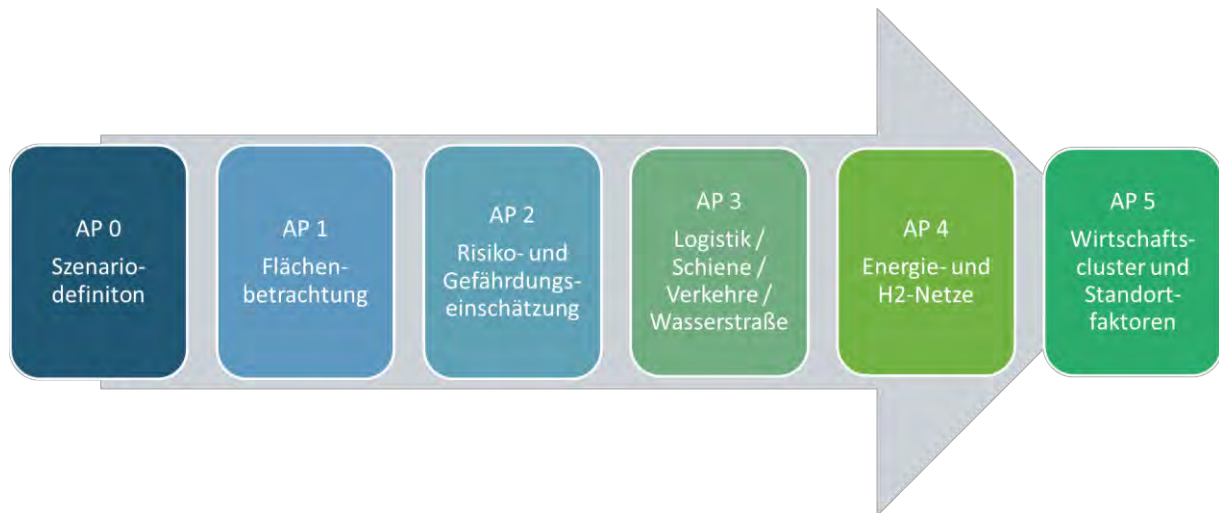


Abbildung 1-3: Arbeitspakete als Studienablaufschema (eigene Darstellung)

AP 0: Szenario Definition

Um die technischen, wirtschaftlichen und regulatorischen Unterschiede einer zunehmenden Anlagenleistung aufzuzeigen, wurden drei Referenzszenarien definiert und mit dem Auftraggeber abgestimmt. Es wurde eine Staffelung anhand der Anlagenleistung von 10 MW, 50 MW und 200 MW festgelegt. Zusätzlich erfolgte eine Orientierung anhand eines Elektrolyse-Projektbenchmarks.

AP 1: Flächenbetrachtung

Ziel dieses APs war die Analyse der potenziell zur Verfügung stehenden Flächen in „Rüsselsheim West“ und Prüfung der Verträglichkeit mit Denkmalschutz und Altlasten. Darüber hinaus galt es, eine fundierte Basis für die Standortentscheidung zu schaffen, um potenzielle Risiken und Chancen frühzeitig zu identifizieren.

Dafür wurde ein Fragen- und Datenkatalog mit der Stadt Rüsselsheim am Main zirkuliert, um notwendige und hinreichende Daten(-verfügbarkeit) abzufragen und zur Verfügung gestellt zu bekommen. Zentrale Informationen zu Infrastrukturverläufen, Kapazitäten, dem Gebäudebestand und Altlasten standen aufgrund datenschutzrechtlicher und vertraulicher Inhalte nicht für eine Weitergabe zur Verfügung. Anhand der Grundlagenermittlung zur Flächenbetrachtung der Opel-Flächen wurden Daten von relevanten Stakeholdern abgefragt, gesichtet und soweit möglich bewertet. Im Rahmen der Verträglichkeitsprüfung mit vorhandener Gebäudestruktur wurden Unterlagen und Auflagen zum Gebäudebestand sowie Altlasten abgefragt und sofern vorhanden bewertet.

AP 2: Risiko- und Gefährdungseinschätzung

Zur Risiko- und Gefährdungseinschätzung der in AP 0 definierten Szenarien auf den Opel-Flächen in Rüsselsheim am Main wurde eine räumliche Potenzialanalyse zur grundlegenden Machbarkeit, gefolgt von einer Risikoanalyse auf ausgewählten Teilflächen durchgeführt. Hierfür wurden genehmigungsrechtliche Leitfäden zu Wasserstoffgroßprojekten recherchiert und tabellarisch aufbereitet. Anschließend erfolgten eine qualitative Beschreibung und Quantifizierung möglicher nachteiliger Emissionen der Projektaktivitäten sowie Abgleich der Wasserstoffprojektaktivitäten mit Restriktionen aus dem Genehmigungsrecht.

AP 3: Logistik / Schiene / Verkehr / Wasserstraße

In einem qualitativ-quantitativen Ansatz wurden die verkehrlichen Mehrbelastungen in Abhängigkeit der definierten Varianten ermittelt und bewertet. Betrachtet wurden Lieferverkehre nach Szenariodefinition am Projektstandort. In einer Nutzwertanalyse wurden tangible und intangible Mehrwerte einer Wasserstoffbetankung für den Straßen- und Schienenverkehr in Rüsselsheim am Main grundlegend erarbeitet und bewertet. Analog zu den upstream Wasserstoffaktivitäten wurden logistisch geeignete Standorte für Wasserstofftankstellen im Projektumfeld identifiziert und bewertet. Den Abschluss bildete eine qualitative Einordnung der Wasserstoffbetankung in die nationale Nachhaltigkeitszielsetzung.

AP 4: Energie & Wasserstoffnetze

In diesem AP erfolgte die digitale Aufbereitung der recherchierten Informationen zur Infrastruktur, Kapazitäten und sonstigen relevanten Daten der Medien Strom, Gas, Wärme und Wasser. Die Daten wurden mit den Kernnetzverläufen und den möglichen Verläufen des Wasserstoffnetz Rhein-Main in einem GIS-Layer verschnitten und infrastrukturelle Ausbaubedarfe in Abhängigkeit der drei Szenarien abgeleitet. Zur Identifizierung von Synergiepotenzialen, wurden öffentlich zugängliche Informationen zur Kraftwerksstrategie im Kontext der Projektaktivitäten ausgewertet. Im Rahmen einer Potenzialanalyse wurde die Elektrolyseabwärme quantifiziert sowie technische Lösungen zur Verwendung von Sauerstoff (O₂) aufbereitet.

AP 5: Wirtschaftskluster und Standortfaktoren

Zur Bewertung des wirtschaftlichen Potenzials wurden in diesem AP aktuelle Wasserstoffaktivitäten in einem Umkreis von 25 km recherchiert, in Steckbriefen aufbereitet und nach Möglichkeit quantifiziert. Darauf aufbauend wurde eine Stakeholderanalyse mit Fokus auf Nutzende von H₂ aus Industrie und Verkehr durchgeführt.

In einem abschließenden Kurzkonzept wurden die Grundlagen für ein Wasserstoffkompetenzzentrum inklusive Multiplikatoreneffekte formuliert, Ziele, Zielgruppen und Dienstleistungen definiert.

1.5. Studienaufbau

In Kapitel 2 werden zunächst die wesentlichen Grundlagen der Wasserstoffwirtschaft im Kontext des Vorhabens erläutert. Dabei wird die Wertschöpfungskette von der Erzeugung, der Aufbereitung, dem Transport sowie abschließend in unterschiedlichen Anwendungen beleuchtet.

Kapitel 3 führt in die unterschiedlichen Szenarien ein und liefert erste Ergebnisse zur Wasserstoffproduktion, der Menge an Nebenprodukten Wärme und Sauerstoff sowie einer Quantifizierung notwendiger Transportoptionen. Im Rahmen der Standortanalyse für Elektrolyseure erfolgt die Bewertung der jeweiligen Standortpotenziale anhand eines GIS-gestützten Scoringmodells. Im Unterkapitel Regionale und lokale Energieversorgung wird die umliegende Bestandsinfrastruktur für Strom und Gas qualitativ beschrieben und soweit möglich quantifiziert. Daraufaufgehend werden die Ergebnisse der Interviews mit Anlagen- und Infrastrukturbetreibern ausgewertet und ein kritisches Fazit gezogen. Daraufaufgehend wird der wesentliche rechtliche und regulatorische Rahmen für das Vorhaben beleuchtet. Der Fokus liegt auf genehmigungsrechtlichen Anforderungen an Wasserstoffherzeugungsanlagen und Speicher.

Nach einer Quantifizierung der Emissionsmehrbelastung (THG und Lärm) des Wasserstofftrailer-Lieferverkehrs erfolgt die Standortanalyse für Wasserstofftankstellen, für

die ein analoges Flächenpotenzial für die gesamte Gemarkung der Stadt Rüsselsheim am Main analysiert wird. Den Abschluss bildet eine qualitative Einordnung aktueller Wasserstoffaktivitäten im Schienenpersonen- und Schienengüterverkehr.

Kapitel 4 dient der Quantifizierung der potenziellen Wasserstoffabnahme in unterschiedlichen Sektoren. Es erfolgt eine abgestufte Betrachtung des gesamten hessischen Wasserstoffbedarfs in unterschiedlichen Sektoren bis hin zum regionalen und lokalen Bedarf. Ergebnis ist eine tabellarische und graphische Darstellung vergangener und bestehender Wasserstoffaktivitäten als Ausgangspunkt für mögliche bilaterale Vereinbarungen.

Kapitel 5 beleuchtet mögliche positive Effekte des Gesamtvorhabens auf die Sustainable Development Goals (SDG) der Vereinten Nationen.

Kapitel 6 ordnet zunächst die Chancen und Risiken von Wasserstoffökosystemen ein, um darauffolgend Synergiepotenziale mit bestehenden Aktivitäten zu identifizieren.

Kapitel 7 greift wirtschaftliche (Arbeitsplätze) und gesellschaftliche (Beteiligung) Effekte von Wasserstoffvorhaben auf. Den Abschluss bildet ein Kurzkonzept als Grundlage für ein Wasserstoffkompetenzzentrum inklusive Multiplikatoreneffekte.

2. Grundlagen der Wasserstofftechnologie

2.1. Wasserstofferzeugung

Die gängigsten Verfahren zur Wasserstofferzeugung sind die Dampfreformierung fossiler Energieträger sowie die Elektrolyse von Wasser. Für den Einsatz in einer dekarbonisierten Energieinfrastruktur wird zunehmend auf Elektrolyseverfahren gesetzt, bei denen Wasser durch Strom in Sauerstoff und Wasserstoff zerlegt wird. Die Umweltbilanz hängt dabei maßgeblich von der Herkunft des eingesetzten Stroms ab. Um die Erzeugungsart des Wasserstoffs und damit seinen Beitrag zum Klimaschutz und der CO₂-Reduktion genauer bestimmen zu können, wird Wasserstoff in Farbklassen eingeteilt. Dabei bezieht sich die Farbe nur auf die Art der Erzeugung, nicht auf unterschiedliche Qualitäten oder chemische Eigenschaften des daraus entstehenden Produktes Wasserstoff.

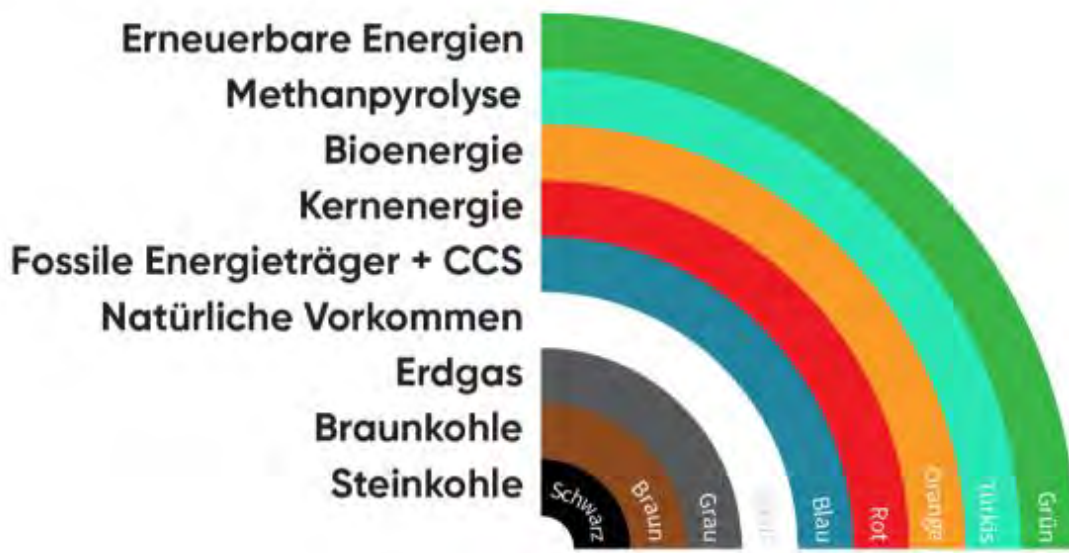


Abbildung 2-1: Übersicht: Wasserstoff-Farbenlehre¹ (3)

2.1.1. Wasserstoffproduktion: Überblick über Technologien

Das derzeit gängigste Produktionsverfahren in Deutschland ist die Erdgasdampfreformierung, bei der mit Wasser und Wärme Erdgas in Wasserstoff und Kohlendioxid umgewandelt wird. Das Herstellungsverfahren ist seit vielen Jahren großtechnisch industriell erprobt und angewandt und stellt die günstigste großtechnische Produktionsweise von Wasserstoff dar. Bei diesem Prozess werden pro erzeugtem Kilogramm Wasserstoff etwa 10 Kilogramm Kohlendioxid erzeugt.

Daneben kann Wasserstoff auch mithilfe von Strom und Wasser hergestellt werden. Hierbei werden der Wasserstoff und der Sauerstoff des Wassers auf atomarer Ebene getrennt, um so die jeweiligen Elemente isoliert zu erhalten. Wasserstoff wird je nach Herstellungsverfahren farblich kategorisiert.

¹ CCS: Carbon Capture and Storage; CCU: Carbon Capture and Utilization

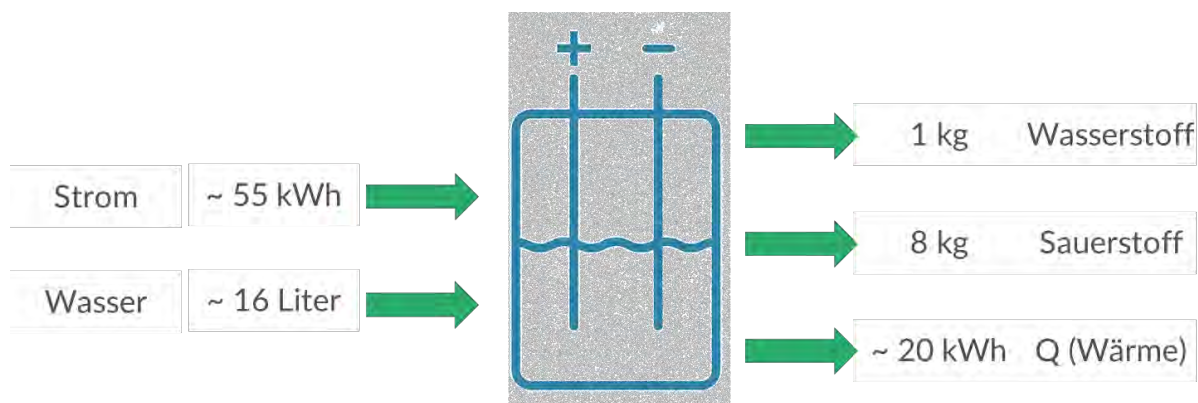


Abbildung 2-2: Wirkschema Elektrolyse (AEL/PEMEL)

Für die Elektrolyse zur Herstellung von 1 kg Wasserstoff werden ca. 55 kWh elektrische Energie und ca. 16 Liter Wasser benötigt. Dabei entstehen zusätzlich etwa 8 kg Sauerstoff sowie rund 20 kWh Wärme. Der Energiegehalt des erzeugten Wasserstoffs beträgt ca. 33 kWh.

2.1.2. Funktionsweise und Prozess der Elektrolyse

Die meistverwendeten Technologien bei der Wasserelektrolyse sind alkalische Elektrolyseure (AEL), Protonen-Austausch-Membran-Elektrolyseure (PEMEL) und Festoxid-(Hochtemperatur-)Elektrolyseure (SOEL). Während die AEL schon seit Jahrzehnten insbesondere in der Industrie Anwendung findet, sind PEMEL erst seit einigen Jahren technisch ausgereift am Markt verfügbar und SOEL an der Schwelle aus der Forschung in die industrielle Anwendung. Letztere sind aufgrund des hohen Wärmebedarfs und der geringen Flexibilität im Betrieb nur eingeschränkt für die Kopplung mit volatilen Erneuerbaren Energien geeignet. (4)

In der folgenden Tabelle sind die wesentlichen technischen Kenngrößen der aktuell relevanten Elektrolyseverfahren zusammengefasst. Die Angaben basieren auf Herstellerinformationen und Erfahrungswerten aus vergleichbaren Projekten. Für die Planung in Rüsselsheim am Main werden insbesondere AEL- und PEMEL-Systeme betrachtet, da die SOEL eine vergleichsweise niedrigere technische Reife aufweist. (4)

Technologie	Alkalische Elektrolyse (AEL)	Polymerelektrolytmembran-elektrolyse (PEMEL)	Festoxidelektrolyse (SOEL)
Elektrolyt	Kalilauge (wässrig)	Polymer (fest)	Keramik (fest)
Betriebstemperatur	30 – 90 °C	20 – 100 °C	700 – 1000 °C
Katalysatoren	Nickel, Metalloxide	Platin, Iridiumoxid	Nickel, Metalloxide
Betriebsstunden	20.000 – 90.000 h	20.000 – 90.000 h	< 10.000 h
Wirkungsgrad ²	60 – 70 %	55 – 70 %	70 – 80 %

Tabelle 2-1: verschiedenen Typen der Elektrolysetechnologien und deren Spezifikationen (5), (4)

Wie Tabelle 2-1 die verschiedenen Typen der Elektrolysetechnologien und deren Spezifikationen zeigt, unterscheiden sich die Wirkungsgrade der verschiedenen Elektrolyse-Technologien teils deutlich. Bei AEL und PEMEL wird erwartet, dass sich deren Wirkungsgrade mit der Weiterentwicklung der Technologien zunehmend annähern. SOEL erreichen derzeit die

² Je nach Quelle erfolgt die Angabe auf Basis des unteren Heizwerts (LHV = 33,3 kWh/kg H₂) oder des oberen Brennwertes (HHV = 39,41 kWh/kg H₂) von Wasserstoff.

höchsten elektrischen Wirkungsgrade, da ein Teil der benötigten Energie durch die Zufuhr von Hochtemperatur-Wasserdampf bereitgestellt wird. Zur Orientierung kann für einen Wirkungsgrad von 61 % (LHV)/72 % (HHV) des Elektrolyseurs mit einem Stromverbrauch von 55 kWh/kg H₂ gerechnet werden (4).

Die nachfolgende Tabelle gibt einen exemplarischen Überblick über Elektrolysehersteller der jeweiligen Technologien.

AEL	PEMEL	SOEL
ASAHI KASEI Europe (JP/DE)	Siemens (DE)	Sunfire (DE)
IHT (CH), heute Sunfire (DE)	AREVA H2Gen (FR)	Toshiba Energy Systems & Solutions Corp. (JP)
ELB (DE)	ITM Power (UK)	OxEon Energy (US)
NEL (DK/NO)	Giner (US)	Haldor Topsoe (DK)
ErreDue (IT)	H-TEC Systems (DE)	
HydrogenPro (DK)	Fronius (AT)	
IAV / Karlsruhe HT (DE)	NEL (DK/NO)	
McPhy (FR/DE)	Hydrogenics (CAN/BE)	
Hydrogenics (CAD/BE)	FEST GmbH (DE)	
thyssenkrupp Uhde (DE)		
PERIC (CN)		

Tabelle 2-2 Elektrolysehersteller, Marktrecherche aus 2024 (6)

Da die alkalische Elektrolyse derzeit als am weitesten ausgereifte Technologie gilt und im Gegensatz zur PEMEL keine teuren Edelmetallkatalysatoren wie Platin oder Iridium benötigt, weist sie aktuell die niedrigsten Investitionskosten auf. Die PEMEL bietet hingegen Vorteile hinsichtlich kompakter Bauweise und einer höheren Betriebsflexibilität. Die Hochtemperatur-Elektrolyse befindet sich bislang noch im Pilotstadium, was mit schwer vorhersehbaren Kosten einhergeht. Für das Jahr 2030 wird jedoch mit signifikanten Kostensenkungen gerechnet, sodass sich die Preisdifferenz zwischen AEL und PEMEL verringern dürfte. Langfristig, bis etwa 2050, wird erwartet, dass sich die Investitionskosten der verschiedenen Technologien angleichen und im Bereich von etwa 500 - 600 €/kW liegen (7).

2.2. Aufbereitung

Wasserstoff kann durch unterschiedliche Verfahren gasförmig, flüssig oder fest gespeichert und transportiert werden.

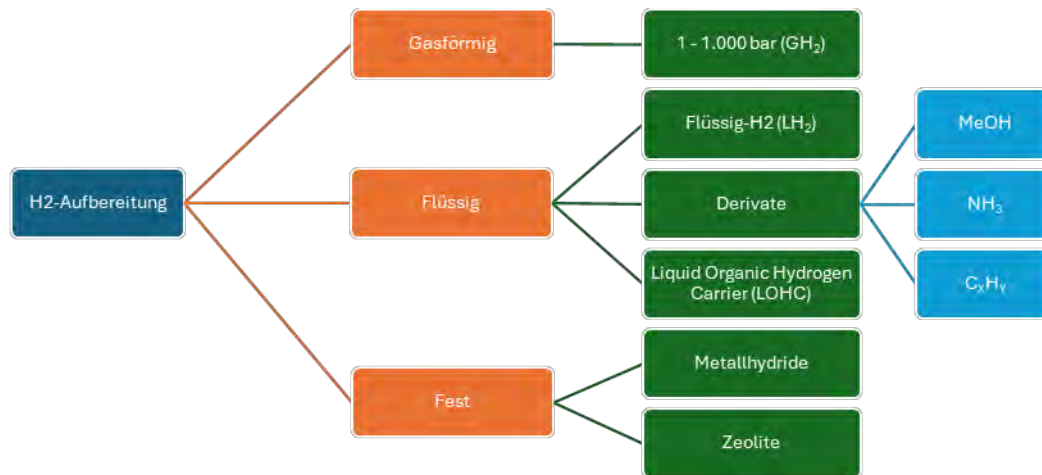


Abbildung 2-3: Fließschema der Prozesse zur Wasserstoffaufbereitung

Je nach Temperatur und Druckbereich ergeben sich unterschiedliche Aggregatzustände mit verschiedenen Wasserstoffdichten. Bei einer Temperatur von 0 °C liegt Wasserstoff gasförmig vor und weist eine Dichte von 0,089886 kg/m³ auf. Das Kühlen des Wasserstoffs auf -253 °C führt zur Verflüssigung, was mit einem Anstieg der Dichte auf 70,8 kg/m³ einhergeht. (8)

Verdichtung: Zur Kompression von Wasserstoff stehen grundsätzlich drei Verdichtersysteme zur Verfügung. Kolbenkompressoren weisen eine hohe Druckerhöhung, jedoch eine eingeschränkte Dynamik auf. Eine ebenfalls hohe Druckerhöhung weisen Membrankompressoren auf. Ihr Nachteil liegt allerdings in einem geringen Wirkungsgrad und einer begrenzten Förderrate. Ionische Verdichter komprimieren Gase durch Auf- und Abbewegen einer ionischen Flüssigkeitssäule. Ionische Salze weisen keinen Dampfdruck auf, weshalb sie sich nicht mit Umgebungsmedien vermischen.

Verflüssigung: Um Wasserstoff zu verflüssigen, wird das Gas in mehreren Prozessschritten abgekühlt. Das Funktionsprinzip ähnelt dem eines Kühlschranks. Das Gas wird dabei mehrmals verdichtet, abgekühlt und wieder expandiert. Jedes weitere Mal wird der Wasserstoff ein Stück weiter abgekühlt. Erreicht das Gas die Siedetemperatur von -253 °C und wird expandiert, kondensiert ein Teil davon als flüssiger Wasserstoff und wird in einem separaten Behälter gesammelt. Der gasförmige Rest wird in den Kreislauf zurückgeführt. (9)

Gasförmige Speicherung: Derzeitige Druckwasserstoffspeicher bestehen aus Stahl und/oder Kompositwerkstoffen und sind von zylindrischer Form. Das gilt für Nieder- wie auch Hochdruckspeicher. Aufsteigend von Typ I bis Typ-IV Tanks sinkt das Systemgewicht und der Betriebsdruck steigt, während sich die Komplexität der Fertigung und damit die spezifischen Kosten erhöhen. Bei Typ-I-Behältern handelt es sich um (Industrie-)Gasflaschen, die aus Stahl bestehen und somit ein sehr hohes Gewicht, aber gleichzeitig eine hohe Sicherheit und Festigkeit aufweisen. Die Drücke variieren zwischen 200 und 300 bar. Für Typ-II-Behälter wird der zylindrische Teil mittels gewickelten Kohlefasern verstärkt. Dadurch besitzen sie ein geringeres Systemgewicht. Typ-III- sowie Typ-IV-Behälter sind vollständig mit einem hochfesten Faserverbundwerkstoff umhüllt, unterscheiden sich aber in Bezug auf das verwendete Material. Typ-III-Behältern liegt ein metallischer Liner (Absperrschicht zur Permeationsvermeidung) zugrunde, während Typ IV-Tanks einen Kunststoffliner verwenden. Gegenüber herkömmlichen Stahlbehältern wird durch Typ IV eine Gewichtsreduzierung von knapp 70 % ermöglicht.

Flüssige Speicherung: Eine gesteigerte Speicherdichte mit erheblich reduziertem Druck ermöglicht die Speicherung von verflüssigtem Wasserstoff bei -253 °C. Eine der Herausforderungen ist das langsame Verdampfen des Inhalts durch äußere Wärmeeinflüsse und einem

damit verbundenen Druckanstieg. Zum sogenannten Boil-off kommt es, wenn über einen längeren Zeitraum keine Entnahme erfolgt. Zu einer Verzögerung dieses Effekts werden vakuumisolierte Behälter, eine komplexe aktive Kühlung oder eine Kombination von Flüssig- sowie Druckgasspeichern eingesetzt. (8)

Wasserstoffträger und Derivate: Wasserstoff kann auch mit Hilfe von unterschiedlichen Wasserstoffträgern gespeichert werden. Dies können feste oder flüssige Substanzen sein, an denen große Wasserstoffmengen an- bzw. eingelagert werden können. Neben der volumetrischen und gravimetrischen Speicherdichte unterscheiden sie sich in ihren technischen Betriebsbedingungen (Druck, Temperatur) z.T. sehr stark. Darüber hinaus spielen Aspekte der Zyklenfestigkeit, der Brennbarkeit, Umweltverträglichkeit und Toxizität hierbei eine wesentliche Rolle. Im aktuellen Fokus stehen die Wasserstoffträger Ammoniak (NH_3), Methanol (CH_3OH) und organische Materialien – die sogenannten LOHCs (Liquid Organic Hydrogen Carriers).

Die Entwicklung und Umsetzung von passenden Transportsystemen für Wasserstoff ist ein wichtiger Schritt zum Gelingen einer erfolgreichen Wasserstoffwirtschaft. Der Transport von Wasserstoff ist aufgrund der spezifischen chemisch-physikalischen Eigenschaften mit besonderen Anforderungen an das Handling verbunden. Es stehen heute schon eine Reihe geeigneter Transportoptionen zur Auswahl. Die Wahl, der am besten geeigneten Transportvariante hängt von einer Anzahl an Variablen ab, die sich aus den Vorgaben des jeweiligen Projekts ergeben.

2.3. Transport und Verteilung

Für die Planung wasserstoffbasierter Infrastrukturen ist eine Bewertung der jeweiligen Transportoptionen erforderlich. Druckgastransporte über Trailer bieten hohe Flexibilität und vergleichsweise niedrige Investitionskosten, sind jedoch in ihrer Kapazität begrenzt. Flüssigwasserstofftransporte eignen sich vor allem für größere Distanzen bei moderatem Verbrauch, während leitungsgebundene Versorgung via Pipeline die höchsten Transportmengen ermöglicht, jedoch mit erheblichen Investitions- und Planungsvorläufen verbunden ist.

2.3.1. Straßentransport

Der Straßentransport stellt derzeit die flexibelste und am weitesten verbreitete Methode für die Verteilung von Wasserstoff dar. Dabei kommen unterschiedliche Trailertypen zum Einsatz, die sich sowohl hinsichtlich des Aggregatzustands des Wasserstoffs als auch in Bezug auf Druckstufen, Transportmengen und Anwendungsbereiche unterscheiden. (10)

Für gasförmigen Wasserstoff werden sogenannte CGH₂-Tube-Trailer und CGH₂-MEGC-Trailer genutzt. Erstere bestehen aus horizontal gelagerten Stahlflaschen, die in Bündeln montiert sind, und arbeiten typischerweise mit Druckstufen zwischen 200 und 300 bar. Die Transportmenge liegt in der Regel bei 400 bis 500 kg Wasserstoff. MEGC-Trailer (Multi-Element Gas Container) verwenden stattdessen zylinderförmige Kompositflaschen, die in vertikalen Bündeln angeordnet sind. Diese können mit höheren Druckstufen von bis zu 500 bar betrieben werden und ermöglichen Transportmengen von etwa 500 bis 1.100 kg.

Für größere Entfernungen oder größere Liefermengen kann Wasserstoff auch in flüssiger Form transportiert werden. Hierfür werden sogenannte LH₂-Trailer eingesetzt, die über vakuumisolierte kryogene Tanks verfügen. Diese arbeiten mit sehr niedrigen Drücken zwischen 1 und 4 bar und halten den Wasserstoff bei Temperaturen von etwa -253 °C. Flüssigwasserstofftransporte ermöglichen deutlich höhere Transportmengen von bis zu 3.500 kg pro Trailer, setzen jedoch eine aufwendigere Infrastruktur und ein höheres Maß an Kühl- und Sicherheitsmanagement voraus.

Die Entscheidung für einen geeigneten Trailertyp hängt von mehreren Faktoren ab, darunter dem Tagesbedarf an Wasserstoff, der Entfernung zum Verbrauchsort sowie der Frage, ob vor Ort eine weitere Aufbereitung oder Druckanpassung erfolgen muss. Grundsätzlich gilt: je höher die Druckstufe bzw., je tiefer die Temperatur, desto größer ist die transportierbare Menge – allerdings steigen damit auch die technischen Anforderungen, Energieverbräuche und Kosten.



Abbildung 2-4: Transporttrailer für Wasserstoff. Links: GH₂ Tube Trailer, Mitte: CGH₂-MEGC-Trailer, Rechts: LH₂-Trailer (5)

2.3.2. Leitungsgebundener Transport

Der geplante Ausbau der Produktionskapazitäten im Bereich grüner Wasserstoff macht Lösungen für die Speicherung und den Transport von Wasserstoff zwingend erforderlich. Die Gasnetzinfrastruktur hat hier das größte Potenzial in Deutschland. Grundlegend besteht die Gasnetzinfrastruktur aus folgenden Komponenten: Leitungen oder Leitungssysteme zur Optimierung des Gasbezuges und der Gasdarbietung, Verdichteranlagen, Gasexpansionsanlagen, Gasdruckregel- und Messanlagen.

Hinsichtlich des Transports mittels Pipeline sind generell drei Alternativen zu unterscheiden: Die Beimischung von Wasserstoff in eine Erdgasleitung, die Umnutzung von Erdgaspipelines oder der Zubau neuer Wasserstoffpipelines. Bei der Beimischung von Wasserstoff ins Gasnetz gilt es zu beachten, dass eine Anpassung von Verbrauchern beziehungsweise Endgeräten nötig ist und sich der Bedarf vermutlich eher an reinem Wasserstoff oder Erdgas orientieren wird.

Neben dem Bau eines dedizierten Wasserstoffnetzes ist die Umwidmung des bestehenden Gasnetzes Gegenstand intensiver Normungs- und Genehmigungsaktivitäten. Dabei geht es sowohl um die Eignung von Werkstoffen als auch um die Entwicklung geeigneter nationaler und internationaler Normen und Sicherheitsvorschriften.

Für industrielle Verbraucher, die einen Großteil ihres Energiebedarfs aus Erdgas beziehen, wie z.B. die Stahl- und Chemieindustrie, bietet der Anschluss an ein Wasserstoffkernnetz die Möglichkeit, fossile Brennstoffe durch nachhaltigen Wasserstoff zu substituieren. An Chemiestandorten, wie dem Industriepark Höchst werden bereits seit Jahrzehnten Wasserstoffpipelines betrieben.

Im europäischen Umfeld sind leitungsgebundene Pipelinetransporte die günstigste Transportoption großer Mengen Wasserstoff. Für eine marktwirtschaftliche Wasserstoffwirtschaft müssen überregionale Transporte in ein europäisches Wasserstoffnetz eingebunden werden. Dazu haben diverse europäische Fernleitungsnetzbetreiber ein zukünftiges Wasserstoffnetz unter der Berücksichtigung der bestehenden Erdgasnetze identifiziert („European Hydrogen Backbone (EHB)“). Das Netz umfasst eine Gesamtlänge von ca. 40.000 km und verbindet 19 EU-Mitgliedsstaaten sowie Großbritannien und die Schweiz. Das Konzept basiert überwiegend auf der vorhandenen europäischen Erdgasinfrastruktur und berücksichtigt dabei deren Umwidmung auf reine Wasserstoffnetze. Da diese Leitungen zum Großteil bereits bestehen, reduziert ihre Verwendung die Systemkosten, beschleunigt die Realisierung, vermeidet entsprechende Umwelteingriffe und erhöht somit die gesellschaftliche Akzeptanz. Zusätzlich wird das entstehende Wasserstofftransportsystem durch den Zubau von neuen Pipelines ergänzt. Dies ist vor allem dann von Nöten, wenn Erdgasleitungen aus Gründen der Versorgungssicherheit nicht zeitnah umgestellt werden können.

Angesichts der möglichen Umsetzung einer Wasserstoffinfrastruktur haben die Fernleitungsnetzbetreiber (FNB) im Jahr 2021 im Netzentwicklungsplan Gas für den Zeitraum 2020-2030 ein erstes umfassendes „visionäres Wasserstoffnetz“, den European Hydrogen Backbone (siehe Abbildung 2-5) veröffentlicht. Dieses basiert überwiegend auf der Nutzung vorhandener Erdgasinfrastruktur. Darüber hinaus wurde dieses Zukunftsbild für die Jahre 2030 und 2050 auf Basis eines detaillierten Netzplanes weiterentwickelt.

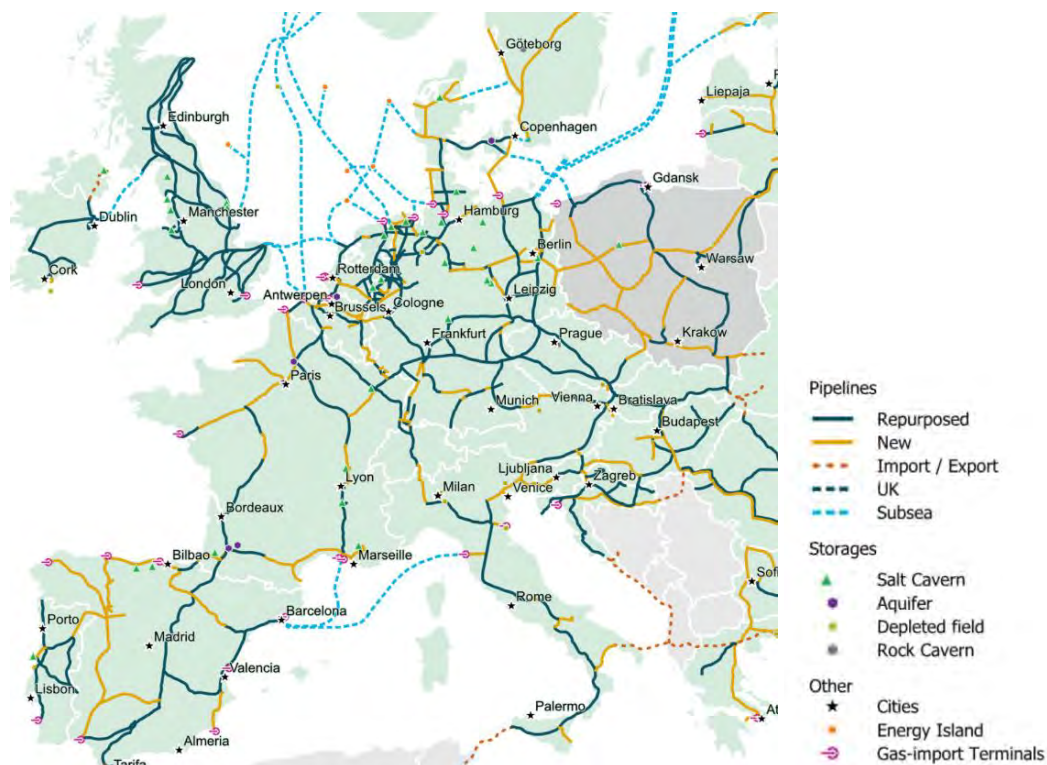


Abbildung 2-5: Verlauf des European Hydrogen Backbone

Ein bedeutender Schritt für den Aufbau eines umfassenden Wasserstofftransportsystems in Deutschland ist mit der Genehmigung des Wasserstoff-Kernnetzes erreicht. Die Bundesnetzagentur hat am 12. Oktober 2024 dem gemeinsamen Antrag der deutschen Fernleitungsnetzbetreiber (FNB) für das sogenannte Wasserstoffkernnetz zugestimmt. Diese Entscheidung bildet die Grundlage für die überregionale Verbindung zentraler Produktions- und Verbrauchsstandorte von Wasserstoff.

Das genehmigte Wasserstoff-Kernnetz soll das Rückgrat der künftigen Wasserstoffwirtschaft bilden. Es wird zentrale industrielle Zentren, Speichereinrichtungen, Kraftwerke sowie Importkorridore verbinden. Mit einer geplanten Gesamtlänge von etwa 9.040 km, davon 60 % umgewidmete Erdgasleitungen und 40 % neu zu errichtenden Leitungen, ermöglicht das Netz eine Einspeisekapazität von rund 101 GW und eine Ausspeisekapazität von 87 GW.

Die Differenz zwischen Einspeise- und Ausspeisekapazität ergibt sich unter anderem aus Speicherpuffern sowie strategischen Reserven zur Sicherstellung der Versorgungssicherheit. Darüber hinaus schafft die höhere Einspeisekapazität Flexibilität für zukünftige Erzeuger und erlaubt eine bedarfsorientierte Ausspeisung, wodurch das Netz wirtschaftlich effizient und modular ausgebaut werden kann. (11)

Die Investitionskosten werden auf rund 18,9 Milliarden Euro geschätzt. Der überwiegende Teil des Netzes soll bis 2032 realisiert werden.

Die Genehmigung markiert den Übergang von der Planungs- zur Umsetzungsphase und ist ein zentrales Element der deutschen Wasserstoffstrategie. Sie ermöglicht den planbaren Hochlauf einer nationalen und europäischen Wasserstoffwirtschaft und ist auch mit Blick auf die Energie- und Klimaziele von hoher strategischer Bedeutung.³



Abbildung 2-6: Die in Deutschland genehmigten (am 22.10.24) Wasserstofftransportleitungen des Wasserstoff-Kernnetzes 2032 (FNBGas)

³ Ein entscheidender Standortvorteil ist die Nähe zum geplanten Wasserstoff-Kernnetz, das westlich an Rüsselsheim am Main vorbeiführen soll und bis 2032 eine überregionale Anbindung an Produktions- und Verbrauchszentren sichert.

Neben den etablierten Transportformen Straße und Pipeline können unter bestimmten Rahmenbedingungen auch Güterverkehr auf der Schiene oder über Wasserstraßen eine Rolle spielen. Aufgrund hoher Anfangsinvestitionen und begrenzter Verfügbarkeit von geeigneter Infrastruktur spielen diese Optionen aktuell eine untergeordnete Rolle, sollten jedoch mittelfristig in multimodale Konzepte integriert werden, etwa im Rahmen logistischer Hubs.



Abbildung 2-7: Transportarten von Wasserstoff

2.4. Anwendung

Bei den Anwendungsmöglichkeiten von Wasserstoff wird grundsätzlich zwischen der stofflichen und der energetischen Nutzung unterschieden. Die stoffliche Nutzung umfasst alle Nutzungsformen, die Wasserstoff als Ausgangs- oder Hilfsstoff verwenden. Die Zugabe von Wasserstoff ermöglicht eine Weiterverarbeitung bzw. eine Veredelung anderer Stoffe. Hierbei handelt es sich meist um katalytisch oder thermodynamisch induzierte Prozesse. Die energetische Verwendung von Wasserstoff zielt auf die Konversion der chemisch gebundenen Energie in thermische oder elektrische Energie ab. Je nach Umwandlungstechnologie werden die Nutzenergien Licht, Wärme oder Kraft erzeugt. Beispielsweise erlaubt eine Brennstoffzelle, Wasserstoff in einem elektrochemischen Prozess kontrolliert mit Sauerstoff reagieren zu lassen, um die im Wasserstoff gespeicherte Energie in elektrische Energie umzuwandeln und diese z.B. für den Antrieb eines Elektrofahrzeugs oder zur stationären Energieversorgung zu nutzen.

2.4.1. Verkehr

Für „leichte“ Verkehrsmittel bis ca. 10 t und in speziellen Nutzungsformen auch bis zu 40 t gilt die Batterie als Energiespeicher als gesichert. Darüber hinaus muss der Verkehrssektor ganzheitlich betrachtet werden: für Straße, Schiene, Luft und Wasser sind systemische Lösungen zu erarbeiten. Fakt ist, dass die einzige nachhaltig auszugestaltende Möglichkeit eines vollständig dekarbonisierten Verkehrssektors durch grünen Wasserstoff und mit darauf basierenden synthetischen Kraftstoffen gewährleistet werden kann. (12)

In den meisten dezentralen Wasserstoffökosystemen erfolgt der Einsatz vorrangig im Mobilitätssektor, insbesondere für schwere Nutzfahrzeuge. Für den Aufbau wasserstoff-basierter Betankungsinfrastruktur eignen sich insbesondere Standorte mit planbaren Flotten-verkehren. Infrage kommen dabei Werksverkehre, kommunale Dienste oder ÖPNV-Depots. Perspektivisch kann auch die Nutzung der Güterschiene als logistische Ergänzung geprüft werden, sofern ausreichende Infrastruktur oder Entwicklungsperspektiven gegeben sind. Die

Versorgung erfolgt über regionale HRS-Infrastruktur (Hydrogen Refueling Stations), meist in Drehscheibenfunktion für spezifische Flotten. Darüber hinaus zeigt sich in Studien zur ÖPNV-Versorgung das Potenzial wasserstoffbetriebener Busse und Nahverkehrslösungen, insbesondere als Substitut für Dieserverkehr. Auch kommunale Fahrzeugflotten (z.B. Müllfahrzeuge) werden häufig als Einstiegsszenarien mit hoher Sichtbarkeit und planbarer Nachfrage identifiziert.

2.4.2. Energiewirtschaft

Für stationäre Anwendungen zur Versorgung mit Strom und Wärme eignen sich Brennstoffzellensysteme oder verbrennungskraftmaschinelle Konzepte als Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen (KWK-Anlagen). Anwendungsgebiete reichen von der dezentralen Stromerzeugung in netzfernen Gebieten bis hin zur gewerblichen Gebäudeenergieversorgung. Bei ausreichend hohen Abwärmeparametern kann über Absorptionskältemaschinen zusätzlich Kälte erzeugt werden.

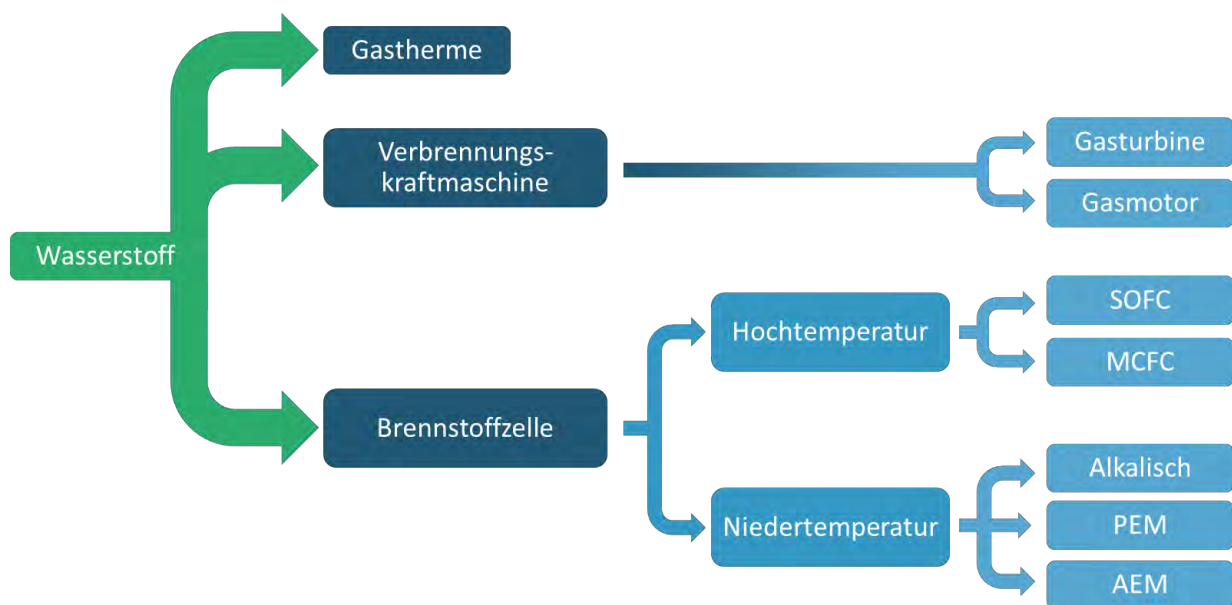


Abbildung 2-8: Energetische Nutzungspfade von Wasserstoff in stationären Anwendungen

2.4.3. Sektorübergreifende Anwendungen

Neben dem Verkehrssektor bieten sich auch Anwendungen im stationären Bereich, insbesondere in der chemischen Industrie in stofflicher und energetischer Funktion, sowie in der Energie- und Wärmeversorgung, als langfristige Senken für Wasserstoff an. Entscheidend ist die koordinierte Berücksichtigung von Infrastruktur, Netzanschlüssen und (potenziellen) Nutzern. Für eine wirtschaftlich tragfähige Entwicklung der Wasserstoffwirtschaft ist die parallele Entwicklung mehrerer Nachfrageachsen (Verkehr, Wärme und Industrie) zielführend. Projekte mit sektorübergreifender Kopplung gelten daher als besonders robust gegenüber Marktschwankungen.

Die Nutzung von Wasserstoff zur Flexibilisierung der Stromversorgung in H₂-ready-Gaskraftwerken wird zunehmend diskutiert. In Rüsselsheim am Main ist mit dem KEO⁴-Kraftwerk eine potenzielle Bestandsinfrastruktur vorhanden, die perspektivisch auf den Einsatz von grünem Wasserstoff umgestellt werden könnte. Die Einbindung in die kommunale Wärmeplanung, durch die Einspeisung von Elektrolyseabwärme in Nah- oder Fernwärmesysteme, ist ein

⁴ Konsortium Energieversorgung Opel

weiteres zu prüfendes Potenzialfeld (dazu Kapitel 6.1.2), ebenso wie der Einsatz als Vorwärmstufe für Prozesswärme.

Neben der reinen Wasserstoffproduktion können Elektrolyseure, abhängig vom Betriebsmodus, auch stromnetzdienliche Funktionen übernehmen. Dazu zählen kurzfristige Lastanpassung, Systemstützung bei Einspeisung volatiler Erneuerbarer Energien sowie die Möglichkeit zur Einbindung in Demand-Side-Management-Konzepte. Diese Aspekte können im Rahmen der Netzverträglichkeitsprüfung weiter vertieft werden. In Studien wurde zudem hervorgehoben, dass flexible Betriebsmodelle beispielsweise im Zusammenspiel mit Strombörsen und Netzengpassmanagement wirtschaftliche Vorteile erzeugen können, wenn Preissignale aus dem Energiemarkt aktiv genutzt werden (dazu Kapitel 3.4 und 6.1).

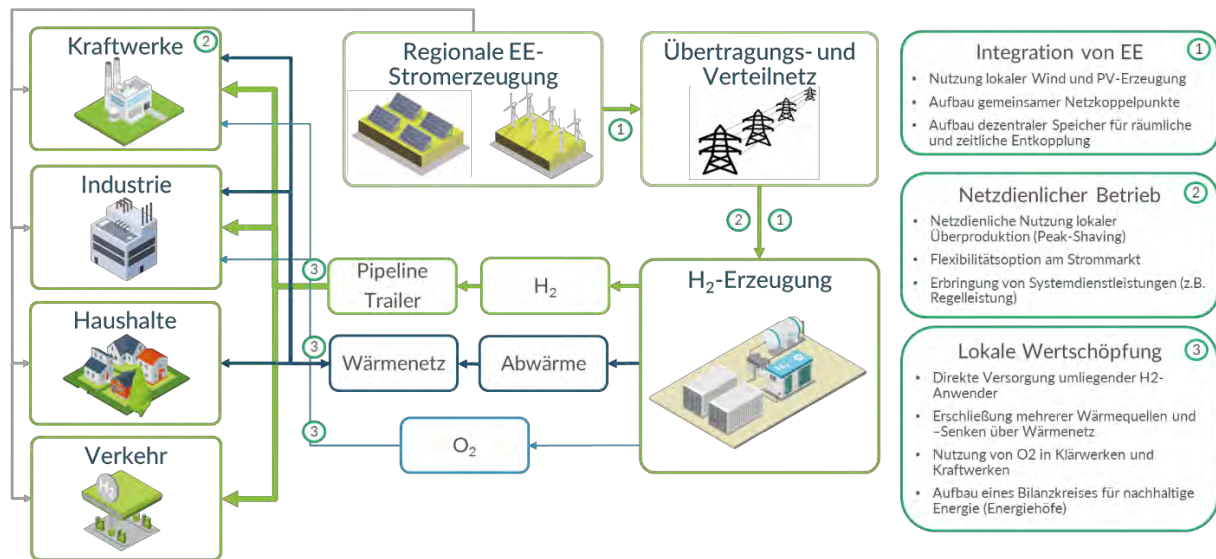


Abbildung 2-9: H2-Wertschöpfungskette in integrierter Energieversorgung (eigene Darstellung)

Abbildung 2-9 zeigt eine exemplarische Wasserstoff-Wertschöpfungskette einschließlich den Vorteilen einer systemdienlichen Integration.

3. Potenzialanalyse Wasserstoffprojekt in Rüsselsheim am Main

3.1. Randbedingungen und Szenariodefinition

Zur Bewertung der Infrastrukturbedarfe werden drei Szenarien mit Anschlussleistungen von 10, 50 und 200 MW zugrunde gelegt. Die Staffelung geht einerseits auf den Elektrolyse-Projektbenchmark zurück und spiegelt gängige Anlagenleistungen wider. Andererseits werden durch die Staffelung genehmigungsrechtlich unterschiedliche Mengenschwellen abgebildet. Diese basieren auf einem Betrieb mit 6.000 Volllaststunden pro Jahr. Ziel dieser Untersuchung ist es, die erforderliche Medienver- und -entsorgung zu quantifizieren, die für die Erzeugung von Wasserstoff notwendig ist. Dazu zählen der Bedarf an deionisiertem Wasser (DI-Wasser), mit einem Leitwert von weniger als 1 μS (13), sowie die notwendigen Zwischenspeicherkapazitäten und die Transportoptionen für Wasserstoff. Für die Zwischenspeicherkapazitäten, welche die Produktion von einem Tag auffangen soll, werden die gängigen Druckstufen von 100 bar für die Einspeisung in ein Gasnetz sowie 225 bar und 550 bar für den Straßen-Transport in Trailerfahrzeugen analysiert. Auch der Platzbedarf für die Erzeugung, Speicherung und Befüllstationen für den Abtransport wird in den folgenden Abschnitten thematisiert.

3.1.1. Produktionsleistung

Bei der Elektrolyse von Wasser entsteht als Hauptprodukt Wasserstoff. Zusätzlich wird auch Sauerstoff erzeugt. Dieser Sauerstoff wird in der Regel an die Umgebung abgegeben, kann jedoch unter bestimmten Umständen auch für andere Anwendungen genutzt werden.

<i>Elektrolyse-Anschlussleistung</i>	10 MW	50 MW	200 MW
<i>Strombedarf pro Tag</i>	160 MWh	800 MWh	3.200 MWh
<i>Wasserstofferzeugung pro Tag</i>	3,12 t	15,6 t	62,4 t
<i>Sauerstofferzeugung pro Tag</i>	25 t	125 t	499 t

Tabelle 3-1: Szenarien: Strombedarf, H₂- und O₂-Produktion

3.1.2. Medienver- und -entsorgung

Das für die Wasserstoffelektrolyse benötigte DI-Wasser kann durch Technologien wie Umkehrosmose und Ionenaustausch sowohl aus Trink- oder auch aus Flusswasser gewonnen werden.

Für die betrachteten Szenarien wurde die Nutzung einer Umkehrosmose-Anlage in Betracht gezogen. Hierbei wird Wasser mit hohem Druck durch eine Membran gepresst, wobei Salze und andere Verunreinigungen zurückbleiben. Neben dem DI-Wasser entsteht auch aufmineralisiertes Abwasser, das entweder wie gewöhnliches Abwasser in die Kanalisation eingeleitet werden kann oder, bei Einleitung in ein öffentliches Gewässer einer entsprechenden Einleitungsgenehmigung bedarf.

Die Elektrolyse erzeugt neben Wasserstoff auch Abwärme, die im Bereich der Betriebstemperatur der Elektrolyseure liegt. Bei Elektrolyseuren mit PEM-Technologie liegt diese Temperatur in der Regel zwischen 50 °C und 90 °C (13).

Elektrolyse-Anschlussleistung	10 MW	50 MW	200 MW
<i>DI-Wasserbedarf pro Tag</i>	28,1 m ³	140,4 m ³	561,7 m ³
<i>Trinkwasserbedarf pro Tag für DI-Wasser aus Trinkwasser</i>	56,2 m ³	281 m ³	1.123 m ³
<i>Flusswasserbedarf pro Tag für DI-Wasser aus Flusswasser</i>	112,3 m ³	562 m ³	2.247 m ³
<i>Abwasser bei Trinkwassernutzung pro Tag</i>	28,08 m ³	140,4 m ³	562 m ³
<i>Abwasser bei Flusswassernutzung pro Tag</i>	84,2 m ³	421 m ³	1.685 m ³
<i>Abwärme bei ca. 50°C-90°C pro Tag</i>	56 MWh	280 MWh	1.120 MWh

Tabelle 3-2: Szenarien: Medienver- und -entsorgung

3.1.3. Zwischenspeicherkapazitäten

Für die Szenarien wird angenommen, dass die Wasserstoffproduktion für einen Tag zwischengespeichert wird. Dabei erfolgt die Speicherung des Wasserstoffs bei verschiedenen Druckstufen, die unmittelbar mit dem Abtransport des Wasserstoffs verknüpft sind.

Die Speicherung bei 100 bar wird mit 50 % der erzeugten Menge angenommen. Es wird davon ausgegangen, dass für den Transport und die Verteilung des Wasserstoffs größtenteils das Ferngasnetz bzw. das Wasserstoffkernnetz genutzt wird, welches als Hochdrucknetz ausgelegt ist (14). Der Wasserstoff kann auch in verschiedenen Konzentrationen in das Erdgasnetz eingespeist werden. (14)

Die Speicherung bei 225 bar, welche für den Transport in derzeitigen 200 bar Trailern vorgesehen ist, wird mit einem Anteil von 10 % angesetzt. Die Bedeutung dieser Speicher und Transportform wird als gering angesehen, da neue MEGC-Trailer mit höheren Druckstufen in der Entwicklung sind, die einen effektiveren Straßentransport des Wasserstoffs ermöglichen.

Die Speicherung bei 550 bar, welche für den Transport in modernen 500 bar Trailern vorgesehen ist, wird in den Szenarien mit 40 % der erzeugten Menge angenommen. Diese Trailer bieten mit einer Transportkapazität von 1.000 kg einen deutlichen Vorteil gegenüber 200 bar Trailern, die lediglich eine Kapazität von etwa 400 kg besitzen (15). Daher ist anzunehmen, dass 500 bar Trailer neben dem pipelinegestützten Transport und der Verteilung einen wichtigen Anteil an der Wasserstoffverteilung haben werden.

Elektrolyse-Anschlussleistung	10 MW	50 MW	200 MW
<i>Speicherkapazität Wasserstoff gesamt (pro Tag)</i>	3,12 t	15,6 t	62,4 t
<i>Speicherkapazität - 100 bar</i>	1,56 t	7,80 t	31,2 t
<i>Speicherkapazität - 225 bar</i>	0,31 t	1,56 t	6,24 t
<i>Speicherkapazität - 550 bar</i>	1,25 t	6,24 t	25,0 t

Tabelle 3-3: Szenarien: Speicherbedarf pro Tag

3.1.4. Transportoptionen

Für die Szenarien wird angenommen, dass Transporte mit LKW-Trailern 50 % der erzeugten Wasserstoffmenge ausmachen werden. Dabei haben Transport-Trailer mit 200 bar eine Kapazität von 400 kg H₂, während Trailer mit 500 bar eine Kapazität von 1.000 kg H₂ aufweisen.

Für diese Trailer werden Back-to-Back-Betankungszeiten von 4 Stunden angenommen. Innerhalb dieses Zeitraums kann ein Trailer angeschlossen, befüllt und nach dem Befüllvorgang die Abfüllstation für den nächsten Betankungsvorgang vorbereitet werden, sodass dieser unmittelbar stattfinden kann.

Es wird davon ausgegangen, dass die Befüllung der Trailer rund um die Uhr erfolgen kann.

Elektrolyse-Anschlussleistung	10 MW	50 MW	200 MW
Einspeisung Gasnetz pro Tag	1,6 t	7,8 t	31,2 t
200 bar Trailer pro Tag	1	4	16
500 bar Trailer pro Tag	4	16	63
Trailer pro Tag gesamt	5	20	79

Tabelle 3-4: Szenarien: Wasserstoffverteilung

3.1.5. Flächenbedarf

Bei der Ermittlung des Flächenbedarfs wurden bestehende Erzeugungs-, Speicher- und Abfüllanlagen aus vergangenen Projekten, wie z.B. die Elektrolyse im Energiepark Höchst und Wasserstoffspeicher des Energiepark Mainz sowie die Wasserstoffbus Tankstelle der ESWE in Wiesbaden, ausgewertet. Diese Anlagen befinden sich an unterschiedlichen Standorten, weshalb unterschiedliche Regelungen für Sicherheitsabstände und Ähnliches gelten.

Flächen für Zu- und Abfahrten, Sicherheitsflächen wie Feuerwehrumfahrungen, Servicezugänge oder Sicherheitsabstände zu Grundstücksgrenzen wurden nicht berücksichtigt. Daher spiegeln die in diesem Szenario ermittelten Flächenbedarfe nicht den tatsächlichen Bedarf wider, sondern dienen lediglich als grobe Abschätzung.

Elektrolyse-Anschlussleistung	10 MW	50 MW	200 MW
Flächenbedarf Elektrolyse	1.292 m ²	6.460 m ²	25.840 m ²
	0,13 ha	0,65 ha	2,58 ha
Flächenbedarf 100 bar Speicherung	520 m ²	2.080 m ²	8.190 m ²
Flächenbedarf 225 bar Speicherung	54 m ²	162 m ²	540 m ²
Flächenbedarf 550 bar Speicherung	176 m ²	704 m ²	2.772 m ²
Flächenbedarf Befüllstationen 225 bar	81 m ²	81 m ²	243 m ²
Flächenbedarf Befüllstationen 550 bar	81 m ²	243 m ²	891 m ²
Mindestflächenbedarf ohne Peripherie gesamt	0,2 ha	1 ha	3,8 ha

Tabelle 3-5: Szenarien: Flächenbedarfe

3.2. Standortanalyse für die Elektrolyseanlage

Im Rahmen der Untersuchung der Opel-Flächen ist eine umfassende Standortauswertung in Form einer Bewertungsmatrix durchgeführt worden. Dabei sind insgesamt acht ausgewählte Potenzialflächen systematisch anhand zuvor definierter Kriterien analysiert und miteinander verglichen worden. Die Bewertung hat dabei sowohl infrastrukturelle als auch standort-spezifische Aspekte berücksichtigt, die für die zukünftige Nutzung im Kontext der grünen Wasserstoffherzeugung von Bedeutung sind.

Ziel der Analyse ist es gewesen, eine sachlich fundierte Bewertung vorzunehmen, um jene potenzielle Flächen zu identifizieren, die sich aufgrund ihrer Eigenschaften und Rahmenbedingungen besonders gut für die Produktion von Wasserstoff eignen. Das Ergebnis der Auswertung hat somit eine priorisierte Auswahl der geeignetsten Standorte geliefert, welche die strategische Weiterentwicklung der Flächen im Sinne einer zukunftsorientierten, klimafreundlichen Energieinfrastruktur unterstützen.

3.2.1. Standortkriterien für Wasserstoffproduktionsanlagen

Zu den grundlegenden Standortanforderungen für den Betrieb einer Elektrolyseanlage zählen insbesondere ein gesicherter Zugang zur Strom- und Wasserversorgung, eine ausreichend

dimensionierte Grundstücksfläche sowie planungsrechtliche Entwicklungsperspektiven. Ebenso ist darauf zu achten, dass sich die potenziellen Flächen nicht in unmittelbarer Nähe zu immissionssensiblen Nutzungen befinden, um Nutzungskonflikte zu vermeiden.

Die Bewertung der Standorte erfolgt auf Grundlage einer systematischen Bewertungsmatrix, die nach einem Scoring-Modell aufgebaut ist. Die zugrunde liegenden Bewertungskriterien wurden aus raumplanerischen, genehmigungsrechtlichen, infrastrukturellen und wirtschaftlichen Anforderungen abgeleitet. Insgesamt flossen 27 Einzelfaktoren in die Analyse ein, die sechs thematischen Kategorien zugeordnet sind (siehe Tabelle 3-7).

Jeder Faktor wurde auf einer standardisierten Skala von 0 bis 3 Punkten bewertet, wobei eine höhere Punktzahl eine höhere Eignung des Standorts im jeweiligen Kriterium signalisiert. Die Bewertung stützt sich auf Datenquellen, die eine Vielzahl an raumbezogenen Analyseebenen aufspannen (siehe Tabelle 3-6) und praktischen Erfahrungen aus vergleichbaren Planungsprojekten.

B-Pläne B-Plan Nr. 151, 152, 153, 154, 155, 156, 157
Machbarkeitsstudie Opel-Areal, bulwiengesa
RegioMap (Festsetzungen Altlasten, Artenschutz, Hochwasser, Archäologie etc.)
BORIS-D (Bodenrichtwertinformationssystem für Deutschland) (16)

Tabelle 3-6: Verwendete Quellen für Standortanalyse

Zur Gesamtauswertung wurde für jede Fläche ein Standort-Score berechnet, der dem Durchschnitt der Mittelwerte der einzelnen Kategorien entspricht. Die resultierenden Werte erlauben eine transparente und nachvollziehbare Rangfolge der untersuchten Potenzialflächen und dienen somit als Grundlage für weitere Planungs- und Entscheidungsprozesse.

Die Bewertungsmatrix umfasst 27⁵ Einzelfaktoren, die sich in sechs übergeordneten Kategorien gliedern:

⁵ Nur die hervorgehobenen Faktoren sind in das Scoring-Modell eingeflossen, da die anderen Kriterien sich nicht in den Flächen unterscheiden haben und somit nicht relevant für eine Bewertung waren.

Grundstück

- oFlächengröße (in Infrastruktur bewertet)
- oFlächennutzungen
- oNachbarnutzungen
- oZugänglichkeit / Erreichbarkeit
- oEigentum

Bebauung

- oVorhandene Bebauungen
- oGeplante Bauvorhaben auf der Fläche gemäß Rahmenkonzept
- oGeplante Bauvorhaben gemäß Planungen Eigentümer
- oGrundstücksverfügbarkeit unter Berücksichtigung der Planungen

Boden Umwelt

- oLärm / Immissionschutz
- oAltlasten / Bodenverunreinigungen (Verdacht)
- oKampfmittel
- oArtenschutz / Baumschutz / Schutzgebiete
- oHochwasser / Überschwemmungsgebiet
- oErdbebenzone
- oArchäologie

Baurecht / Genehmigung

- oVorhaben FNP
- oVorgaben B-Plan
- oDenkmalschutz
- oGenehmigungsfähigkeit

Wirtschaftlichkeit / Abwicklung / Betrieb

- oKaufpreis / Bodenrichtwert

Infrastruktur

- oStromversorgung
- oWasserversorgung
- oAbwasser
- oWasserstoff Infrastruktur
- oAbwärmebehandlung/-nutzung
- oPlatzverfügbarkeit und Schnitt der Fläche

Tabelle 3-7: Einzelfaktoren der Standortbewertung

Im Folgenden werden die wesentlichen Anforderungen, hinsichtlich dessen die Flächen bewertet wurden, erläutert.

Grundstück

Für die Eignung eines Standorts zur Errichtung einer Elektrolyseanlage ist das Grundstück ein zentrales Kriterium. Wesentlich ist eine ausreichende Flächengröße, um neben der eigentlichen Anlage auch Nebenflächen und mögliche Erweiterungen abzudecken. Flächennutzung und Nachbarnutzungen beeinflussen maßgeblich die Genehmigungsfähigkeit – von Vorteil sind gewerbliche oder industrielle Nutzungen ohne Nähe zu Wohngebieten oder sensiblen Einrichtungen.

Eine gute Zugänglichkeit, etwa durch Anbindung an das übergeordnete Straßennetz, ist für Bau und Betrieb ebenso wichtig wie klare Eigentumsverhältnisse. Grundstücke in öffentlichem oder eindeutig verfügbarem Privateigentum ermöglichen eine zügigere Projektentwicklung.

Bebauung

Auch die bestehende und geplante Bebauung ist ein wichtiger Aspekt bei der Standortbewertung. Vorhandene Bebauungen können die Nutzbarkeit der Fläche einschränken oder Rückbaukosten verursachen, während unbebaute Flächen schneller verfügbar sind.

Zudem sind geplante Bauvorhaben gemäß dem Rahmenkonzept und dem städtebaulichen Zielkonzept sowie dem derzeit in Bearbeitung befindlichen Rahmenplanes und den Planungen seitens des Eigentümers zu berücksichtigen. Überschneidungen mit anderen Nutzungszielen können zu Nutzungskonflikten führen oder die langfristige Verfügbarkeit einschränken.

Die Grundstücksverfügbarkeit unter Berücksichtigung geplanter Entwicklungen ist daher entscheidend: Nur Flächen, die im Einklang mit bestehenden Planungen nutzbar sind, bieten realistische Perspektiven für die Errichtung einer Elektrolyseanlage.

Boden und Umwelt

Umwelt- und Bodenbedingungen haben großen Einfluss auf die Eignung eines Standorts für eine Elektrolyseanlage. Im Bereich des Lärm- und Immissionsschutzes ist insbesondere relevant, ob empfindliche Nutzungen im Umfeld bestehen, die durch den Betrieb beeinträchtigt werden könnten.

Verdachtsflächen mit Altlasten oder Bodenverunreinigungen sowie potenzielle Kampfmittelbelastungen stellen Risiken für den Bau und zusätzliche Kosten dar. Auch natur- und artenschutzrechtliche Belange wie geschützte Biotope, Bäume oder Schutzgebiete können Einschränkungen mit sich bringen. Weitere wichtige Kriterien sind die Lage in einem Hochwasser- oder Überschwemmungsgebiet, sowie mögliche archäologische Befunde, die bauvorbereitende Maßnahmen verzögern oder aufwändiger machen könnten. Standorte mit wenigen oder klar handhabbaren Umweltrisiken bieten daher die besten Voraussetzungen für eine schnelle und konfliktarme Umsetzung. Folgende Karte (Abbildung 3-1) zeigt an den Markierungen die Flächen, die mit umweltgefährdeten Stoffen belastet sind. Dies ist bei der Bewertung der Standorte und der möglichen Realisierung eines Elektrolyseurs zu beachten.

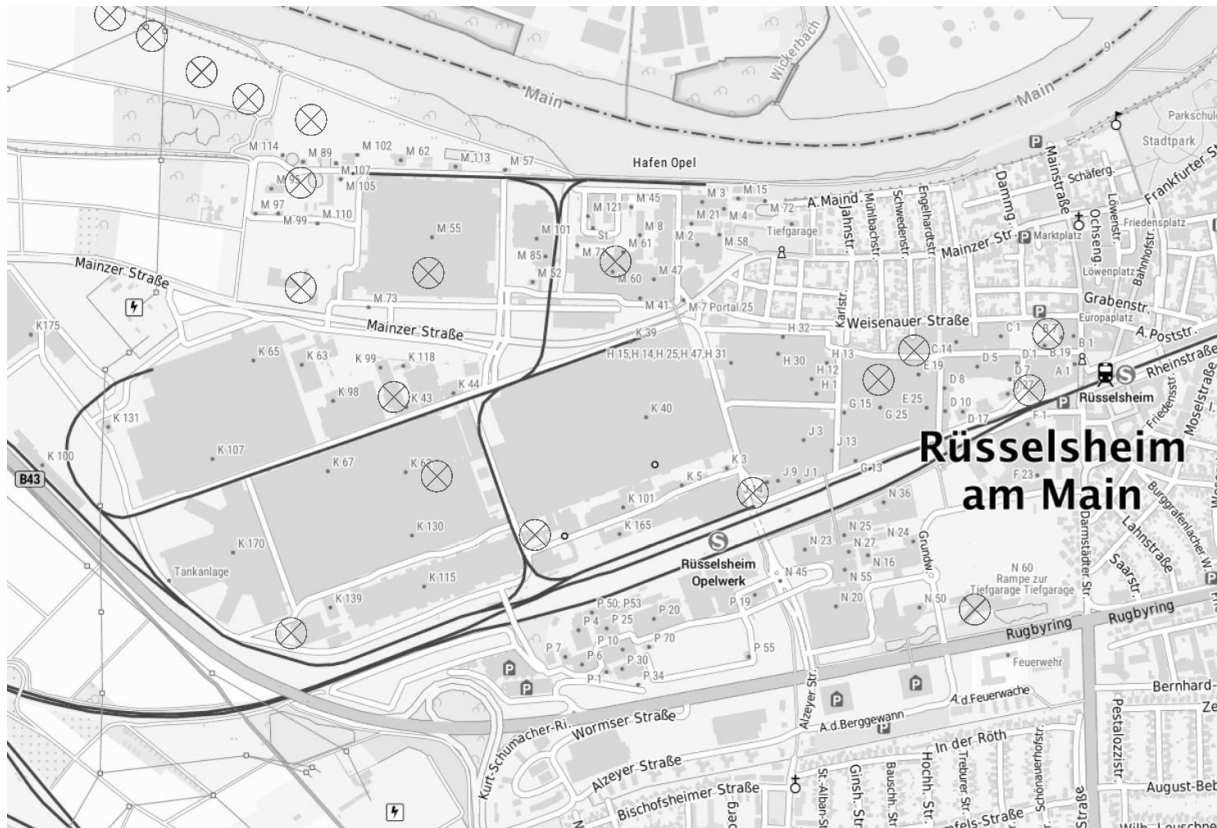


Abbildung 3-1: Böden, deren Flächen mit umweltgefährdeten Stoffen belastet sind. Quelle: RegioMap, 2025

Baurecht

Die planungsrechtlichen Rahmenbedingungen sind entscheidend für die Realisierbarkeit einer Elektrolyseanlage. Ein zentraler Aspekt ist die Darstellung des Vorhabens im Flächennutzungsplan (FNP) – eine entsprechende Ausweisung als gewerbliche oder industrielle Fläche ist dabei von Vorteil. Ergänzend sind die Vorgaben aus bestehenden Bebauungsplänen (B-Pläne) zu prüfen, insbesondere hinsichtlich zulässiger Nutzungen, Baugrenzen und gestalterischer Anforderungen.

Zusätzliche Einschränkungen können sich durch Denkmalschutzaufgaben ergeben, etwa bei denkmalgeschützten Gebäuden oder Ensembles auf oder in der Nähe der Fläche. Letztlich entscheidend ist die generelle Genehmigungsfähigkeit des Vorhabens: Nur wenn aus bauplanungs- und bauordnungsrechtlicher Sicht keine grundlegenden Hürden bestehen, ist eine zügige Umsetzung des Projekts realistisch.

Anforderungen im Bereich Wirtschaftlichkeit, Abwicklung und Betrieb

Auch wirtschaftliche Aspekte spielen eine zentrale Rolle bei der Bewertung potenzieller Standorte. Ein wesentlicher Faktor ist der Kaufpreis bzw. der Bodenrichtwert (16) der Fläche. Hohe Grundstückskosten können die Wirtschaftlichkeit des Projekts erheblich beeinträchtigen, insbesondere bei großflächigen Anlagen mit entsprechendem Flächenbedarf.

Infrastrukturelle Anforderungen

Die infrastrukturellen Anforderungen sind entscheidend für die Bewertung der Eignung einer Fläche zur Wasserstoffherzeugung. Zum einen ist eine zuverlässige und ausreichende Stromversorgung essenziell für den Betrieb von Elektrolyseuren. Die Nähe zu bestehenden Stromnetzen und die Verfügbarkeit von erneuerbaren Energiequellen können die Effizienz und Nachhaltigkeit der Wasserstoffproduktion erheblich verbessern.

Der Einsatz erneuerbarer Energien ist einerseits notwendige Grundlage für das Produzieren von grünem Wasserstoff, andererseits ergänzen sich beide Technologien, da Elektrolyseure die fluktuierende Natur erneuerbarer Energien ausgleichen kann und sie speichert, also in der Lage ist das volatile Angebot zeitlich, sektoral und auch räumlich breiter zu strecken. Ein direkter Anschluss an Anlagen, die erneuerbaren Strom produzieren ist also für das Label „grün“ relevant, birgt aber zudem Kosteneinsparpotenzial bei der Herstellung. Die Stromgestehungskosten für Solarenergie und Windstrom sind im Vergleich zu anderen Stromerzeugungsanlagen in Deutschland am niedrigsten (16), weswegen die Kosten für die Wasserstoffproduktion (siehe dazu Abbildung 3-2) günstig gehalten werden können.

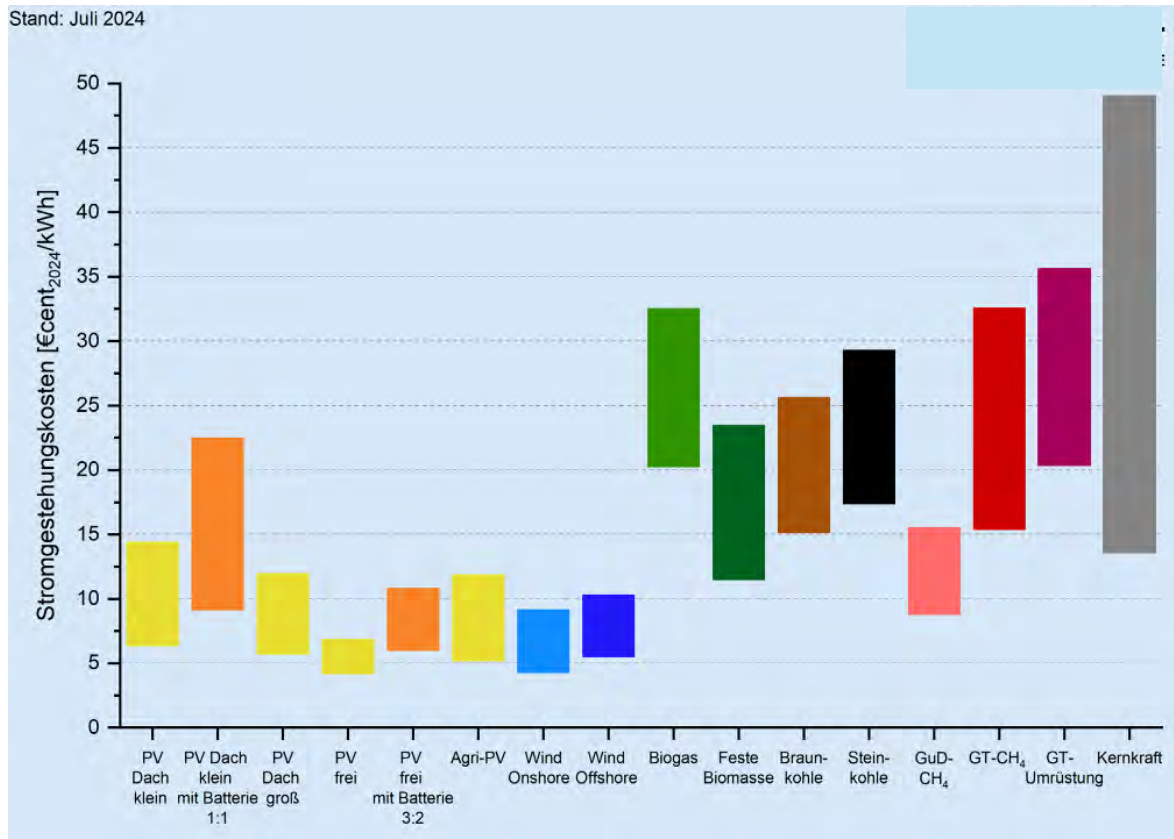


Abbildung 3-2: Stromgestehungskosten für Erneuerbare Energien und konventionelle Kraftwerke an Standorten in Deutschland im Jahr 2024 (16)

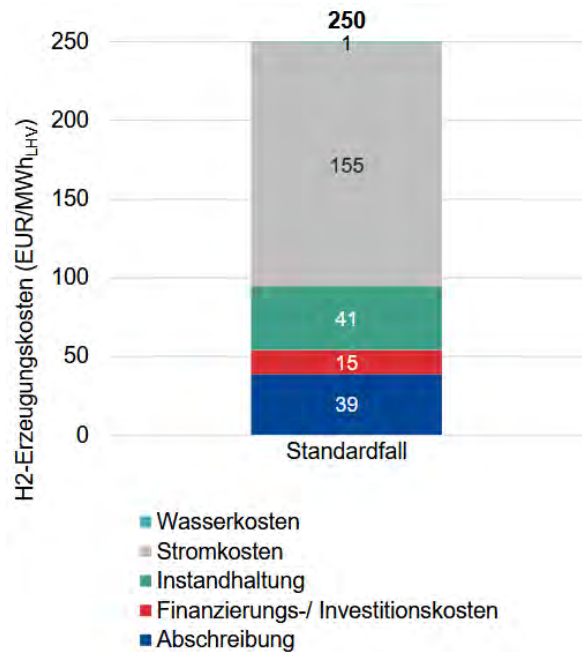


Abbildung 3-3: Kostenstruktur: PEM-Elektrolyseur 1 bis 5 MW; Strombezug: Offshore-PPA; Zeitpunkt Analyse: Ende 2023 (17)

Darüber hinaus ist Wasser der Grundstoff für die Wasserstofferzeugung. Daher muss eine kontinuierliche und qualitativ hochwertige Wasserversorgung gewährleistet sein. Die Nähe zu Wasserquellen oder die Möglichkeit, Wasser aus dem öffentlichen Versorgungsnetz zu beziehen, sind wichtige Kriterien.

Die Fläche muss zudem ausreichend groß sein, um die notwendigen Anlagen und Infrastruktur unterzubringen. Dazu gehören Elektrolyseure, Speicher- und Verteilungssysteme sowie gegebenenfalls zusätzliche Einrichtungen wie Verwaltungsgebäude und Wartungsbereiche. Eine großzügige Platzverfügbarkeit ermöglicht eine flexible Planung und Erweiterung der Anlage. Zum anderen beeinflusst der Schnitt der Fläche, also die topografischen und geologischen Eigenschaften, die Bau- und Betriebskosten der Anlage. Eine ebene Fläche erleichtert die Installation der Infrastruktur und minimiert die Kosten für Erdarbeiten und Fundamentierungen.

3.2.2. Bewertung der Potenzialstandorte



Abbildung 3-4: Potenzialstandorte Elektrolyse Übersicht

In Abstimmung mit dem Auftraggeber wurden acht Standorte ausgewählt und anhand der zuvor beschriebenen Kriterien systematisch analysiert und bewertet.

Die Gesamtergebnisse bewegen sich in einer Bewertungsspanne von 1,7 bis 2,6, wobei der maximal erreichbare Wert bei 3,0 liegt (siehe Tabelle 3-8).

Flächenbetrachtung	Option 1	Option 2	Option 3	Option 4	Option 5	Option 6	Option 7	Option 8
Grundstückbezeichnung	Mainzer Straße Süd	Mainzer Straße Nord	Weisenauer Straße	Rugby-Ring Nord	Rugby-Ring Süd	Rugby-Ring Mitte	Rugby-Ring West	Gewerbepark West
Beschreibung	Auswertung	Auswertung	Auswertung	Auswertung	Auswertung	Auswertung	Auswertung	Auswertung
Kategorie								
Grundstück	3,0	2,5	1,5	2,0	2,0	3,0	2,5	3,0
Bebauung	2,0	3,0	1,0	1,0	1,0	2,0	1,0	2,0
Boden/Umwelt	2,5	2,3	2,3	1,8	2,3	2,3	2,3	2,5
Baurecht / Genehmigung	2,7	2,3	2,0	2,3	2,3	2,3	2,3	2,7
Wirtschaftlichkeit / Abwicklung / Betrieb	3,0	3,0	3,0	1,0	2,0	2,0	2,0	3,0
Infrastruktur	2,7	2,7	2,3	2,0	2,0	2,0	1,7	2,3
Ergebnis	2,6	2,6	2,0	1,7	1,9	2,3	2,0	2,6

Tabelle 3-8: Ergebnismatrix Standortbewertung (1 = Anforderungen nicht erfüllt (orange), 2 = Anforderungen erfüllt (gelb), 3= Anforderungen übererfüllt(grün))

Für die drei Potenzialstandorte, die in Ihrer Gesamtbewertung mehr als 2,5 Punkte haben, wird im Folgenden eine kurze Standortbeschreibung vorgenommen. Die Bewertung der weiteren Standorte befindet sich in Tabellenform im Anhang.

Mainzer Straße Süd: Die Gesamtfläche von 19,7 Hektar (ha) des Standortes wird derzeit für Fabrikhallen und Parkplätze genutzt und befindet sich südlich der Mainzer Straße. Das Areal wird vom Opel-Werksgelände im Süden, Osten und Westen eingeschlossen. Im Westen hat IKEA Deutschland GmbH & Co. KG Flächen erworben, um dort künftig ein Logistikzentrum zu errichten. Nördlich finden sich eine Aral-Tankstelle und die Entwicklungsflächen des Teilbereiches Mainzer Straße Nord/M-Areal. Eigentümerin der Flächen ist die VGP Group. Es ist eine sehr gute verkehrliche Erreichbarkeit über die Mainzer Straße mit gut ausgebauten Kreuzungen zur Erschließung der Flächen sowie eine gute Anbindung an die B43 und zwei Bushaltestellen gegeben. Die Grundstücksverfügbarkeit ist jedoch stark eingeschränkt, da der Bau des grEEen-Campus und des LKW-Hofs von Stellantis bereits erhebliche Flächen beanspruchen. Umweltaspekte wie Lärmimmissionen durch die Mainzer Straße sind vorhanden, jedoch befindet sich das Areal weder in Schutzgebieten noch Hochwasserzonen. Baurechtlich handelt es sich um eine gewerbliche Baufläche ohne Denkmalschutz und die Genehmigungsfähigkeit ist gegeben. Die Wirtschaftlichkeit wird durch einen Bodenrichtwert von 90 EUR/m² (16) begünstigt. In unmittelbarer Nähe gibt es ein Umspannwerk (UW) mit einer Stromversorgung von 110 kV. Die verfügbare Netzanschlussleistung muss jedoch noch geprüft werden. Die Fläche ist zudem gut geschnitten. Insgesamt wird der Standort mit 2,6 bewertet, da keine Restriktionen durch Denkmalschutz oder Genehmigungsfähigkeit bestehen und die vergleichsweise niedrigen Bodenrichtwerte sowie die gute infrastrukturelle Anbindung eine Realisierung eines Elektrolyseurs begünstigen.



Abbildung 3-5: Mainzer Straße Süd inkl. Umfeldnutzungen

Mainzer Straße Nord: Diese Fläche umfasst 44,8 ha und wird für Fabrikhallen, Parkplätze, eine Kläranlage und eine Tankstelle genutzt. Auch hier ist die VGP Group Eigentümerin. Die Umgebung grenzt an Parkflächen, Wohnbebauung und das Opel-Werksgelände, mit sehr guter verkehrlicher Erreichbarkeit über die Mainzer Straße und Anbindung an die B43 sowie zwei Bushaltestellen. Die Grundstücksverfügbarkeit ist aufgrund der Gesamtgröße zu erwarten, dennoch müssen Planungen eines Umspannwerks und Flächen für das Kraftwerk berücksichtigt werden. Umweltaspekte wie Lärmimmissionen durch die Mainzer Straße und die Nähe zu einem Landschaftsschutzgebiet sind zu beachten. Baurechtlich handelt es sich um eine gewerbliche Baufläche. Die Backsteinfassaden entlang der Mainzer Straße sowie Teilbereiche des Gebäudes M55 und die Halle M1 stehen unter Denkmalschutz. Die Wirtschaftlichkeit wird durch einen Bodenrichtwert von 90 EUR/m² unterstützt (16). Auf der gegenüberliegenden Seite befindet sich ein UW mit einer Stromversorgung von 110 kV. Die verfügbare Netzanschlussleistung muss jedoch noch geprüft werden. Für die Wasserversorgung besteht ein direkter Zugang zum Main. Die 44,8 ha große Fläche ist gut geschnitten. Insgesamt wird der Standort mit 2,6 bewertet, wobei die Nähe zur Wohnbebauung und der Denkmalschutz berücksichtigt werden müssen. Keine Restriktionen durch Genehmigungsfähigkeit sowie vergleichsweise niedrige Bodenrichtwerte und gute infrastrukturelle Anbindung begünstigen eine Realisierung eines Elektrolyseurs.



Abbildung 3-6: Mainzer Straße Nord inkl. Umfeldnutzungen

Gewerbepark West: Diese Gesamtfläche ist 14,1 Hektar groß und wird im Norden und Westen von der Mainzer Straße umschlossen. Derzeit wird sie für eine Fabrikhalle und Parkplätze genutzt. Der Eigentümer ist IKEA Deutschland GmbH & Co. KG. Die Umgebung ist gewerblich geprägt, mit sehr guter verkehrlicher Erreichbarkeit über die B43, die zur A671 im Westen führt. Die Grundstücksverfügbarkeit ist stark eingeschränkt durch Planungsvorhaben von IKEA Deutschland GmbH & Co. KG und den Schutzstreifen zur Bundesstraße. Umweltaspekte wie Lärmimmissionen durch die Mainzer Straße sind vorhanden, jedoch befindet sich das Areal weder in Schutzgebieten noch Hochwasserzonen. Baurechtlich handelt es sich um eine gewerbliche Baufläche ohne Denkmalschutz, und die Genehmigungsfähigkeit ist gegeben. Die Wirtschaftlichkeit wird durch einen Bodenrichtwert von 90 EUR/m² begünstigt (16). In unmittelbarer Nähe gibt es ein UW mit einer Stromversorgung von 110 kV. Die verfügbare Netzanschlussleistung muss jedoch noch geprüft werden. Für die Wasserversorgung gibt es einen direkten Zugang zum Main. Die Fläche ist mit 14,1 ha groß und gut geschnitten. Insgesamt wird der Standort mit 2,6 bewertet, wobei die Planungsvorhaben von IKEA Deutschland GmbH & Co. KG berücksichtigt werden müssen. Keine Restriktionen durch Denkmalschutz und Genehmigungsfähigkeit sowie vergleichsweise niedrige Bodenrichtwerte und gute infrastrukturelle Anbindung begünstigen eine Realisierung eines Elektrolyseurs.



Abbildung 3-7: Gewerbepark West inkl. Umfeldnutzungen

Diese Bewertungen zeigen, dass alle drei Standorte Potenzial für die Realisierung eines Elektrolyseurs bieten, wobei jeweils spezifische Aspekte wie Denkmalschutz, Grundstücksverfügbarkeit und Umweltaspekte berücksichtigt werden müssen. Wesentliche genehmigungsrechtliche Anforderungen werden in Kapitel 3.5 erläutert.

3.3. Regionale und lokale Energieversorgung

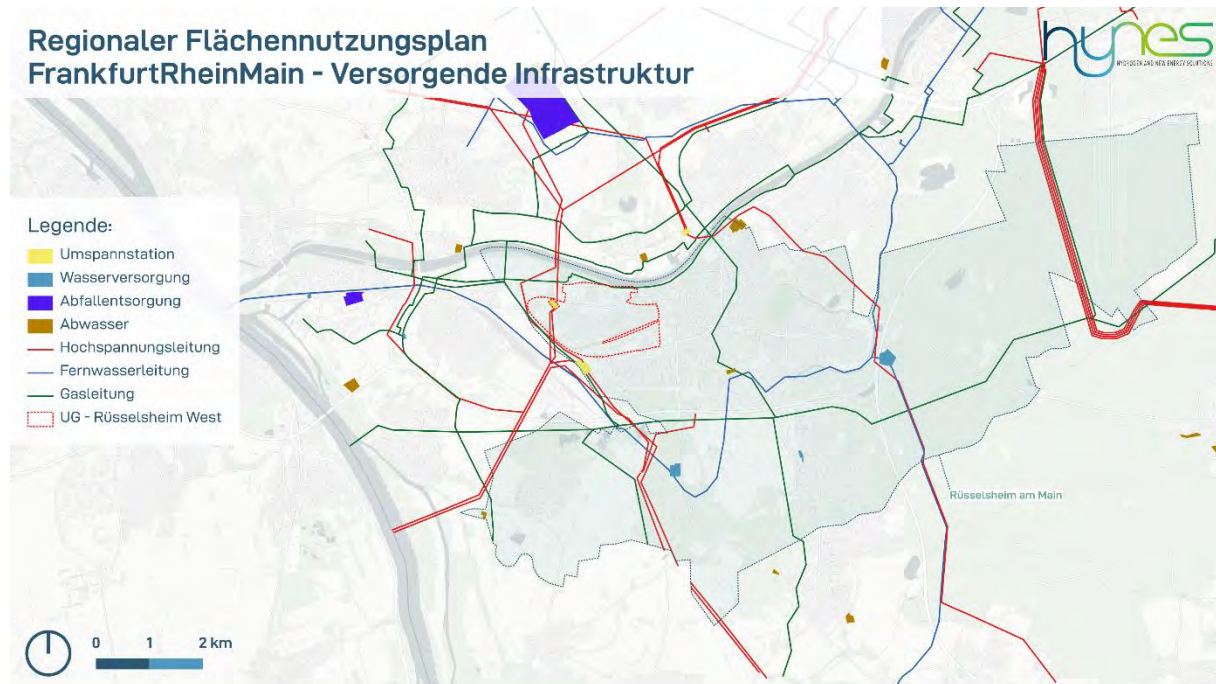


Abbildung 3-8: Versorgungsinfrastruktur in Rüsselsheim am Main (eigene Darstellung auf Grundlage von (18))

3.3.1. Strom

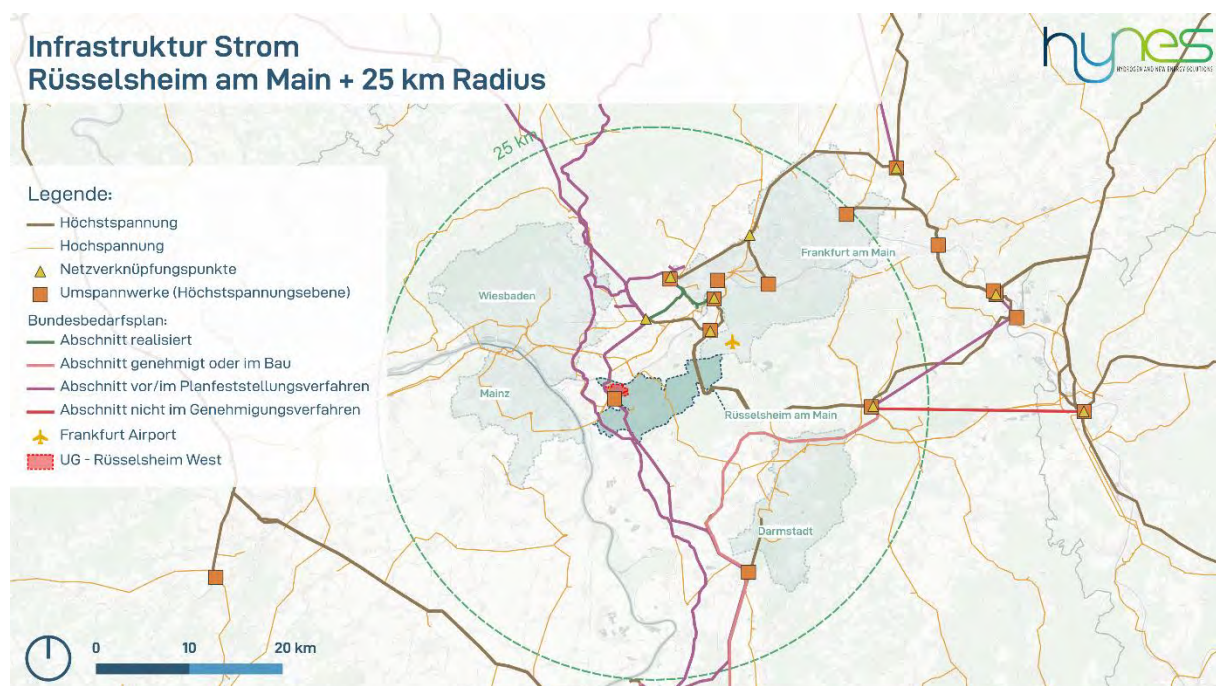


Abbildung 3-9: Strominfrastruktur in Rüsselsheim am Main (eigene Darstellung auf Grundlage von (18))

Das Stromnetz in Rüsselsheim am Main ist Teil der 110-kV-Netzgruppe Mainz-Wiesbaden, welche sich von Ingelheim, über die Landeshauptstädte Mainz und Wiesbaden, bis nach Biebesheim im Süden und dem Kreis Groß-Gerau im Osten erstreckt. Neben den eigenen Kraftwerken, erfolgt die elektrische Versorgung über Übergabestellen aus dem vorgelagerten Netz, derer es insgesamt drei und in unmittelbarer Nähe zu Rüsselsheim am Main zwei gibt:

Eine 380/110-kV-Übergabe in Bischofsheim (Netzbetreiber: Amprion GmbH) und eine 110-kV-Übergabe in Rüsselsheim am Main (Netzbetreiber: Syna GmbH) sowie eine weitere in Biebesheim mit dem Netzbetreiber innogy Netze GmbH. Das 110-kV-Teilnetz besteht überwiegend aus Freileitungssystemen ergänzt um 110-kV-Kabelstiche in die Innenstadtbereiche von Mainz sowie nach Rüsselsheim am Main. Eine Spitzenkappung nach §11(2) EnWG ist nicht erforderlich, da (relativ) nur geringe Leistung aus Wind- und Solarenergieanlagen im Netz angeschlossen sind. (19)

Derselben Achse wie die Open Grid Europe GmbH (OGE) Erdgas- und zukünftigen Wasserstofftransportleitungen 196 und 197 folgt in der Nähe von Rüsselsheim am Main auch eine von Amprion betriebene Höchstspannungsleitung auf 380 kV. Richtung Norden verläuft sie, hinter Rüsselsheim am Main nach Hochheim und dann über das Umspannwerk Krißfeld weiter nach Osten in den Großraum Frankfurt. Am Kreuzungspunkt der B43 und dem Kurt Schuhmacher Ring im Südwesten von Rüsselsheim am Main ist die Umspannanlage Bischofsheim. Kürzlich wurde eine dritte 380-kV-Einspeisung sowie eine 110-kV-Netzverstärkung an der Umspannanlage (UA) neuinstalliert, da Amprion die Stadtwerke Mainz Netze ausschließlich aus der UA Bischofsheim versorgt. Darüber hinaus besteht keine weitere direkte Verbindung mit dem Übertragungsnetz. Die Höchstlast zur Versorgung der Region wurde bisher überwiegend durch die Einspeiseleistung von Seiten der Kraftwerke Mainz-Wiesbaden AG (KMW) gewährleistet. Aufgrund der geplanten Stilllegung der Kraftwerke der KMW AG im 110-kV-Netz der Stadtwerke Mainz Netze wird die Einspeiseleistung von KMW AG schrittweise reduziert und muss deswegen kompensiert werden. Der Entfall dieser bisher gesicherten Kraftwerkseinspeisung im Verteilnetz der Stadtwerke Mainz Netze musste durch eine Leistungsbereitstellung aus dem Transportnetz von Amprion kompensiert werden. Daher war zur bedarfsgerechten und gesicherten Bereitstellung der von den Stadtwerke Mainz Netze benötigten Leistung die Erweiterung der 380-kV-Anlage Bischofsheim um einen 380/110-kV-Transformator erforderlich. Nach Abschluss der Baumaßnahmen wird hierdurch eine gesicherte Versorgung der regionalen 110-kV-Netzgruppe und somit der beiden Landeshauptstädte Mainz und Wiesbaden gewährleistet. (20)

Die 380kV-Leitung verläuft hinter der Umspannanlage Richtung Südosten nach Pfungstadt, während die 110kV-Leitung Richtung Südsüdwest nach Mainz, Richtung Nordwest nach Mainz-Kastel sowie Richtung Norden nach Rüsselsheim am Main selbst führt, wo sie zwischen den Potenzialflächen Gewerbepark West und Mainzer Straße Süd unmittelbar südlich der Mainzer Straße erneut in einem Umspannwerk transformiert wird, um unter anderem die Flächen von Stellantis mit Strom zu versorgen.

Daneben gibt es zwei weitere Umspannwerke. In diesen wird Hochspannung 110kV in Mittelspannung 20kV transformiert. Eines davon, wird von den Mainzer Netzen betrieben und liegt im Südwesten von Rüsselsheim am Main, an der L3482, dem „Umspannwerk Hof Schönauf“. Das andere liegt im Osten der Stadt, an landwirtschaftlichen Flächen, die Rüsselsheim am Main, Hassloch und Raunheim trennen und wird ebenfalls von den Mainzer Netzen betrieben („Umspannanlage Waldweg“).

Die Mittelspannung und Niederspannung im Stadtgebiet Rüsselsheim am Main wird von den Stadtwerken Rüsselsheim betrieben⁶. Die Mittelspannungskabel führen zu Trafostationen im Stadtgebiet, von wo aus die haushaltsübliche Niederspannungsleitungen zu den einzelnen Hausanschlusskästen gelegt werden.

⁶ Die Stadtwerke Rüsselsheim betreiben mit ihren Tochtergesellschaften die Netze für Gas, Wasser, Strom, Straßenbeleuchtung und Nahwärme. Sie sind für die Leitungen und Rohre zuständig, die zur Versorgung mit Wasser und Gas benötigt werden sowie beim Strom für die Kabel und Anlagen. [<https://www.swr-netze-ruesselsheim.de/>]

In Summe weist das Verteilnetz der Stadtwerke Rüsselsheim Stromkreislängen auf der Mittelspannungsebene von 155 Kilometern und auf der Niederspannungsebene von 370 Kilometern auf. Die Anzahl der Entnahmestellen summiert sich auf Mittelspannungsebene auf 28 und auf Niederspannungsebene auf 37.355. Darüber wurden in 2024 auf Ebene der Mittelspannung ca. 55 Gigawatt Stunden und auf Ebene der Niederspannung ca. 125 Gigawatt Stunden Jahresarbeit entnommen. (21)

3.3.2. Gas

Das deutsche Gasfernleitungsnetz bildet mit einer Gesamtlänge von rund 40.000 Kilometern das infrastrukturelle Rückgrat der nationalen Gasversorgung und stellt zugleich ein zentrales Element der europäischen Energieinfrastruktur dar.



Abbildung 3-10: Fernleitungsnetz (72)

Betrieben wird es von sechzehn Fernleitungsnetzbetreibern (FNB), die in der Vereinigung der Fernleitungsnetzbetreiber Gas e. V. (FNB Gas) organisiert sind:

1. GASCADE Gastransport GmbH
2. Gastransport Nord GmbH
3. Gasunie Deutschland Transport Services GmbH
4. Nowega GmbH
5. Ontras Gastransport GmbH
6. Lubmin-Brandov Gastransport GmbH
7. Opal Gastransport GmbH & Co. KG
8. Fluxys Deutschland GmbH
9. NEL Gastransport GmbH
10. bayernets GmbH
11. GRTgaz Deutschland GmbH
12. Open Grid Europe GmbH
13. terranets BW GmbH
14. Ferngas Netzgesellschaft mbH
15. Fluxys TENP GmbH
16. Thyssengas GmbH

Das Stadtgebiet Rüsselsheim am Main ist in dieses überregionale Netz eingebunden, das in der Region vorrangig durch die OGE sowie die terranets bw GmbH betrieben wird. Aufgrund seiner Lage im Zentrum des Rhein-Main-Gebiets fungiert Rüsselsheim am Main als strategisch bedeutender Netzknoten für die regionale Gasversorgung. Die Versorgung erfolgt über ein mehrstufiges System – von Fernleitungen über regionale Verteilsysteme bis hin zu den lokalen Stadtwerken – unter Berücksichtigung unterschiedlicher Druckstufen und technischer Spezifikationen.

Aus nordwestlicher Richtung verlaufen zwei parallele Hochdruckleitungen der OGE mit Nord-Süd-Ausrichtung aus dem Großraum Köln (Sankt Augustin, Berlinghoven) in Richtung Rüsselsheim am Main. Noch nördlich des Mains verzweigen sich die Leitungen:

- Die erste Trasse führt an den östlichen Stadtteilen Wiesbadens (Igstadt, Nordenstadt) vorbei nach Rüsselsheim am Main. Dort verläuft sie zwischen der Bischofsheimer Böcklersiedlung und westlich der B43, dieser südwärts folgend, bis ins Gewerbegebiet Bauschheim. Südlich der A60 durchquert sie die Industriestraße 18 (Bischofsheim) und führt weiter südostwärts über Riedstadt und Gernsheim bis nach Lampertheim. Sie ist Teil der Mittelrheinischen Erdgastransportleitungsgesellschaft (METG), die sich im Eigentum der OGE befindet. Die 1968 in Betrieb genommenen METG-Leitungen verlaufen von Bergisch Gladbach bis Gernsheim/Lampertheim, sind an die Nordrheinische Erdgastransportleitungsgesellschaft (NETG) angeschlossen und dienen der Erdgasversorgung West- und Südwestdeutschlands. Die Leitung weist einen Nenndurchmesser (DN) von 900 mm, ab Bischofsheim 800 mm, sowie eine Druckstufe (DP) von 70 bar auf.
- Die zweite Leitung nähert sich aus nordöstlicher Richtung, überquert den Main und durchquert den Bereich der Mainzer Straße sowie die B43. Unmittelbar nach der

Mainquerung zweigt eine weitere Leitung nach Westen ab, die das KEO-Kraftwerk am östlichen Rand des Potenzialgebiets „Mainzer Straße Nord“ versorgt. Diese Leitung besitzt einen Nenndurchmesser von 600 mm.

Zusätzlich verläuft eine dritte, Ost-West-orientierte Leitung durch das Stadtgebiet. Sie steht im Eigentum der terranets bw GmbH und stammt aus Niedersachsen. Sie führt über Hanau, passiert südlich Frankfurt, durchquert Rüsselsheim am Main und überquert bei Ginsheim den Rhein. Von dort aus verläuft sie linksrheinisch über Laubenheim weiter nach Süden in Richtung Baden-Württemberg.

Der Übergang von der Fernleitungs- auf die Verteilnetzebene erfolgt über mehrere definierte Netzkopplungspunkte, an denen das Erdgas auf niedrigere Druckstufen überführt wird. Das örtliche Gasverteilnetz im Stadtgebiet Rüsselsheim am Main wird von der Energieversorgung Rüsselsheim GmbH betrieben. Es umfasst alle drei Druckstufen – Hoch-, Mittel- und Niederdruck – und setzt sich aus Leitungen mit Nenndurchmessern zwischen DN 25 und DN 200 zusammen. Die Gesamtlänge des Netzes (ohne Hausanschlussleitungen) beträgt rund 200 Kilometer, davon entfallen 29 km auf das Hochdruck-, 2 km auf das Mitteldruck- und 170 km auf das Niederdrucknetz.

Die Netzinfrastuktur weist acht Hochdruck-, drei Mitteldruck- und etwa 8.900 Niederdruck-ausspeisepunkte auf. Die Versorgung erfolgt über vier Einspeisepunkte aus dem vorgelagerten Transportnetz. Im Jahr 2024 betrug die ausgespeiste Jahresarbeit rund 358 GWh.

3.3.3. Wasserstoffkernnetz

Westlich von Rüsselsheim am Main verläuft ein Netzkorridor des genehmigten Wasserstoffkernnetzes (22). Von Nordwesten, vom Großraum Köln (Sankt Augustin, Berlinghoven) kommend, führt die Leitung mit der Antrags-ID KLU077-01 über Montabaur, an den östlichen Stadtteilen Wiesbadens (Igstadt, Nordenstadt) vorbei bis nach Rüsselsheim am Main. Zwischen der Bischofsheimer Böcklersiedlung und westlich der B43 und dieser nach Südosten folgend, endet sie im Gewerbegebiet Bauschheim, unmittelbar südlich der A60 in der Industriestraße 18 in Bischofsheim. Dort wird sie zur Leitung KLU078-01 und verläuft weiter nach Südsüdost, durch Riedstadt und Gernsheim vorbei bis nach Lampertheim (22).

Die Antrags-ID KLU077-01 korreliert mit der laufenden Nummer 196-Birlinghoven-Rüsselsheim und die KLU078-01 mit 197-Rüsselsheim Lampertheim. Sie sind der regionale Ausbauteil des H2ercules-Projekts, welches durch die OGE betreut wird. Die Inbetriebnahme ist für Ende 2032 geplant und wird auf der Druckstufe 70 bar erfolgen. Die erste Leitung wird einen Nenndurchmesser von 900mm aufweisen, und zweitens einen von 800mm. Für Beide Leitungen wird in Bezug auf die Auswirkung auf die Bedarfsdeckung festgehalten: „Diese Maßnahme bildet eine Wasserstoffhaupttransportachse zum Abtransport großer Einspeisemengen aus Nordwesten und deren Verbindung mit Ausspeiseschwerpunkten in den folgenden Bereichen: KWK, Eisen & Stahl, Chemie, Raffinerie, Glas inkl. Glasfaser, Keramik und Ziegelprodukte.“ (23)

Nördlich von Rüsselsheim am Main wird von der Leitung 196-Birlinghoven-Rüsselsheim eine Neubauleitung in Richtung Frankfurt abgehen, welche unter der Antrags-ID KLN044-01 respektive der laufenden Nummer 337-Wiesbaden-Frankfurt geführt wird. Sie wird von der OGE gebaut und betrieben und soll Ende 2032 in Betrieb genommen werden. Sie wird einen Nenndurchmesser von 500mm haben und auf der Druckstufe 80 bar operieren. Zur Auswirkung auf die Bedarfsdeckung heißt es: „Diese Maßnahme verbindet Wasserstoffhaupttransportachsen mit Ausspeiseschwerpunkten in den folgenden Bereichen: [...] und Chemie.“ (23)

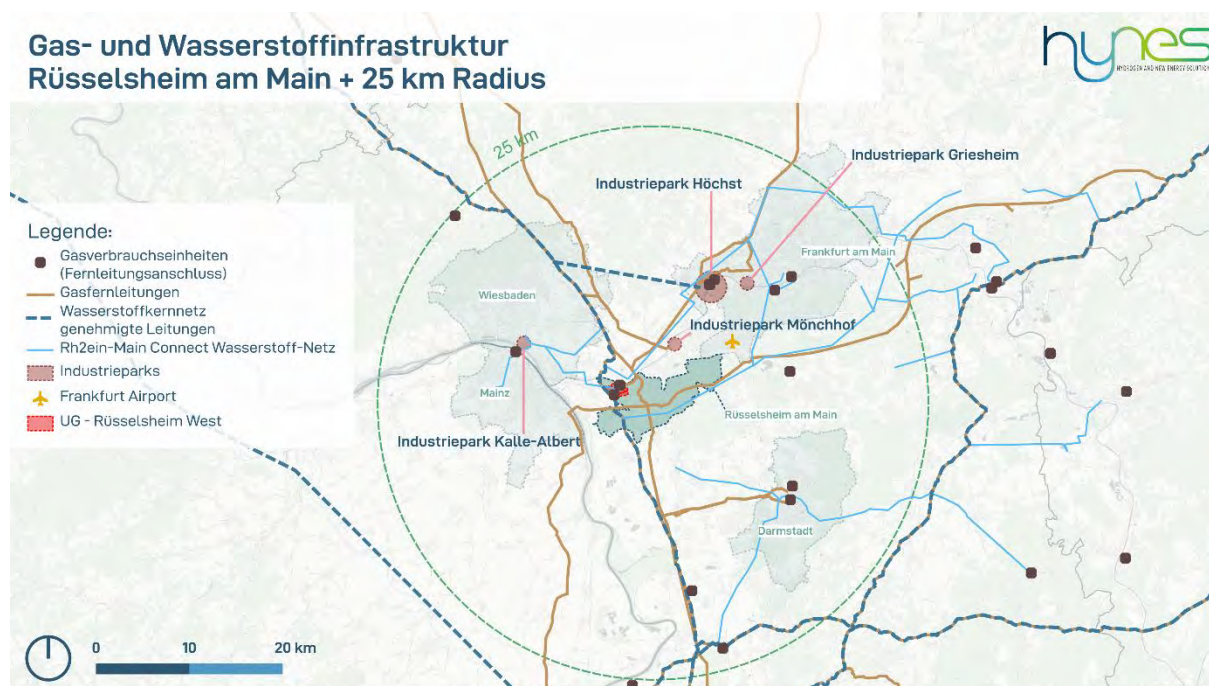


Abbildung 3-11: Gas- und Wasserstoffinfrastruktur Rüsselsheim am Main und Umgebung (eigene Darstellung)

3.4. Integration der Elektrolyseanlage in die bestehende Infrastruktur

Die Integration einer Elektrolyseanlage in die bestehende Infrastruktur stellt eine komplexe Herausforderung dar, die verschiedene Aspekte der Energieversorgung und Infrastrukturplanung umfassen. Die folgenden Erkenntnisse basieren auf Interviews mit verschiedenen Stakeholdern und bieten einen Überblick über die Hauptthemen und Risiken.

Datum	Stakeholder	Fokus
27.02.2025	Stellantis	Flächenbetrachtung Stellantis: HDGJ, N-Areal, Berggewann
28.02.2025	Stadtwerke Rüsselsheim	Infrastruktur
25.03.2025	VGP	Flächenbetrachtung VGP: K-Areal, M-Areal, P-Areal
05.05.2025	KEO	GuD Kraftwerk

Tabelle 3-9: Interviews mit den Stakeholdern

3.4.1. Stromversorgung

Die Stromversorgung auf den Opel/Stellantis-Flächen stellt eine Herausforderung dar. Die Stadtwerke besitzen keine Infrastruktur auf diesen Flächen, und da sie bislang weder als Netzbetreiber noch als vorgelagerter Netzbetreiber für das Opel/Stellantis-Gelände fungieren, verfügen sie über keine eigenen Stromkapazitäten für diese Flächen. Diese Einschränkung bezieht sich ausschließlich auf das Opel/Stellantis-Gelände und ist nicht auf das übrige Stadtgebiet von Rüsselsheim am Main übertragbar. Das Netz endet vor den Werkstoren, und eine Erweiterung der Kapazitäten durch Amprion ist erst über einen Zeitraum von zehn Jahren möglich. Der hohe Ansiedlungsdruck durch Rechenzentren bindet freie Kapazitäten, was die Ansiedlung weiterer energieintensiver Anschlussnehmer erschwert. Die Versorgungsinfrastruktur liegt derzeit in der Hand von Opel/Stellantis. Eine zentrale Rolle der Stadtwerke wäre wünschenswert, um die Handlungsfähigkeit zu erhöhen. Für die Areale Mainzer Straße Nord und Mainzer Straße wurden VGP Kapazitäten zugesichert. Die Versorgung des Areals

Rugbyring West wurde bei den Stadtwerken angefragt. Zu den anderen Flächen gibt es keine genauen Informationen.

Obgleich die Nähe zu bestehenden Umspannwerken und die grundsätzliche infrastrukturelle Anbindung der Flächen positiv bewertet werden kann, ist die tatsächliche Verfügbarkeit elektrischer Leistung als eigenständiger Risikofaktor zu betrachten. Die Stromversorgung sollte daher nicht nur als technische Voraussetzung, sondern auch als potenzieller Engpass in der Standortentwicklung explizit berücksichtigt werden.

3.4.2. Wärmeversorgung

Das GuD-Kraftwerk sorgt für die Absicherung der Wärmeleistung über das Kesselhaus M 125, das gegenüber der GuD-Anlage mit 5 x 25 MW Großwasserraumkesseln ausgestattet ist. Diese Kessel erzeugen Wärme auf 125 °C, die über Wärmeleitungstrassen in drei Opel/Stellantis-Wärmenetze verteilt wird. Zusätzlich gibt es eine Power-to-Heat-Anlage mit einem Elektrodenkessel, der 40 MW elektrisch und 40 MW thermisch in der Regenergie erzeugt. Das Opel-/Stellantisnetz dient dabei als Wärmesenke. Das GuD-Kraftwerk ist systemrelevant und kann nicht stillgelegt werden. Eine Beimischung von Wasserstoff ist technisch möglich, jedoch wirtschaftlich derzeit nicht darstellbar. Die Wärme aus Wasserstoff ist wirtschaftlich herausfordernd. Je nach Entscheidung der Systemrelevanz könnten zukünftige Anlagen kleiner dimensioniert werden.

Basierend auf dem Gespräch mit den Stadtwerken Rüsselsheim gibt es derzeit kein nennenswertes Fernwärmenetz. Dieses sollte im Rahmen der kommunalen Wärmeplanung untersucht werden. Auf den VGP-Flächen besteht die Wärmeversorgung des KEO-Kraftwerks. Zukünftig soll die Wärmeversorgung über Wärmepumpen erfolgen. Zu den anderen Flächen gibt es keine genauen Informationen.

3.4.3. Wasserversorgung

Die Frischwasserversorgung erfolgt durch die Stadtwerke, während die Entsorgung durch die Stadt Rüsselsheim am Main und das Tiefbauamt organisiert wird. Es gibt eine infrastrukturelle Trennung der Medien auf den VGP-Flächen, was zu Herausforderungen bei der Integration neuer Systeme führen könnte.

Zusammenfassung

Die Integration der Elektrolyseanlage in die bestehende Infrastruktur birgt mehrere Herausforderungen. Die begrenzten Stromkapazitäten und langen Vorlaufzeiten für Erweiterungen erschweren die Integration erheblich. Zudem stellt die Trennung der Wärmeversorgung und die wirtschaftlichen Herausforderungen bei der Nutzung von Wasserstoff ein großes Risiko dar, insbesondere da derzeit kein nennenswertes Fernwärmenetz existiert und die Erschließung eine kommunale Wärmeplanung erfordert. Die infrastrukturelle Trennung der Medien könnte ebenfalls zu Integrationsproblemen führen, da die Frischwasserversorgung durch die Stadtwerke und die Entsorgung durch die Stadt Rüsselsheim am Main und das Tiefbauamt organisiert wird. Eine sorgfältige Planung und enge Zusammenarbeit zwischen den Stadtwerken, Opel/Stellantis und anderen Stakeholdern sind daher essenziell, um diese Herausforderungen zu bewältigen und eine nachhaltige Lösung zu finden.

3.5. Genehmigungsrechtliche Anforderungen

Für die Errichtung und den Betrieb einer Wasserstoffproduktionsanlage, insbesondere von Elektrolyseuren, sind je nach Anlagengröße und Betriebsweise unterschiedliche Genehmigungsverfahren erforderlich. Die wichtigsten rechtlichen Grundlagen ergeben sich aus dem Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) sowie aus weiteren Fachgesetzen, darunter das Bauordnungsrecht, das Wasserrecht und die Betriebssicherheitsverordnung.

	Erzeugung	Lagerung	Feuerung
4. BImSchV vereinfacht	5 MW, < 50 t/d	3 t	1 MW
4. BImSchV förmlich	> 50 t/d	30 t	50 MW
IE-Anlage	> 50 t/d	-	50 MW
12. BImSchV untere Klasse	Summe Betriebsbereich: 5t		
12. BImSchV obere Klasse	Summe Betriebsbereich: 50t		
UVP-Vorprüfung, standortbezogen	5 MW	3 t	< 50 MW
UVP-Vorprüfung, allgemein	50 MW	300 t	50 MW
UVP-pflichtig	-	200.000 t	> 200 MW
Emissionsgenehmigung (TEHG)	5 t/d	n.A.	

Tabelle 3-10: Übersicht über die regulatorischen und genehmigungsrelevanten Gesetze und Verordnungen für Erzeugung, Lagerung und Feuerung von Wasserstoff (eigene Darstellung)

Sofern das Grundstück außerhalb bestehender Bauleitplanung liegt oder Sondernutzungen vorsieht, ist die frühzeitige Abstimmung mit der örtlichen Bauleitplanung erforderlich. Die Anforderungen gemäß 4. BImSchV sowie mögliche Störfallverordnungseinstufungen müssen bereits in der Planungsphase berücksichtigt werden.

Eine detaillierte Übersicht sowie Ausarbeitung der genehmigungsrechtlichen Belange ist im Anhang respektive in der Anlage „HRS und Genehmigungen“ zu finden.

3.5.1. Immissionsschutzrechtliche Genehmigungspflicht

Elektrolyseure unterliegen gemäß Anhang 1 Nr. 10.26 der 4. BImSchV grundsätzlich dem BImSchG. In Abhängigkeit von der Anlagengröße gelten zwei Varianten:

- Vereinfachtes Verfahren (§ 19 BImSchG): ab 5 MW elektrischer Leistung, unter 50 t H₂-Produktionskapazität pro Tag.
- Förmliches Verfahren (§ 10 BImSchG mit Öffentlichkeitsbeteiligung): ab 50 t Produktion/Tag, zusätzlich IE-Richtlinie anzuwenden (EU-Industrieemissionsrichtlinie).

Liegt die Anlagengröße unterhalb der Schwelle von 5 MW, entfällt die Immissionsschutzpflicht, jedoch sind dann in der Regel eine Baugenehmigung sowie ggf. betriebs- und wasserrechtliche Erlaubnisse erforderlich.

3.5.2. Bauordnungs- und Bauplanungsrecht

Die Zulässigkeit des Vorhabens nach BauGB richtet sich u. a. nach der Art der Nutzung und der Lage im Innen- oder Außenbereich. Immissionsschutzrechtliche Genehmigungen schließen gemäß § 13 BImSchG die Baugenehmigung mit ein (Konzentrationswirkung). Nicht immissionsschutzpflichtige Vorhaben benötigen eine eigenständige Baugenehmigung nach den Landesbauordnungen.

Im Außenbereich (§ 35 BauGB) sind Wasserstoffanlagen nur privilegiert zulässig, wenn sie im funktionalen Zusammenhang mit erneuerbaren Energieanlagen stehen (z. B. PV, Wind, vgl. § 249a BauGB).

3.5.3. Störfallrechtliche Anforderungen

Ab einer H₂-Gesamtlagerung von mehr als 5 t greift die Störfallverordnung (12. BImSchV). Dabei sind umfassende Betreiberpflichten umzusetzen, darunter die Erstellung eines Sicherheitskonzepts, die Information der Öffentlichkeit sowie der Nachweis technischer, organisatorischer und baulicher Schutzmaßnahmen. Ein „Betriebsbereich der oberen Klasse“ liegt ab 50 t vor. Die Schutzobjekte, zu denen Sicherheitsabstände einzuhalten sind, umfassen unter anderem Wohngebiete, öffentliche Einrichtungen und Verkehrswege. Die konkreten Abstände orientieren sich an KAS-18 bzw. KAS-63 und sind im Rahmen eines standortspezifischen Gutachtens zu ermitteln.

3.5.4. Betriebssicherheitsrecht und GasHDrLtgV

Für den Betrieb der Elektrolyseanlage ist gemäß § 18 BetrSichV ggf. eine Betriebssicherheitsrechtliche Erlaubnis erforderlich. Weiterhin besteht bei bestimmten Betriebsparametern eine Anzeigepflicht nach der Gashochdruckleitungsverordnung (GasHDrLtgV), etwa bei Wasserstoffrohrleitungen mit mehr als 16 bar Betriebsdruck

3.5.5. Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP)

Für Elektrolyseure mit ≥ 50 MW elektrischer Nennleistung ist eine Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) nach Anlage 1 Nr. 10.8 UVPg verpflichtend. Für Anlagen zwischen 5 und 50 MW erfolgt eine standortspezifische Vorprüfung zur UVP-Pflicht. Die UVP ist in das BImSchG-Verfahren integriert und nicht eigenständig durchzuführen.

3.5.6. Ausgangszustandsbericht (AZB)

Bei IE-relevanten Anlagen (z. B. ≥ 50 t H₂/Tag) ist ein Ausgangszustandsbericht (AZB) zu erstellen. Er dokumentiert den Zustand von Boden und Grundwasser vor Inbetriebnahme und dient als Referenz im Fall eines späteren Rückbaus

3.5.7. Risiko- und Gefährdungseinschätzung

Die Untersuchung möglicher Auswirkungen von Störfällen und Emissionen auf umliegende Wohngebiete, Schienenverkehr, Industrie und andere Nutzungen nach dem Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) ist von zentraler Bedeutung. Die Störfallverordnung (12. BImSchV) legt Schwellenwerte für gefährliche Stoffe fest, um zu bestimmen, welche Betriebe als Betriebsbereiche der unteren oder oberen Klasse eingestuft werden, woraus verschiedene Pflichten für den Anlagenbetreiber resultieren. Zum einen liegt die untere Mengenschwelle bei 5 t. Wird die obere Mengenschwelle von 50 t überschritten, wird der Betrieb als Betrieb der oberen Klasse eingestuft, was erweiterte Pflichten wie die Erstellung eines Sicherheitsberichts und die Einführung eines Sicherheitsmanagementsystems nach sich zieht.

Störfälle in Produktions- und Lageranlagen können erhebliche Auswirkungen auf Wohngebiete haben. Dazu gehören gesundheitliche Risiken durch die Freisetzung gefährlicher Stoffe, Explosionen oder Brände. Auch der Schienenverkehr kann beeinträchtigt werden, insbesondere durch die Freisetzung von Schadstoffen oder durch physische Schäden an der Infrastruktur. Benachbarte Industrieanlagen und andere Nutzungen können ebenfalls durch Störfälle betroffen sein, was zu Produktionsausfällen und wirtschaftlichen Verlusten führen kann.

Weiterhin sind zur Risikominimierung von Störfällen, Sicherheitsabstände zu Schutzobjekten, wie Bundesstraßen, Bahngleise und Wohngebiete, einzuhalten. Für Wasserstoff werden, abhängig von Betriebsdruck und Innendurchmesser der Verteilinfrastruktur Abstände zwischen 50 und 180 Metern zu Schutzobjekten empfohlen.

3.6. Bewertung der Umweltauswirkungen der Verkehrsemissionen

3.6.1. THG und Luftschadstoffemissionen

Die in dieser Untersuchung verwendeten Daten zu den direkten Emissionen von Lastkraftwagen (Lkw) basieren auf Angaben des Umweltbundesamtes aus dem Jahr 2022. Zur Berechnung der Luftschadstoff- und Klimagasemissionen des motorisierten Verkehrs wurde TREMOD (Transport Emission Model) herangezogen. Dieses Modell ermöglicht eine standardisierte und umfassende Bewertung der Emissionen des Verkehrssektors (24).

Es ist zu beachten, dass in der vorliegenden Analyse ausschließlich direkte Emissionen berücksichtigt wurden. Weitere Emissionen, die entlang der Wertschöpfungskette entstehen, wie beispielsweise in der Fahrzeugproduktion oder beim Kraftstofftransport, wurden nicht einbezogen.

Für die Stadt Rüsselsheim am Main wurde die durchschnittlich zurückgelegte Strecke pro Lkw mit 10 Kilometern angesetzt. Diese Distanz entspricht näherungsweise dem doppelten Abstand zwischen Stadtrand und Stadtmitte und dient als Annahmegrundlage für die Emissionsberechnung.

Die herangezogenen spezifischen Emissionswerte gelten für schwere (konventionell angetriebene⁷) Nutzfahrzeuge im Solobetrieb (z.B. Sattelzüge und Lastzüge) mit einer zulässigen Gesamtmasse von über 3,5 Tonnen.

⁷ Solange es nicht explizit anders benannt wird, meinen Fahrzeugbezeichnungen grundlegend Verbrennerfahrzeuge wie sie derzeit mehrheitlich zum Einsatz kommen.

Szenario 1 (10 MW)	direkte Emissionen	Anzahl Lkw	Strecke in Rüsselsheim a.M.	Zusätzliche direkte Emissionen
[-]	[g/km]	[-]	[km/Tag]	[kg/Tag]
Kohlendioxid	91,6	5	10	4,6
Stickoxide	10,4			0,5
NMVOC	3,5			0,2
Partikel	3,2			0,2
Schwefeldioxid	0,6			0,03

Tabelle 3-11: Szenario 1 Luftschadstoffemissionen

Szenario 2 (50 MW)	direkte Emissionen	Anzahl Lkw	Strecke in Rüsselsheim a.M.	Zusätzliche direkte Emissionen
[-]	[g/km]	[-]	[km/Tag]	[kg/Tag]
Kohlendioxid	91,6	20	10	18,3
Stickoxide	10,4			2,1
NMVOC	3,5			0,7
Partikel	3,2			0,6
Schwefeldioxid	0,6			0,1

Tabelle 3-12: Szenario 2 Luftschadstoffemissionen

Szenario 3 (200 MW)	direkte Emissionen	Anzahl Lkw	Strecke in Rüsselsheim a.M.	Zusätzliche direkte Emissionen
[-]	[g/km]	[-]	[km/Tag]	[kg/Tag]
Kohlendioxid	91,6	79	10	72,4
Stickoxide	10,4			8,2
NMVOC	3,5			2,8
Partikel	3,2			2,5
Schwefeldioxid	0,6			0,5

Tabelle 3-13: Szenario 3 Luftschadstoffemissionen

3.6.2. Lärmemissionen

Im Rahmen einer ersten orientierenden Betrachtung wurde eine überschlägige Berechnung der zusätzlichen Lärmemissionen durch ein erhöhtes Lkw-Aufkommen gemäß den Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen (RLS-19) durchgeführt. Ziel dieser Voruntersuchung war es, eine grobe Abschätzung der zu erwartenden Erhöhung des Beurteilungspegels infolge des Zusatzverkehrs in den drei definierten Szenarien vorzunehmen (25).

Als Datengrundlage dienten die Verkehrszahlen aus dem Jahr 2022, erhoben durch die Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen (BASt). Der betrachtete Streckenabschnitt erstreckt sich entlang der Bundesstraße B43, beginnend nach dem Bahnhof Mainz-Bischofsheim bis zur Höhe der Ölhafenbrücke in Raunheim.

Die Berechnungen zeigen eine Erhöhung des Mittelungspegels (Beurteilungspegel) in unmittelbarer Nähe der B43. Aussagen über eine potenzielle Lärmausbreitung in angrenzende

Wohngebiete können im Rahmen dieser überschlägigen Betrachtung jedoch nicht getroffen werden. Parkflächen sowie deren mögliche Einflussnahme auf die Lärmsituation wurden nicht in die Analyse einbezogen. Ebenso wurden Korrekturfaktoren, wie etwa solche zur Berücksichtigung der Oberflächenbeschaffenheit oder der Schallreflexion, nicht berücksichtigt.

Die angenommenen Fahrzeuggeschwindigkeiten entsprechen den an den jeweiligen Zählstationen geltenden Geschwindigkeitsbegrenzungen. Für Lkw mit einem zulässigen Gesamtgewicht von über 3,5 Tonnen erfolgte eine Anpassung der Geschwindigkeit entsprechend den Vorgaben der RLS-19. Insgesamt flossen Daten von fünf Verkehrszählstellen in die Berechnung ein. Die angenommenen zusätzlichen Lkw-Verkehre wurden gleichmäßig über 24 Stunden verteilt.

Folgende Erhöhungen wurden ermittelt:

Szenarien	Zusätzliche Lkw	Lr,t (6:00 bis 22:00 Uhr)	Lr,n (22:00 bis 06:00 Uhr)
[-]	[Stk]	[dB]	[dB]
Szenario 1 (10 MW)	4 (5)	+0,003 (+0,003)	+0,005 (+0,013)
Szenario 2 (50 MW)	16 (20)	+0,012 (+0,013)	+0,070 (+0,077)
Szenario 3 (200 MW)	63 (79)	+0,041 (+0,051)	+0,246 (+0,302)

Tabelle 3-14: Erhöhung des Beurteilungspegels entlang der B43 in Rüsselsheim am Main

Besonders hervorzuheben ist die stärkere Zunahme des Beurteilungspegels während der Nachtzeit (22:00–06:00 Uhr), die sich aus der insgesamt geringeren stündlichen Verkehrsstärke sowie dem relativ höheren Anteil an Lkw ergibt.

Für eine belastbare und differenzierte Beurteilung der zusätzlichen Lärmemissionen ist die Erstellung eines ausführlichen Lärmschutzgutachtens zwingend erforderlich.

3.7. Standortanalyse für Wasserstofftankstellen

Im Rahmen der Potenzialstudie zum Aufbau eines regionalen Wasserstoffclusters wird die Errichtung einer öffentlichen Wasserstofftankstelle (HRS – Hydrogen Refueling Station) als wichtiger Bestandteil einer zukünftigen H₂-Infrastruktur in Rüsselsheim am Main betrachtet. Die geplante Tankstelle soll dabei unabhängig vom konkreten Standort der Wasserstoffherzeugung an einem geeigneten Ort im Stadtgebiet errichtet werden und als eigenständiger Infrastrukturbestandteil fungieren, auch wenn eine enge Verbindung zur lokalen Produktion in der überwiegenden Mehrheit der Fälle wirtschaftlich sinnvoll sein wird. Im Rahmen der Standortprüfung ist zu unterscheiden zwischen öffentlich zugänglichen Betankungseinrichtungen und nicht-öffentlichen, meist depotbasierten Lösungen für geschlossene Flotten (bspw. ÖPNV). Beide Varianten weisen unterschiedliche Anforderungen hinsichtlich Fläche, Anlieferung und Betrieb auf. Eine direkte Anbindung an Elektrolyseure oder Zwischenlager senkt den logistischen Aufwand und erhöht die Versorgungssicherheit. Solche Near-Site- oder On-Site-Lösungen sind in Rüsselsheim am Main möglich, sofern Grundstückszuschnitt und planungsrechtliche Grundlagen dies zulassen, wurden aber in der Analyse aufgrund Planungstiefe außer Acht gelassen.

Rüsselsheim am Main verfügt über eine gute verkehrliche Erreichbarkeit im regionalen Kontext, insbesondere durch die Nähe zur A60, die Nähe zum Flughafen Frankfurt und die Anbindung an das regionale und überregionale Verkehrsnetz. Diese Ausgangslage unterstützt die Etablierung eines Versorgungsangebots, das nicht nur den Bedarf innerhalb der Stadtgrenzen, sondern auch aus dem Umland bedienen kann.

Die Einführung einer Wasserstofftankstelle eröffnet für Rüsselsheim am Main vielfältige Potenziale. Im Bereich der Mobilität kann sie einen signifikanten Beitrag zur Dekarbonisierung leisten – insbesondere bei Anwendungen, bei denen batterieelektrische Antriebe an ihre Grenzen stoßen. Dazu können zum Beispiel Busse, kommunale Nutzfahrzeuge, schwere Logistiktransporte oder auch potenziell wasserstoffbetriebene Fahrzeuge in Industrie und Zulieferverkehr zählen. Wasserstoff ist als eine leistungsfähige Ergänzung zur vorhandenen Antriebslandschaft zu verstehen, wobei eine öffentliche Tankstelle die notwendige Infrastruktur darstellt und gleichzeitig die Einstiegshürden für Flottenbetreiber und Unternehmen senkt.

Wirtschaftlich betrachtet entstehen durch Planung, Bau und Betrieb einer Wasserstofftankstelle direkte und indirekte Wertschöpfungseffekten. In Kombination mit der Wasserstoffherzeugung auf dem Opel/Stellantis-Areal sowie weiteren möglichen Projekten wie Rechenzentren, Wärmenetzen oder Logistikutnutzungen lassen sich Synergien identifizieren. Eine H₂-Versorgungsinfrastruktur ist als Innovationsimpuls zu werten, da wasserstoffbasierte Lösungen dadurch in Betracht gezogen werden können. Langfristig unterstützt die Tankstelle die schrittweise Entwicklung eines Wasserstoffökosystems in Rüsselsheim am Main. Als physische Schnittstelle zwischen Produktion und Anwendung kann sie Kristallisationspunkt zu einem H₂-Wertschöpfungskreislauf bilden. Je nach Einbindung in bestehende und künftige Planungen kann dadurch ein Beitrag zur nachhaltigen Mobilität, Wasserstoffwirtschaft und klimagerechter Stadtentwicklung geleistet werden.

Die öffentliche Sichtbarkeit der Technologie fördert die Akzeptanz in der Bevölkerung und ermöglicht eine breitere Auseinandersetzung mit alternativen Antrieben. Die Tankstelle kann als Ort für Informations- und Bildungsformate genutzt werden, Pilotprojekte begleiten und einen realen Beitrag zur Klimaschutzkommunikation leisten.

Eine standortnahe Wasserstoffherzeugung auf dem Opel/Stellantis-Areal schafft die Möglichkeit einer lokalen, emissionsfreien Versorgung. Je nach konkretem Standort und Auslegung lassen sich weitere Umweltvorteile aktivieren, etwa durch intelligente Integration in bestehende Infrastrukturen, Wärmenutzung oder Verknüpfung mit regenerativen Energien. Dadurch kann der ökologische Nutzen der Tankstellen erhöht werden.

Die Errichtung einer Wasserstofftankstelle in Rüsselsheim am Main stellt ein zentrales Element für die Umsetzung einer lokalen Wasserstoffstrategie dar. Ermöglicht wird zunächst der konkrete Einstieg in die Anwendung von Wasserstoff im Verkehrssektor. Darüber hinaus kann sie als Impulsgeber für wirtschaftliche, gesellschaftliche und ökologische Transformationen wirken und so auf die Etablierung eines lokalen Wasserstoffclusters hinarbeiten.

3.7.1. Technische Machbarkeit – Stromversorgung & Tankstellentechnik

Eine Wasserstofftankstelle für den schweren Straßengüterverkehr erfordert einen ausreichend dimensionierten Netzanschluss und erfordert eine stabile Stromversorgung. Der Bedarf entsteht u.a. durch den Einsatz von Kompressoren, Kälteaggregaten und Betankungseinheiten. Der genaue Strombedarf hängt wesentlich von der gewählten Liefer- und Speichertechnik (gasförmig oder flüssig), dem angestrebten Tagesdurchsatz sowie dem Befüllkonzept ab. Die Befüllung eines Drucktanks wird von den Drücken im Lagerbehälter, dem Verdichter und dem Druckniveau im Tank beeinflusst. Zum Erreichen der erforderlichen Druckniveaus (350 bar oder 700 bar) werden i.d.R. mehrstufige Verdichter eingesetzt, deren elektrische Anschlussleistung mehrere 100 kW betragen kann. Da Wasserstoff zur normkonformen Betankungen bei 700 bar vorgekühlt werden muss, sind Kältemaschinen notwendig. Auch für 350 bar kann je nach erforderlicher Betankungsgeschwindigkeit eine Vorkühlung notwendig werden. Die Betankungseinheit selbst benötigt elektrische Energie für Kompressoren, Pumpen, Sensorik, Aktorik

und Kommunikationseinheiten. Je nach Betankungsart müssen 2,3–4,4 kWh/kg für die tankgerechte Verdichtung und Kühlung des Wasserstoffs aufgewandt werden (26).

Laut H2 MOBILITY, dem Betreiber des größten öffentlichen Wasserstofftankstellennetzes Europas, ist bei rein gasförmiger Belieferung der elektrische Bedarf höher, da sowohl Hochdruckkompressoren als auch Vorkühler zum Einsatz kommen müssen (15). Wird hingegen kryogener Wasserstoff (sLH₂ oder CcH₂) angeliefert, reduziert sich ein Teil der elektrischen Leistung am Ort der Betankung und verlagert sich zum Ort der Verflüssigung. In beiden Fällen sind für Stationen mit mittlerem bis hohem Durchsatz mittelspannungsseitige Netzanschlüsse empfehlenswert. Deren Realisierbarkeit und Dimensionierung hängt von Standortnähe zu Übergabepunkten sowie der lokalen Netzkapazität ab.

Eine konkrete Leistungsangabe kann derzeit mangels belastbarer Netz- und Komponentenplanung nicht getroffen werden. Die Systemarchitektur sollte jedoch – insbesondere bei CGH₂ 700-bar-Anwendungen – für Lastspitzen technisch vorbereitet sein⁸.

Der Platzbedarf variiert je nach Tanktechnologie und gewünschter Kapazität. Für die sogenannten L- bis 2XL-Stationen im Schwerlastbereich sind laut H2 MOBILITY mehrere hundert Quadratmeter notwendig, um Dispenser, Sicherheitsabstände, Trailerzufahrt, Speicher und gegebenenfalls Verdichter aufzunehmen (15). Bei Verwendung flüssiger Wasserstoffsysteme kann die Fläche durch Reduktion der Niederdruck und Mitteldruckspeicher verringert werden. Für eine belastbare Aussage zum Flächenbedarf ist eine konkrete Anlagenplanung erforderlich.

Die technische Machbarkeit ist grundsätzlich gegeben, für eine belastbare technische Standortbewertung sind folgende Punkte im weiteren Planungsverlauf zu klären:

- Netzanschluss am jeweiligen Standort durch Anfrage beim Netzbetreiber
- Auswahl der Versorgungs-, Speicher und Betankungstechnologie (GH₂, LH₂, CcH₂)
- Tagesdurchsatz und paralleler Betrieb (Redundanzen)
- Speicher- und Befüllkonzept
- Sicherheitsabstände, Pufferspeicher, Versorgungslogistik (z.B. durch Trailer).

3.7.2. Versiegelung und Tragfähigkeit

Die Wiederverwendung versiegelter Flächen stellt aus planungsrechtlicher Sicht einen Vorteil dar, da i. d. R. keine zusätzlichen Flächenversiegelungen beantragt werden müssen.

Darüber hinaus sind folgende technische Aspekte zu prüfen:

- Tragfähigkeit: Aufgrund des unbekannten Aufbaus des bestehenden Oberbaus (Beton/Asphalt) und darunterliegender Schichten ist ein Bodengutachten zwingend erforderlich.
- Altlastenrisiko: Es besteht potenzieller Handlungsbedarf hinsichtlich Altlastenprüfung und Bodenfreimeldung – vor allem bei Erdarbeiten, Leitungseinzügen oder Versickerungsflächen.

⁸ Aufgrund aktuell fehlender Detailinformationen zur Strominfrastruktur an den potenziellen Tankstellenstandorten wird bei der Standortanalyse unterstellt, dass ein ausreichender Netzanschluss grundsätzlich herstellbar ist. Eine abschließende Bewertung der Anschlussmöglichkeiten und -kosten ist nur in Abstimmung mit dem zuständigen Netzbetreiber möglich

3.7.3. Standortkriterien für Wasserstofftankstellen

Um einen geeigneten Standort für eine Wasserstofftankstelle zu finden, wurde das gesamte Gemeindegebiet der Stadt Rüsselsheim am Main auf geeignete Flächen hin untersucht. Das Gemeindegebiet kann als Gesamtpotenzialfläche verstanden werden.

Im weiteren Analyseprozess wurden ungeeignete Flächen von der Gesamtpotenzialfläche abgezogen. Ausgeschlossen wurden zunächst Flächen, die aufgrund physikalischer Restriktionen nicht geeignet sind. Dazu zählen Flächen mit einem ungeeigneten Geländeprofil, Gewässerflächen sowie Flächen mit unzureichender Tragfähigkeit. Danach wurden die Flächen abgezogen, die aufgrund genehmigungsrechtlicher Tatsachen als Ausschlussflächen zu definieren sind. Die genehmigungsrechtlichen Anforderungen sind denen einer Elektrolyseanlage ähnlich und orientieren sich an der vorhandenen Menge Wasserstoff auf dem Betriebsgelände für die Störfallverordnung und am installierten Speichervolumen bei der Genehmigung nach vierter BImSchV. Bei der Standortsuche wurden demzufolge Ausschlusskriterien auf Basis des BImSchG abgeleitet. Hierzu wurden von der Gesamtfläche solche Flächen abgezogen, die im RegFNP, also in der vorbereitenden Bauleitplanung als Wohngebiet, landwirtschaftlich genutzte Bereiche, Erholungs- und Freizeitgebiete sowie Schulen, Altersheime, Krankenhäuser und ähnliche immissionssensible Orte gekennzeichnet sind. Auch Flächen in genehmigungsrelevanten Schutzgebieten wurden abgezogen.

Nach diesem initialen Ausschlussprozess wurden eine Potenzialfläche mit definitiven Ausschlusskriterien sowie eine Potenzialfläche mit erweiterten Ausschlusskriterien ausgegeben. Letztere schließt landwirtschaftliche Flächen aus, während die erste, diese mit umfasst, in der Annahme, dass ein Planänderungsverfahren auf landwirtschaftlichen Flächen prinzipiell mit Aussicht auf Erfolg angestrebt werden könnte.

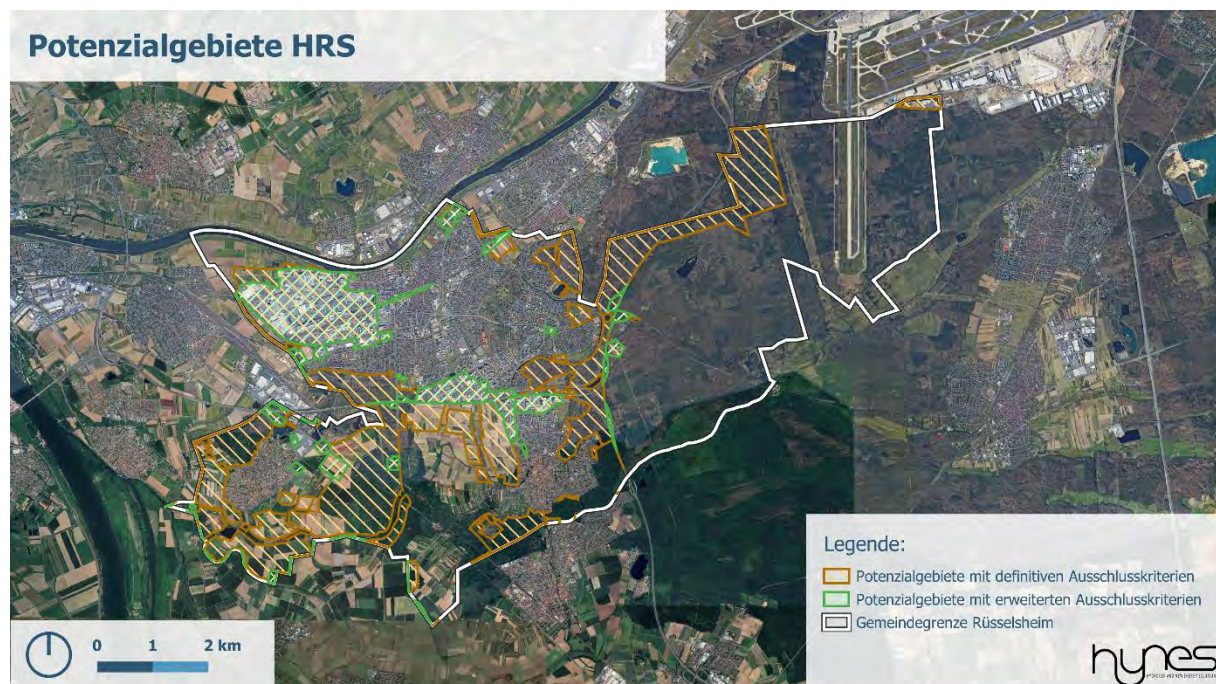


Abbildung 3-12: Übersicht HRS-Potenzialflächen- (eigene Darstellung)

Anschließend wurden die Flächen in einer Luftbildanalyse auf Potenzialstandorte hin untersucht. Hierbei wurde kein selektiver Suchansatz verfolgt, sondern ein negatives Auswahlverfahren. Ungeeignete Flächen wurden mittels definierter Ausschlusskriterien sukzessive aus dem Untersuchungsraum eliminiert, um so eine belastbare Vorauswahl theoretisch geeigneter Flächen zu generieren, die in einem nachgelagerten Schritt vertiefend bewertet werden

können. Dazu wurden Flächen, die zu weit von einem öffentlichen Zufahrtsweg entfernt sind, sowie Flächen, die zu klein sind aus dem Betrachtungsraum ausgeschlossen und bereits bebaute Flächen wurden weitestgehend ausgeschlossen.

Auf dieser Grundlage konnten zunächst 31 Potenzialflächen identifiziert werden, die den grundlegenden Anforderungen genügten. Diese wurden im weiteren Verlauf räumlich zusammengefasst – beispielsweise bei räumlicher Nähe oder funktionalem Zusammenhang – so dass abschließend 15 eigenständige Potenzialstandorte zur vertieften Bewertung herangezogen werden konnten.

Diese wurden anschließend anhand einer standardisierten Bewertungsmatrix hinsichtlich infrastruktureller, betrieblicher, genehmigungsrechtlicher, wirtschaftlicher und strategischer Kriterien systematisch analysiert und miteinander verglichen.

Bewertung

Die Bewertungsmatrix basiert auf einem gewichteten Scoring-Modell. Die Kriterien wurden aus raumplanerischen, genehmigungsrechtlichen, infrastrukturellen und betrieblichen Anforderungen abgeleitet. Ergänzt wurde dies um wirtschaftliche und strategische Faktoren, die eine erfolgreiche Umsetzung begünstigen. Für die Blaupause wurden über 19 Einzelfaktoren in fünf Kategorien definiert. Jedes Kriterium kann auf einer Skala (0–10 Punkte) bewertet werden. Eine höhere Punktzahl steht für eine höhere Standortqualität im jeweiligen Kriterium. Die Bewertungen basieren auf raumbezogenen Daten, Luftbildanalysen sowie Planungserfahrungen aus vergleichbaren Projekten.

Konkret für Rüsselsheim am Main wurde im Anschluss an den Ausschlussprozess für die verbleibenden 15 Potenzialstandorte eine systematische Standortbewertung durchgeführt. Ziel war es, die Flächen anhand objektiver, praxisrelevanter Kriterien miteinander zu vergleichen.

Zur Gesamtauswertung wurde für jeden Standort ein Summenwert sowie ein prozentualer Score (bezogen auf die maximale Punktzahl) berechnet. Diese Endwerte ermöglichen eine transparente, nachvollziehbare Rangfolge der Standorte.

Die Bewertungsmatrix im konkreten Fall umfasst 15⁹ Einzelfaktoren:

Kategorie	Faktoren
Infrastrukturelle Anbindung	Entfernung zu Autobahn/Bundesstraße Qualität der Zufahrtswege (insb. Schwerlastbefahrbarkeit) Stauwahrscheinlichkeit, Engpassfreiheit, Erreichbarkeit ohne Wohngebietsdurchfahrt Entfernung zu H ₂ -Kernnetz bzw. Länge einer notwendigen Stichleitung
Betriebliche Eignung	Flächengröße und Zuschnitt (z.B. rechteckig, zusammenhängend) Altlastenfreiheit und geringe Vorbelastung durch Bebauung Nähe zu bestehenden konventionellen Tankstellen (Synergiepotenzial) Möglichkeit separater Ein- und Ausfahrten
Genehmigungs- und Planungsaspekte	Bodenqualität (→ Ertragspotenzial und Bodenfunktionsbewertung) Dimensionierung der Abstände zu immissionssensiblen Nutzungen
wirtschaftliche Voraussetzungen	Bodenrichtwert (16) als Indikator für Investitionskosten

⁹ In einer umfassenderen Version, die ein größeres Gebiet zu analysieren vermag (Blaupause) gibt es 19 Kriterien, also 4 zusätzliche, die in Rüsselsheim nicht anzuwenden waren (Datenverfügbarkeit, konkrete Irrelevanz, n.A., o.Ä.).

strategische
Synergiepotenziale

Anzahl und Kosten notwendiger Erschließungsmaßnahmen (Verkehr, Netzanschlüsse etc.)

Entfernung zu Speditions- und Logistikdienstleistern

Nähe zu bestehenden oder geplanten Wasserstoffprojekten¹⁰

Tabelle 3-15: Einzelfaktoren der HRS Standortanalysematrix



Abbildung 3-13: Methodisches Vorgehen bei der HRS Standortanalyse in Rüsselsheim am Main

3.7.4. Flächenpotenzial und Nutzbarkeit

Die beschriebenen Bewertungskriterien wurden an den 15 Potenzialstandorten in Rüsselsheim am Main angewandt, von denen 11 im iterativen Analyseprozess keine Ausschlusskriterien aufweisen. Die Bewertungsspanne liegt zwischen 122 und 54 bei 160 möglichen Punkten respektive zwischen 78 % und 34 %.

¹⁰ Im konkreten Fall wurde nur der geplante Elektrolyseur in Rüsselsheim am Main berücksichtigt

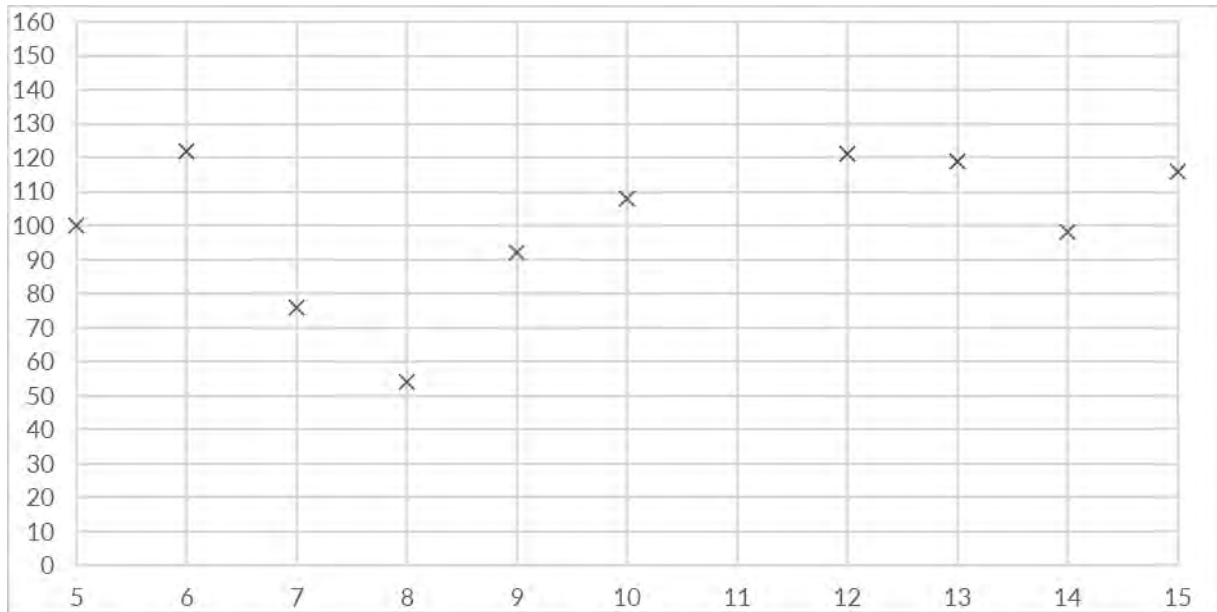


Abbildung 3-14: Potenzialstandorte (X-Achse) und deren Bepunktung (Y-Achse) (eigene Darstellung)

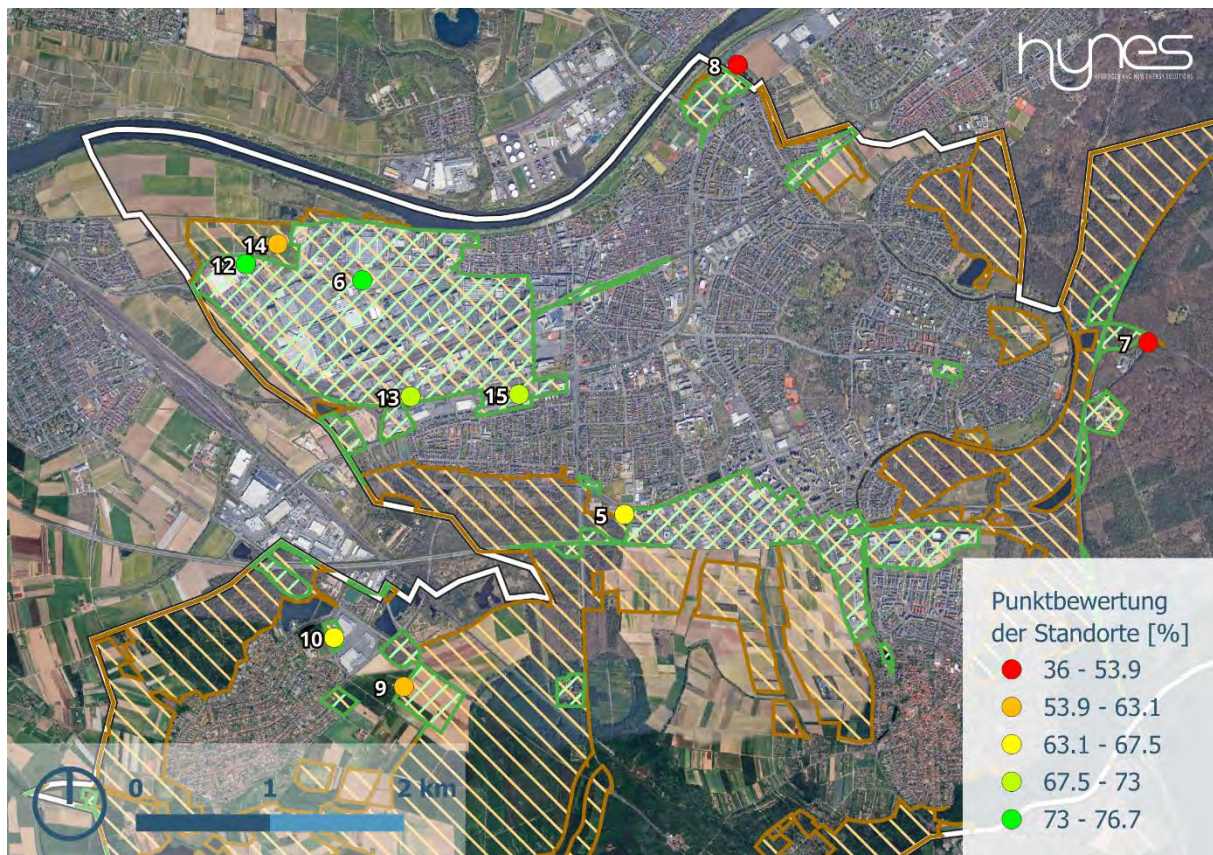


Abbildung 3-15: Lage und Bewertung der Potenzialstandorte (eigene Darstellung), Einzeldarstellungen aller Potenzialstandorte sind im Anhang zu finden - Standorte 1-4 sowie 11 sind aufgrund von im Bewertungsprozess offenkundig gewordenen Ausschlusskriterien nicht weiter Teil der Betrachtung

Die Potenzialstandorte, die mehr als 115 Punkte in ihrer Bewertung haben, werden im Folgenden kurz beschrieben.



Abbildung 3-16: Verortung und Bewertung HRS-Potenzialstandort 6

Potenzialstandort 6 befindet sich an der Mainzer Straße auf Höhe der Bushaltestellen Opel Tor 60 und damit unmittelbar auf den Untersuchungsflächen Mainzer Straße Süd/K-Areal und Mainzer Straße Nord/M-Areal. Um die Nutzungskonkurrenz zu minimieren, wurden mehrere Flächen am Potenzialstandort 6 zusammengefasst, von denen die mit dem geringsten Raumwiderstand zum Planungs- und Umsetzungszeitpunkt der Tankstelle ausgewählt werden kann. Mit Blick auf den Bau des grEEn-Campus, fallen die südlich der Mainzer Straße betrachteten Teilfläche des Potenzialstandortes 6 weg, sodass nur noch die beiden eingezeichneten Teilflächen auf dem Areal der Mainzer Straße Nord denkbar wären. Die angedachten Flächen des Potenzialstandorts werden derzeit als Parkplatz genutzt. Die Verkehrsanbindung ist befriedigend: Die Lage an der Mainzer Straße verspricht zwar gute Erreichbarkeit, auch im Hinblick auf die Schwerlastbefahrbarkeit, ist jedoch von Autobahnen und Bundesstraßen sowie deren Knotenpunkten weiter entfernt¹¹. Die Entfernung zum vorgesehenen Verlauf des Wasserstoffkernnetzes liegt mit etwa 800 m Distanz im mittleren Bereich. Davon abgesehen, sind die Flächen großzügig und gut¹² für die Komponenten geschnitten und sind von immissionssensiblen Orten sehr weit¹³ entfernt. Durch die bisherige Nutzung als Parkplatz, ist auch das Einrichten separater Ein- und Ausfahrten und Zufahrten zu mehr als einer Straße möglich, was für die Schwerlastantriebsbarkeit flexible Lösungen bedeutet. Zudem ist eine Verbindung mit der in unmittelbarer Nachbarschaft liegenden Bestandstankstelle hier realistisch umsetzbar. Die Lage direkt an den Opel-/Stellantiswerken ist zwar hinsichtlich der Synergien mit dem Elektrolyseprojekt und auch hinsichtlich der notwendigen Erschließungen

¹¹ direkter Zugang zu B43, ca. 4 km bis A671

¹² Die Güte eines Flächenzuschnitts ist an Rechteckigkeit und Zusammenhang der Fläche bewertet

¹³ > 250m

sehr gut, birgt auch das Risiko von Altlasten, welche nicht an den Standorten selbst aber in mittelbarer Umgebung dokumentiert sind (siehe Abbildung 3-1).

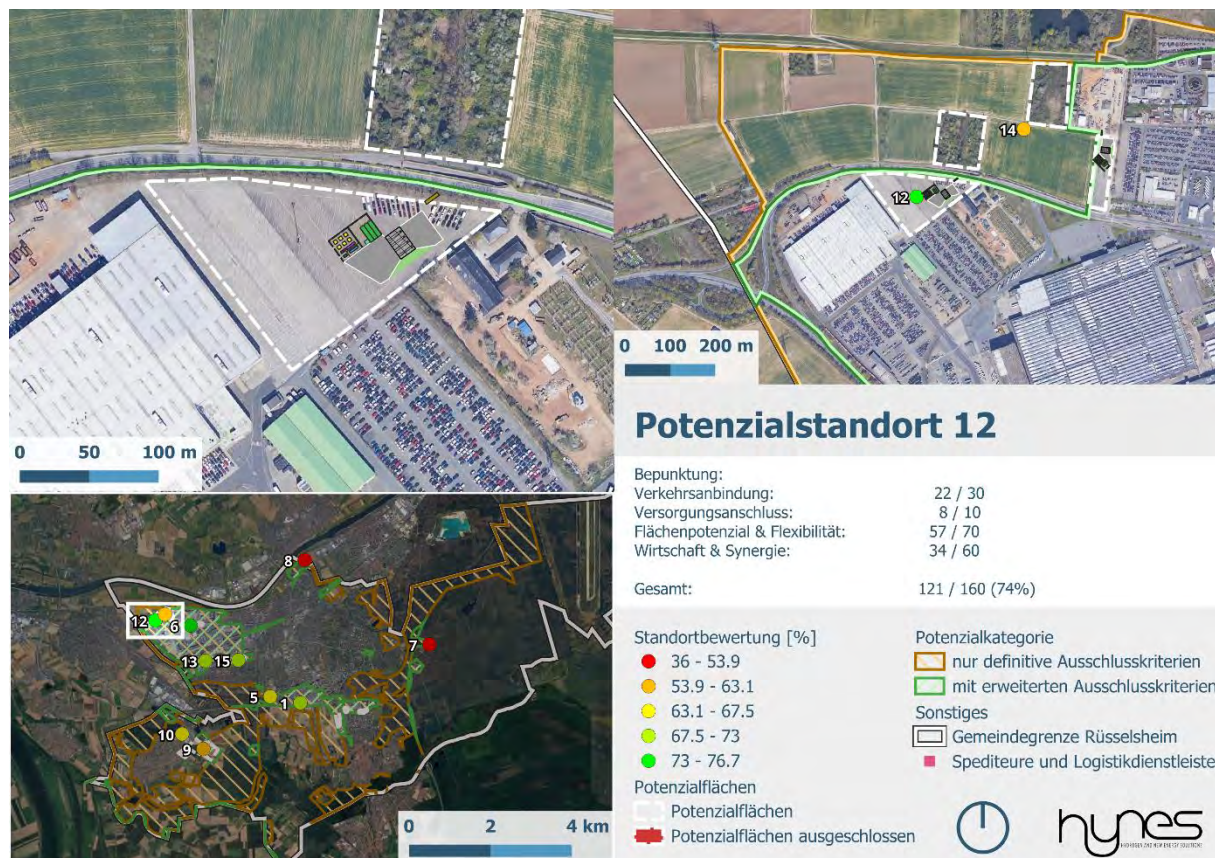


Abbildung 3-17: Verortung und Bewertung HRS-Potenzialstandort 12

Auch **Potenzialstandort 12** liegt an der Mainzer Straße und ist ebenfalls auf einer derzeit zum Parken genutzten Fläche angedacht: Wird der Mainzer Straße westwärts von Standort 6 gefolgt, befindet sich auf dem Untersuchungsgelände „Gewerbepark West“ ein 1720 m² großer asphaltierter Parkplatz, welcher direkt südlich an die Mainzer Straße anschließt. Die Anbindung an überregionale Straßen ist mit ~ 4km bis zur A671 mittelmäßig, der Abstand zu immissionssensiblen Orten jedoch liegt wie bei der vorher beschriebenen Fläche weit über den genehmigungskritischen 200m und ist damit als sehr gut zu bewerten. Die Entfernung zum geplanten Verlauf des Wasserstoffkernnetzes ist mit ~350m gering, eine Verbindung mit einer bestehenden Tankstelle in der Nähe ist hingegen erschwerter, da die nächste Tankstelle über 500m Luftlinie entfernt liegt. Das Gelände hat einen guten Zuschnitt¹⁴, ist bereits versiegelt sowie altlastenfrei und auch der Bodenrichtwert und die Nähe zum Elektrolyseprojekt sind für die Planung und den Bau einer Tankstelle günstig. Logistikdienstleister sind jedoch nicht in funktionaler Nähe und auch die infrastrukturelle Erschließung ist – aufgrund der rezenten Flächennutzung als Parkplatz – in Teilen in Frage zu stellen, jedoch weitestgehend unbekannt. Die derzeitige Zufahrt zur Mainzer Straße müsste ausgebaut werden, bietet aber auch dann wenig Planungsflexibilität aufgrund des anschließenden Nachbargrundstücks.

¹⁴ Siehe Fußnote 12d

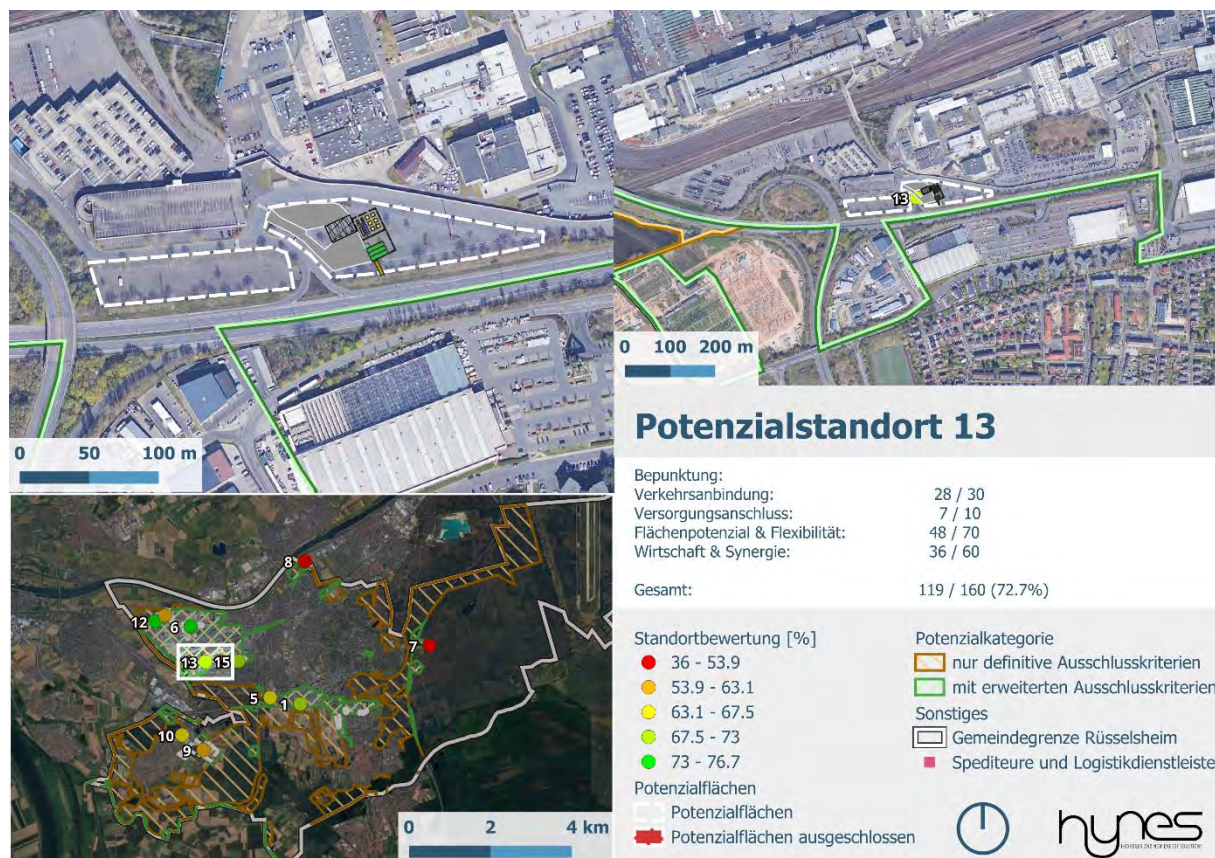


Abbildung 3-18: Verortung und Bewertung HRS-Potenzialstandort 13

Potenzialstandort 13 liegt an der B43 am Untersuchungsgebiet Rugbyring West. Auch die hier ausgemachten Flächen dienen derzeit dem Abstellen von Kraftfahrzeugen. Die Anbindung an das überregionale Straßennetz als auch die Schwerlastbefahrbarkeit sind im mehr als befriedigenden Ausmaß gegeben. Ein Anschluss an das Wasserstoffkernnetz an Standort 13 ist aufgrund der geringen Distanz (> 500m) zum geplanten Verlauf ebenfalls als aussichtsreich bewertet. Die Flächen liegen zudem, umgeben von Gewerbeflächen, weit entfernt von immissionssensiblen Orten¹⁵ und durch die bereits bestehende Versiegelung, bietet auch die Bodenbeschaffenheit für eine Tankstellennutzung gute planungsrechtliche Voraussetzungen. Altlasten und Bebauung, die unter Umständen nicht unerhebliche Planungsschwierigkeiten bereiten können, sind ebenfalls nicht vorhanden, weswegen die Negativaspekte hinsichtlich der Flächenbeschaffenheit, der Zuschnitt der Fläche und die Möglichkeit zum flexiblen Platzen von Zufahrten gegeben sind. Logistikdienstleister sind in funktionaler Nähe keine ausgemacht worden und auch keine Bestandstankstelle, weshalb keine synergetischen Potenziale zu erwarten sind. Die Potenzialflächen für das vorgesehene Elektrolyseprojekt schließen direkt an den Potenzialstandort an und bieten daher Synergiepotenziale. Zuletzt wird auch davon ausgegangen, dass die notwendigen Erschließungsmaßnahmen weitestgehend durchgeführt sind. Auch wenn die bisherige Nutzung nicht den Erschließungsstandard einer Tankstellennutzung vollumfänglich entsprechen dürfte, wird der Anschluss ob der Lage im Gewerbegebiet als geringe Hürde eingeschätzt.

¹⁵ Tatsächlich ist das nächste Wohngebäude 180m entfernt. Den Potenzialstandort und die nächsten Wohnhäuser trennen jedoch eine 4-spurige Bundesstraße und ein Baumarkt mit entsprechendem Geräuschpegel und Parkplatz

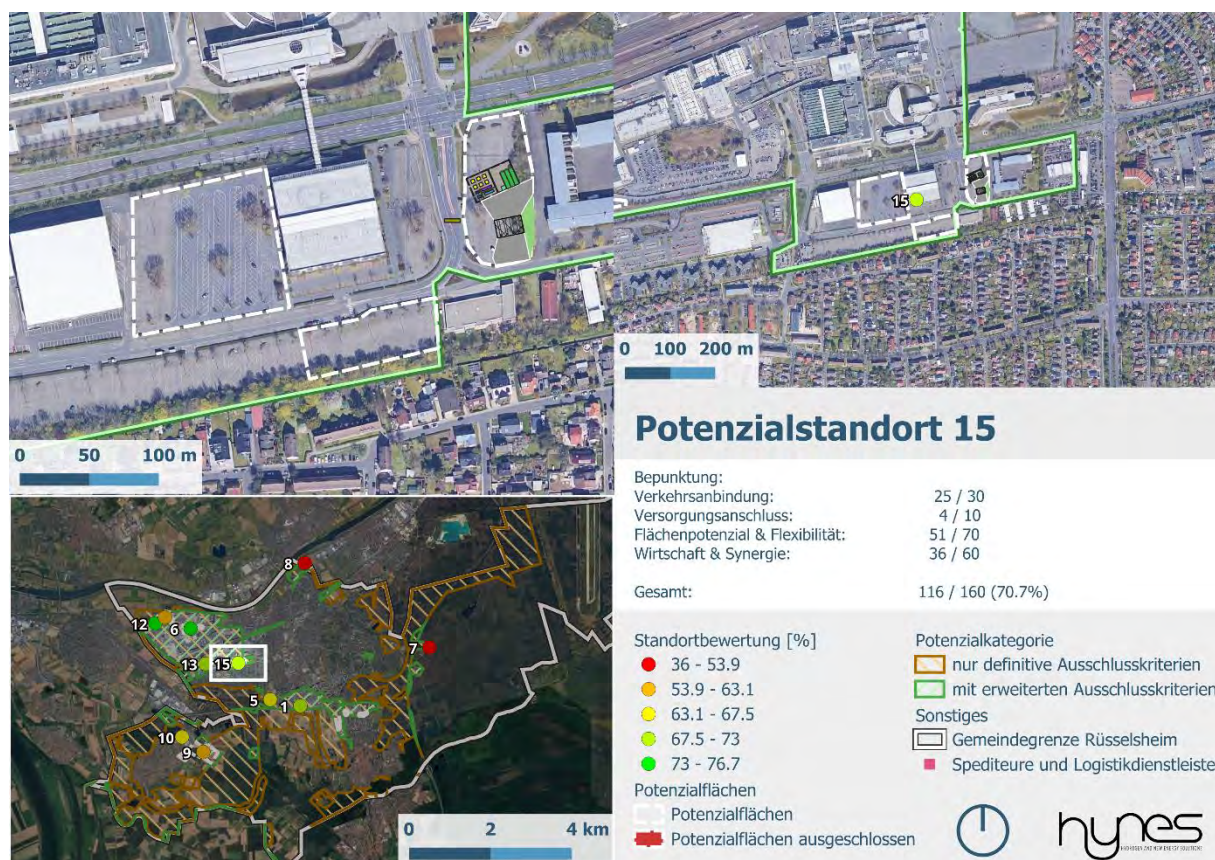


Abbildung 3-19: Verortung und Bewertung HRS-Potenzialstandort 14

In direkter Nachbarschaft vom gerade beschriebenen Standort 13 befindet sich der **Potenzialstandort 15**: Wird die B43 weiter Richtung Osten verfolgt, sind unmittelbar südlich der Straße einige Parkplätze, welche den Potenzialstandort 15 bilden. Auch hier wurden mehrere Flächen in engster Nachbarschaft zusammengelegt, um Platzierungsoptionen offenzuhalten. Es wird nicht die Gesamtfläche benötigt. Bei Potenzialstandort 15 ist die Anbindung an das überregionale Straßennetz und die Schwerlastbefahrbarkeit sehr gut¹⁶. Ebenso sind andere lagebezogenen Bewertungskriterien gleich zum vorig beschriebenen Standort 13: Das Synergiepotenzial mit dem Elektrolyseprojekt ist sehr gut, das mit Logistikdienstleistern aufgrund der großen Distanz hingegen weniger. Die Länge für eine potenzielle Sticheleitung ist mit über 1km Luftlinie vergleichsweise lang und damit teurer als bei Standort 13. Der Flächenzustand hinsichtlich der Altlasten und der Bebauung, die Bodenbeschaffenheit und der Zuschnitt der Flächen am Standort sind hingegen ideal. Eine Bestandstankstelle ist nicht im funktionalen Umfeld zu finden und auch der Abstand zu immissionssensibler Bebauung ist ungünstig gering (~80m), was zu Planungs- und Betriebseinschränkungen führen kann. Das Errichten von separaten Ein- und Ausfahrten ist möglich. Wie bei den Flächen des Standorts 13 kann für den günstigen Bodenrichtwert und den hohen Erschließungsgrad eine gute Bewertung abgegeben werden.

3.8. Wasserstoff im Schienenpersonen- und Güterverkehr

Das Opel/Stellantis-Gelände verfügt über einen Anschluss an den Schienenpersonen und Schienengüterverkehr. Im Rahmen der infrastrukturellen Ausbauplanung stellt sich daher die

¹⁶ Unmittelbar an B43 und B519, ca. 1,5km bis A60 Anschlussstelle 28; Zufahrtsstraßen in sehr gutem Ausbau- und Sanierungszustand

Frage, ob und in welcher Form die vorhandene Schieneninfrastruktur in die Wasserstoffproduktion, -verteilung oder -anwendung eingebunden werden kann. Neben der potenziellen Nutzung wasserstoffbetriebener Schienenfahrzeuge steht auch der Transport von Wasserstoff per Güterzug als Option zur Verfügung. Der folgende Abschnitt beleuchtet den aktuellen Stand der Technik beider Anwendungsbereiche, bewertet deren Umsetzbarkeit unter aktuellen Rahmenbedingungen und ordnet die Relevanz für den Standort Rüsselsheim ein.

3.8.1. Einsatz von Wasserstoffzügen – Stand der Technik

Die Anwendung von Wasserstoffantrieben im Schienenverkehr wird derzeit vor allem im Bereich nicht elektrifizierter Regionalstrecken erprobt. Zwar konnten in den letzten Jahren erste Systeme in den regulären Betrieb überführt werden, etwa der „Coradia iLint“ von Alstom in Niedersachsen (27), dennoch bleibt die technische- und betriebliche Reife begrenzt (28). Die Marktreife ist verglichen zu Oberleitungs- oder Dieselfahrzeugen niedrig, die Infrastrukturanforderungen sind hoch, und die Total cost of ownership (TCO) liegen zwischen 40 % bis 60 %¹⁷ über denen konventionell elektrischer Antriebe (29). Tabelle 3-16 stellt die jeweiligen Stärken und Schwächen der technischen Ansätze gegenüber.

Wasserstoff-Batteriehybride Züge (HEMU - Hydrogen Electric Multiple Unit) ¹⁸		Batteriehybride-Züge (BEMU - Battery Electric Multiple Units) ¹⁹	
Pro	Kontra	Pro	Kontra
Hohe Reichweite Hohe Einsatzflexibilität Niedriger (punktueller) Infrastrukturbedarf im Schienennetz	Genehmigungs-rechtliche Herausforderungen bei Wasserstofftankstellen Betrieblicher Mehraufwand für Betankung Niedriger Well-to-Wheel Wirkungsgrad Neue (resiliente) Versorgungsinfrastruktur für H2 notwendig	Überbrückung bei lückenhafter Elektrifizierung Mittlerer Well-to-Wheel Wirkungsgrad Lückenschluss der Elektrifizierung kann zeitlich versetzt stattfinden	Geringe Reichweite Ausbaubedarf in der Fläche Geringe Einsatzflexibilität

Tabelle 3-16: Gegenüberstellung von XEMU und BEMU

Im Güterverkehr sind die technischen Anforderungen an Traktion, Reichweite und Energieversorgung höher als für den Personenverkehr, was die technische Umsetzung und den Einsatz von Wasserstoffantrieben herausfordernder gestaltet (30). Alstom hat angekündigt, einen ersten wasserstoffbetriebenen Güterzug 2025 auf die Schiene zu bringen (31).

Ein Pilotprojekt mit regionalem Bezug ist die Umstellung der Taunusbahn im Rhein-Main-Gebiet auf Wasserstoffbetrieb. Hier sollten insgesamt 27 Brennstoffzellenzüge beschafft und über eine zentrale Infrastruktur im Industriepark Höchst mit Wasserstoff versorgt werden. Das

¹⁷ Annahmen der Studie konnten nicht abschließend bewertet werden.

¹⁸ „In Zügen mit Wasserstoffantrieb (Hydrogen Electric Multiple Unit / HEMU) erzeugt eine Brennstoffzelle durch Verbrennung von Wasserstoff konstant Strom in einer optimalen Dauerleistung, der in einer Pufferbatterie gespeichert wird. Der Strom aus der Pufferbatterie treibt einen Elektromotor an, der so auch höhere Lastanforderungen bewältigen kann.“ [DB-Regio]

¹⁹ „Batteriezüge (Battery Electric Multiple Units / BEMU) führen einen Akkumulator als Energiespeicher mit, der auf unterschiedliche Weise geladen werden kann. In der von den Aufgabenträgern favorisierten Hybridvariante kombinieren sie den Batteriebetrieb mit der Stromversorgung aus der Oberleitung, wenn ein Fahrdrat zur Verfügung steht. Das heißt: Auf Streckenabschnitten mit Oberleitung wird der Akku über den Stromabnehmer aufgeladen, damit die gespeicherte Energie auf nicht-elektrifizierten Abschnitten eingesetzt werden kann.“ [DB-Regio]

Projekt ist jedoch von Defekten und Ausfällen geprägt. Als Ursachen wurden Liefer- und Produktionsverzögerungen der Fahrzeuge, technische Defekte bei Peripheriekomponenten der Brennstoffzelle und der Software, fehlende Wartungs- und Instandhaltungs-Infrastruktur sowie Herausforderungen einer neuen Betreibergesellschaft mit Personalengpass identifiziert (32; 33; 34).

Es lässt sich festhalten, dass eine kurzfristige Integration der Wasserstofftechnologie im Schienenverkehr mit Risiken verbunden ist. Die bestehenden Herausforderungen in Bezug auf Technologie, Infrastruktur und Wirtschaftlichkeit sind separat im Rahmen einer konkreten Machbarkeitsuntersuchung zu bewerten.

3.8.2. Güterzüge als Transport- und Verteiloption für Wasserstoff

Der Transport von Wasserstoff per Schiene wird als mögliche Alternative zum Pipeline- oder Straßentransport diskutiert. Hierfür hat die DB-Cargo AG Konzepte entwickelt, um u.a. flüssigen Wasserstoff in Kesselwagen zu transportieren (35).

Bislang werden drei Wasserstoff-Träger für den Transport auf der Schiene näher betrachtet: Der Transport von gasförmigem Wasserstoff (GH₂) in MEGC, von den Wasserstoffderivaten Ammoniak, Methanol und Wasserstoffträgern LOHC in Kesselwagen sowie von flüssigem (tiefkaltem) Wasserstoff (LH₂) in Cryo-Containern (36; 37).



Abbildung 3-20: Formen des schienenengebundenen Wasserstofftransports (35)

Die 40-ft-MEGC transportieren rund 1.000 kg gasförmigen Wasserstoff und lassen sich bei 300 oder 500 bar intermodal per Flachwagen oder Chassis verladen. Die Intermodalität ist durch die Konformität mit PED, ADR, RID, IMDG²⁰ gewährleistet. Chemisch gebundener Wasserstoff kann bereits heute bei Umgebungsdruck und -temperatur in großen Mengen transportiert werden. Das Transportequipment ist bereits Marktstandard. Kommerziell jedoch noch nicht einsatzfähig sind die vor- und nachgelagerten Hydrierungs- und Dehydrierungsanlagen, weswegen der Reifegrad bislang noch nicht über Pilotprojekten liegt. Nach abgeschlossener Entwicklung und serienreife soll LH₂ in isolierten Kryo-Kesselwagen mit etwa 4 t H₂ pro 40-ft-Äquivalent transportiert werden. Herausforderung hierbei ist eine begrenzte Menge an Verflüssigern sowie die vergleichsweise niedrigere technische Reife von Kryo-Kesselwagen (36; 37).

²⁰PED = Pressure Equipment Directive, ADR = European Agreement Concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road, RID = Ordnung für die internationale Eisenbahnbeförderung gefährlicher Güter, IMDG = International Maritime Dangerous Goods Code

Die Herausforderungen beim Transport von Wasserstoff über der Schiene liegen in der sicheren Handhabung des Gases (Gefahrgutbeförderungsgesetz), der Notwendigkeit spezieller Infrastruktur und der Integration in bestehende Logistikprozesse²¹.

GH₂-MEGC eignen sich für kurze bis mittlere Distanzen und modulare Belieferung von Tankstellen oder Industriekunden, da Umschlaggeräte und Druckinfrastruktur bereits verfügbar sind. LH₂ ist – sobald Verflüssigungskapazitäten und Cryo-Wagen bereitstehen – für großvolumige Ferntransporte oder Hub-to-Hub-Verkehre vorgesehen, bei denen die hohe volumetrische Energiedichte den höheren Anlagenaufwand rechtfertigt. Wasserstoffderivattransport bietet perspektivisch eine Option für Lieferketten mit Distanzen über mehrere 100 km, die konventionelle Flüssigut-Logistik und Lager nutzen können (37).

Unter den aktuellen Rahmenbedingungen ist der Transport von komprimiertem Wasserstoff in (500 bar-)MEGC technisch ausreichend ausgereift. Diese Lösung erreicht bei gemeinsamer Nutzung eines MEGC-Pools und Langflachwagen Transportkosten von 1,54 €/kg (Wiesbaden) respektive 1,74 €/kg (Friedberg) und liegt damit nahezu auf dem Niveau des Lkw-Trailers. Gegenüber straßengebundenem Transport sinken Energieverbrauch und CO₂-Emissionen um rund 40 %, selbst bei Diesellokeinsatz. Währenddessen gilt es bei Transportlösungen für LH₂ und Wasserstoffderivaten die technische- sowie Marktreife zu erhöhen und infrastrukturelle Hürden abzubauen (37).

Trägerform	Equipment	Equipmentkosten	Transportkapazität	Transportkomplexität	Direkter H ₂ -Einsatz möglich	Transformationskosten	Nutzbar als eigenes Endprodukt	Verfügbarkeit (2023)
GH ₂ 300/500 bar	MEGC / Flach- bzw. Tankwagen	●	●	●	●	●	–	✓
Ammoniak (NH ₃)	ISO-Tankcontainer / Kesselwagen	●	●	●	●	●	●	✓
Methanol (CH ₃ OH)	ISO-Tankcontainer / Kesselwagen	●	●	●	●	●	●	✓
LOHC	ISO-Tankcontainer / Kesselwagen	●	●	●	●	●	●	✓
LH ₂ (≤ -253 °C)	Cryo-Container / Cryo-Kesselwagen	●	●	●	●	●	●	✗

²¹ Im Gegensatz zum Straßenverkehr ist das Einhalten von vorgegebenen Fahrplänen zu gewährleisten, was zur Gebundenheit von spezifischen Zeit- und Schienenabschnitten führt.

Abbildung 3-21: Vergleich der unterschiedlichen Wasserstofftransportformen (eigene Darstellung nach (35))

Zukünftige Entwicklungen im Bereich des Wasserstofftransports über die Schiene hängen von verschiedenen Faktoren ab: Neben der Entwicklung sicherer und effizienter Transporttechnologien, ist auch die Verfügbarkeit von grünem Wasserstoff sowie die Schaffung geeigneter Infrastrukturen und die Integration in bestehende Logistiksysteme maßgeblich für die Zukunft des Transportmediums Schiene.

Die bestehende Schieneninfrastruktur bietet einerseits die Möglichkeit eine schienengebundene Logistik für Wasserstoff bzw. Derivate aufzubauen. Die Recherche hat gezeigt, dass transportseitig Lösungen erarbeitet werden. Herausforderungen bestehen seitens der zusätzlichen Infrastruktur für Aufbereitung bzw. Veredlung des Wasserstoffs sowie Abfüllung.

Andererseits kann durch die räumliche Nähe einer Wasserstoffherzeugung zu Schienengüter- als auch Schienenpersonenverkehrsinfrastruktur eine Wasserstoffsäcke in Form einer Zugtankstelle errichtet werden. Eine niedrige technische- sowie Marktreife, initial höhere Infrastrukturkosten im Vergleich zu Diesel sowie mit Unsicherheiten behaftete Betriebskosten stellen jedoch aktuell noch erhebliche Projektrisiken dar.

3.9. Elektrolyseprojekt-Benchmark in Deutschland

Im Rahmen der Studie wurden ausgewählte Elektrolyseprojekte in Deutschland analysiert, um einen Vergleich mit dem Standort Rüsselsheim am Main zu ermöglichen. Die Auswahl der Projekte erfolgte anhand von Kriterien wie Anlagengröße, Standorttyp (z. B. Brownfield), Nähe zu Verbrauchsschwerpunkten sowie technologischem Reifegrad. Ziel dieses Benchmarks ist es, Erfolgsfaktoren und Herausforderungen vergleichbarer Vorhaben zu identifizieren und daraus übertragbare Erkenntnisse für die Entwicklung eines Wasserstoffclusters in Rüsselsheim am Main abzuleiten. Die dargestellten Projekte dienen somit als Referenzpunkte für die strategische Standortentwicklung und die Bewertung von Skalierungsoptionen.

Das planerische Vorgehen in Projekten ähnlicher Dimension wie das in Rüsselsheim am Main geplante wurde in einem Desk-Research recherchiert, analysiert sowie kritisch betrachtet und eingeordnet. Dabei wurden Gemeinsamkeiten im Projekt- und Planungsprozess herausgearbeitet und kritische, planerisch-systemische Grenzen identifiziert. Im Folgenden sind die wichtigsten Informationen dieser Recherche zusammengefasst dargestellt:



Abbildung 3-22: Räumliche Verteilung der Elektrolyseprojekte

Standortauswahl:

- Außenbereich: meist große Wasserstoffprojekte mit Nähe zu EE-privilegierten Projekten (genehmigungsrechtlich umsetzbar)
- Innenbereich: große Projekte meist innerhalb von industriell geprägten Flächen; Konversionsflächen bevorzugt (häufiges Beispiel Kraftwerksstandorte)
- Innenbereich: kleinere Projekte

Infrastruktur-Anbindung:

- Nähe zum Wasserstoffkernnetz: bei großen Projekten meist gegeben (meist keine Wasserstoffspeicherung direkt vor Ort); bei kleineren Projekten nicht zwingend erforderlich (je nach Nutzung)
- Nähe zu EE: bei großen Projekten meist gegeben, mit einzelnen Ausnahmen; auch bei kleinen Projekten wesentlich

Genehmigungsverfahren:

- Durch Änderung des BImSchG nur wenige aktuelle Informationen öffentlich
- Projekte > 50 MW meist über IPCEI Förderung → z.B. durch vorzeitigen Baubeginn
- Privilegierte Vorhaben als Lösung für Projekte im Außenbereich

Flächenbedarf:

- Bei größeren Projekten ca. 20.000 m² für eine 100 MW Anlage

Wasserstoffnutzung:

- Einspeisung ins Wasserstoffkernnetz
- Industrielle Abnehmer meist in näherer Umgebung (spezifische, wie Stahl- o. Chemieindustrie)
- Bei größeren Projekten: meist Kavernenspeicher in etwaiger Umgebung

Projektname	übergeordnetes Projekt	Leistung [MW]	Menge	Elektrolyse-technik	geplante IBN	Projekt-Standort	Nutzung/Abnehmer	Transport	Speicherort
IPCEI Elektrolyse Ostfriesland	Clean Hydrogen Coastline	320	26.000 t/a	PEM (Siemens Energy)	2027	Eiskeweg 15, 26725 Emden	Stahlindustrie (ArcelorMittal - Bremen; Salzgitter AG; Georgsmarienhütte)	Wasserstoffkernnetz - H ₂ Coastlink 1 (Betriebsdruck 80 bar)	Kavernenspeicher Huntorf
Elektrolyse Linge (RWE)	GET H2 Nukleus	300	5,6 t/h	2x 100MW-PEM (Linde Engineering und ITM Power); 1x 100MW Druck-Alkali (Sunfire)	2027	Schüttorfer Str. 100, 49808 Lingen (Ems)	Raffinerie (TotalEnergies - Leuna - 30.000t/a 2030-2044); Rückverstromung (34MW Gasturbine mit Kawasaki)	Wasserstoffkernnetz	Kavernenspeicher Gronau-Epe
HyTech Hafen Rostock	doing hydrogen (Ostdeutscher Wasserstoff-Hub)	100	6.500 t/a	Druck-Alkali (Hydrogen Pro ASA)	2027	Am Kühlturm 1, 18147 Rostock	Ammoniakherstellung (Yara GmbH & Co. KG - Poppendorf); H ₂ -Busflotte (Regionalbus Rostock GmbH); lokale Industrie	Wasserstoffkernnetz	Wasserstoffspeicher und Abfüllanlage vor Ort vorgesehen
WUNH2		8,75	1.350 t/a	PEM (Siemens Energy)	2022	Am Energiepark, 95632 Wunsiedel	regionale Industrie (150-200 km Umkreis: Glas- und Keramik; Transportunternehmen; Automobilzulieferer; Sägewerk)	Vor Ort Verdichtung auf 500 bar LKW-Trailer	Tanks
HydriHub Fenne		53	8.200 t/a	PEM (ITM Power)	2027	Kraftwerk Fenne, Saarbrücker Str. 135, 66333 Völklingen	ÖPNV (Saarbahn GmbH - 775 t/a für 85 H ₂ -Busse); Stahlindustrie (Dillinger Hüttenwerke AG); Rückverstromung 13,5 MW Brennstoffzellenanlage	regionale Wasserstoffleitungsnetz; Wasserstoffkernnetz; LKW-Trailer	stationäre Speicherung (keine großen Gasspeicher)

Die Analyse verschiedener Best-Practice-Beispiele aus Deutschland zeigt typische Rahmenbedingungen und Standortmuster für das Erbauen von Elektrolyseuren auf. Grundsätzlich lässt sich eine Differenzierung nach Projektgröße und Lage erkennen: Großskalige Wasserstoffprojekte entstehen häufig im Außenbereich mit direkter Anbindung an erneuerbare Energiequellen. Diese Standorte können von privilegierten Genehmigungswegen und planungsrechtlicher Umsetzbarkeit profitieren. Im Innenbereich konzentrieren sich größere Vorhaben bevorzugt auf industriell geprägte Konversionsflächen²², wie etwa ehemalige Kraftwerksstandorte. Kleinere Elektrolyseprojekte können flexibler realisiert werden.

Die Nähe zu wesentlichen Infrastrukturen wie dem Wasserstoffkernnetz, Gashochdruckleitungen oder dem Hochspannungsnetz ist bei Großprojekten meist gegeben und stellt einen entscheidenden Planungsfaktor dar. Auch bei kleineren Anlagen bleibt die Anbindung an erneuerbare Energien ein wesentliches Kriterium. Hinsichtlich der Genehmigungsverfahren ist insbesondere bei IPCEI-Projekten eine erhöhte Planungssicherheit gegeben, etwa durch die Möglichkeit eines vorzeitigen Baubeginns.

Für eine 100-MW-Elektrolyseanlage ist typischerweise ein Flächenbedarf von rund 20.000 m² zu veranschlagen. Die erzeugte Wasserstoffmenge wird in vielen Fällen direkt ins Netz eingespeist oder in Kavernenspeichern in der Umgebung zwischengespeichert. Abnehmer befinden sich häufig in der unmittelbaren industriellen Nachbarschaft, etwa in der Stahl- oder Chemiebranche.

Diese Erkenntnisse dienen als Referenzrahmen zur Bewertung potenzieller Standorte, auch im Kontext der Entwicklung eines Wasserstoffclusters in „Rüsselsheim West“.

3.9.1. SWOT-Analyse Brownfield

Im Folgenden wird eine Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile für Elektrolysegroßprojekte auf (Industrie-)Brownfield vorgenommen, da diese aufgrund der in der Regel guten technischen Erschließung, einer günstigen Lage zu Energieinfrastrukturen, klaren planungsrechtlichen Rahmenbedingungen und (meist) eindeutiger Eigentumsverhältnisse per se Potenzialflächen für Elektrolyseprojekte darstellen.

Stärken

Brownfield bieten aufgrund ihrer Historie häufig eine bereits bestehende Erschließung mit Strom-, Wasser- und Abwasserinfrastruktur sowie Straßen- und teilweise Schienenanbindung. Die großflächige, zusammenhängende Struktur solcher Areale erlaubt den Aufbau auch größerer Elektrolyseure mit Leistungen von 100 MW und mehr. Durch die frühere industrielle Nutzung bestehen planungsrechtliche Grundlagen, z. B. über vorhandene Flächennutzungs- und Bebauungspläne. So kann mit der Nutzungskontinuität eine Vermeidung neuer Flächenkonflikte und -versiegelung systematisch angestrebt werden. Zudem entfällt durch vorhandene Vorbelastungen in der Regel eine aufwendigere naturschutzrechtliche Prüfung. Besonders geeignet sind ehemalige Kraftwerksstandorte, da dort häufig sowohl die Netzanbindung als auch industrielle Abnehmer in direkter Umgebung vorhanden sind.

²² Konversionsflächen bezeichnen ursprünglich ehemals militärisch genutzte Flächen, Gebäude und Standorte (z.B. Kasernen, Truppenübungsplätze usw.). Inzwischen wird der Begriff aber auch auf ungenutzte, ehemalige Industrie- und Infrastrukturflächen ausgeweitet.

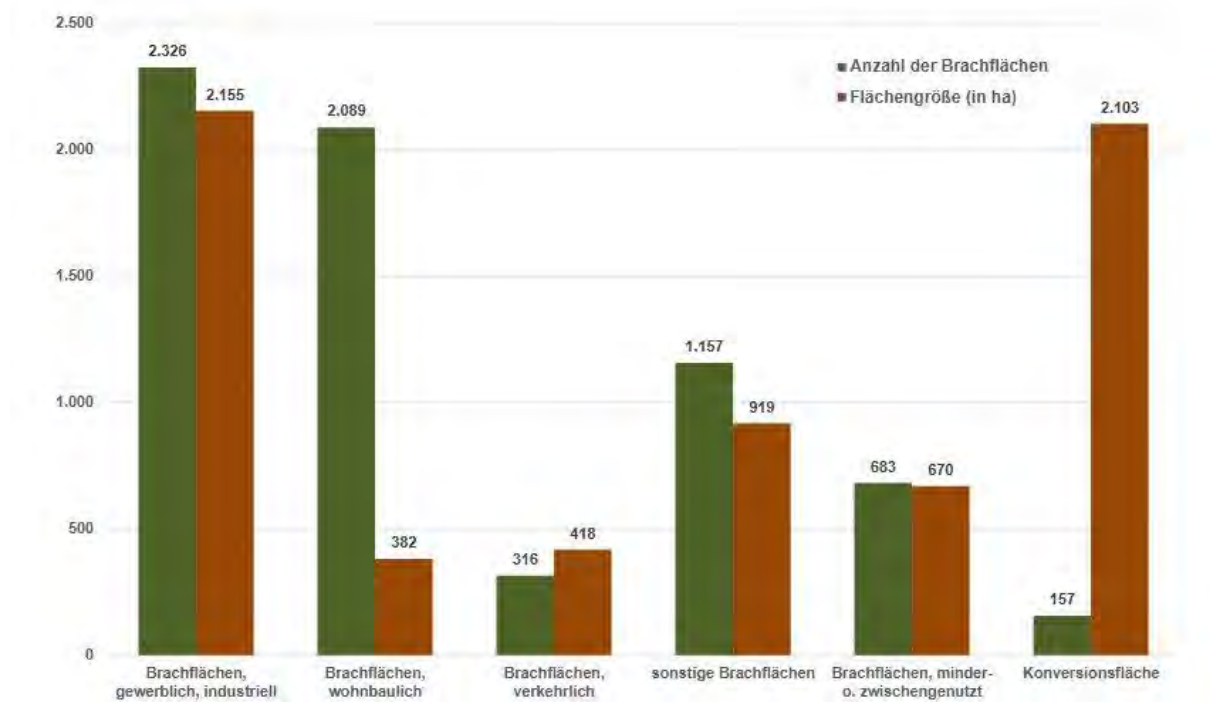


Abbildung 3-23: Brachflächenkategorien aus der landesweiten Brachflächenerfassung Nordrhein-Westfalen (Stand: 10.6.2023, 50 % der Gesamtfläche erfasst) (56)

Schwächen

Ein zentrales Hindernis stellt die oft unzureichende Datenlage zu Bodenverhältnissen und Altlasten dar. In vielen Fällen fehlen aktuelle Untersuchungen zu Art, Konzentration und Ausdehnung von Schadstoffen, was zu hohen Aufwänden für Probenahmen, Gutachten und Risikoabschätzungen führt. Im Falle einer Sanierungspflicht übersteigen die notwendigen Maßnahmen häufig den wirtschaftlichen Nutzen. Ein weiterer Schwachpunkt liegt im fehlenden bundesweiten Atlas für verfügbare Industrie- oder Konversionsflächen, was die systematische Standortsuche erschwert.

Chancen

Die Nähe zu potenziellen industriellen Abnehmern sowie zum Wasserstoffkernnetz oder Hochspannungsnetzen verbessert die wirtschaftliche Umsetzbarkeit und Netzkompatibilität. Insbesondere ehemalige Kraftwerksflächen ermöglichen die Integration von Elektrolyseuren mit nachgelagerter Rückverstromung. Weitere Standortpotenziale entstehen durch die geplante Abschaltung von Stein- und Braunkohlekraftwerken. Diese bieten nicht nur großflächige, sondern auch gleichmäßig über Deutschland verteilte Optionen für die Clusterbildung. Die Genehmigungsverfahren können an solchen Standorten in vielen Fällen beschleunigt erfolgen, insbesondere wenn privilegierte Vorhaben gemäß §35 BauGB vorliegen.

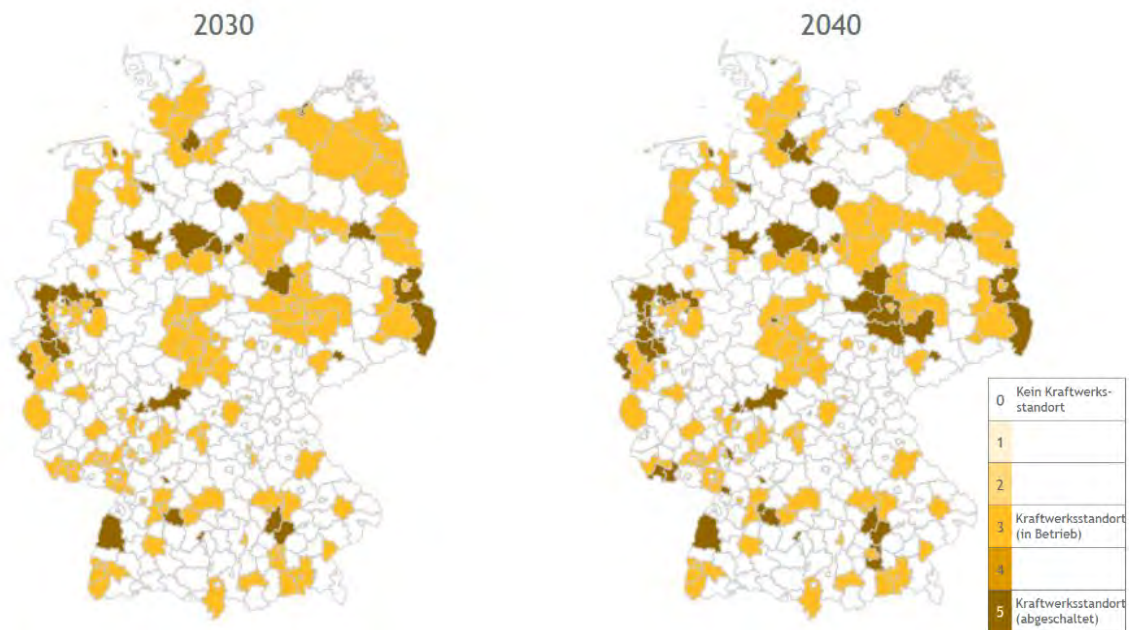


Abbildung 3-24: Kraftwerksstandorte in Deutschland (57)

Risiken

Neben den finanziellen Risiken bei Altlastensanierung ergeben sich Herausforderungen aus unsicheren Eigentumsverhältnissen, einer erschwerten Kontaktaufnahme mit Flächeneigentümern und divergierenden Interessen. Darüber hinaus können durch Denkmalschutzauflagen (z. B. auf Hallenstrukturen oder Gebäudefassaden) Nutzungsrestriktionen entstehen. Der Rückbau alter Infrastruktur sowie der mangelnde Anschluss an Erneuerbare-Energien-Quellen schränken insbesondere im Außenbereich die Nutzbarkeit weiter ein. In einigen Fällen kann auch der erforderliche Schutzabstand zu sensiblen Objekten wie Wohnnutzung oder Gewässern nicht eingehalten werden, was die Genehmigungsfähigkeit infrage stellt.

4. Marktanalyse und wirtschaftliche Perspektiven

4.1. Wasserstoffbedarf Hessen

Die Potenzialanalyse „Wasserstoff in Hessen“ der Landesenergieagentur Hessen (38) quantifiziert den zukünftigen Wasserstoffbedarf in Hessen für den Zeitraum 2030 bis 2045 und verortet diesen räumlich. Es wurden hierfür nationale und europäische Studien herangezogen und mit landesspezifischen Wirtschafts- und Energiekennzahlen für Hessen übertragen. Aufgrund der unsicheren Entwicklung der Wasserstoffwirtschaft wurden in vier verschiedenen Szenarien unterschiedliche Entwicklungsbandbreiten abgebildet. Neben dem konservativen und ambitionierten Entwicklungsszenario, ist ein dena-Referenzszenario und ein „Hessen“-Szenario - also ein hessenspezifisches Mittelszenario - behandelt worden. Letzteres wird in der Studie als „Hauptszenario“ angewandt. Bezugsjahr ist 2019, die Ankerjahre der Entwicklungskennzahlen kommen in Fünf-Jahres-Schritten (2030, 2035, 2040, 2045). Mit den sektoralen Kennwerten der Quellstudien für Deutschland und Europa, sowie erhobenen hessischen Branchendaten, wurde die Mengen- und Entwicklungsskalierung durchgeführt, wodurch jede Branche einen Anteil am hessischen Gesamtbedarf für vier respektive fünf Eckjahre erhält. Diese wurden linear interpoliert²³, um einen gleichmäßigen Zeitverlauf zu erstellen. Aus diesen hessischen Gesamtwerten wurden die Verbräuche in Regierungsbezirken und Landkreisen abgeleitet, indem regionale Verteilungsschlüssel entwickelt und angewandt wurden, welche den Anteil des Endenergieverbrauchs der Regionen am Gesamtverbrauch Hessens (Endenergieschlüssel) sowie die überproportionale Nachfrage großer Industriestandorte (Clusterschlüssel) berücksichtigen:

$$\text{Bedarf}_{\text{Region,Sektor/Branche}} = \text{Bedarf}_{\text{Hessen,Sektor/Branche}} \times \frac{\text{Endenergie}_{\text{Region,Sektor/Branche}}}{\sum_{\text{alle Regionen}} \text{Endenergie}_{\text{Region,Sektor/Branche}}}$$

Die prognostizierte Bedarfsentwicklungen der unterschiedlichen Szenarien weist eine hohe Spannbreite auf und reicht von 14.140 GWh bis 54.144 GWh. Die stark variierenden Werte der Szenarien, sind mit technologischen Unsicherheiten und unterschiedlichen Substitutionspfaden zu erklären. Im Hessen-Szenario steigt der Bedarf von 8,3 TWh in 2030 auf 13,4 TWh in 2035 und 21,3 TWh in 2040 bis auf 30,2 TWh im Jahr 2045.

²³ Lineare Interpolation ist eine Methode zur Schätzung unbekannter Zwischenwerte. Dabei wird angenommen, dass sich die Werte zwischen zwei bekannten Datenpunkten geradlinig entwickeln. Im Kontext der Studie wurden so die jährlichen Bedarfszahlen zwischen den erhobenen Eckjahren berechnet, um einen gleichmäßigen, durchgängigen Zeitverlauf zu erhalten

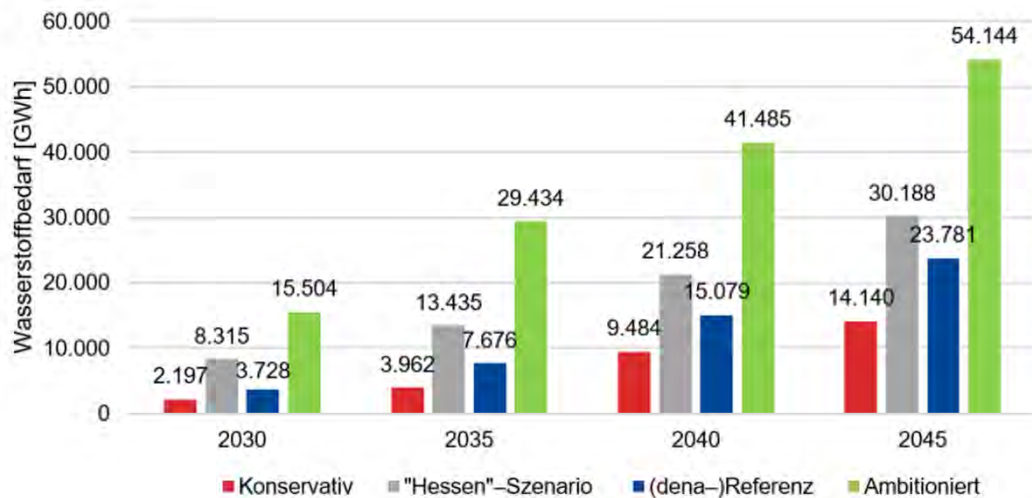


Abbildung 4-1: Wasserstoffbedarfe aller Sektoren bis zum Jahr 2045, alle Szenarien (38)

Nachfolgend werden die einzelnen Sektoren genauer betrachtet und der regionale Bezug zur Stadt Rüsselsheim am Main und dem Kreis Groß-Geraus gezogen.

4.1.1. Industrie

Im Hessen-Szenario entfallen von den 30,2 TWh Wasserstoffbedarf des Jahres 2045 11,2 TWh, also gut 37 % des Gesamtbedarfs auf den Sektor Industrie, was diesen zum größten Nachfrager der Sektoren macht. Für Hessen wurden 11 relevante Branchen in der Industrie mit einem künftigem H2 Bedarf identifiziert:

- Chemieindustrie
- Papierindustrie
- Metallerzeugung und -bearbeitung
- Glas und Keramik
- Ernährungsgewerbe
- Automotive
- Herstellung von Metallerzeugnissen
- Gummi- und Kunststoffwaren
- Verarbeitung von Steinen und Erden
- Maschinenbau
- Bergbau und Gewinnung von Steinen und Erden
- Die verbleibenden Branchen wurden unter "sonstige Industrie" subsummiert.

Der größte intrasektorale Nachfrager der Industrie ist die Chemieindustrie, die für die stoffliche Nutzung 3,9 TWh (2045) und energetische Nutzung 3,3 TWh (2045) bedarf und somit allein bereits für über die Hälfte des nachgefragten Wasserstoffs in der Industrie verantwortlich ist.

Die stoffliche Nutzung von Wasserstoff in Hessen für die Herstellung von Grundchemikalien wie Ammoniak und Methanol steigt von 0,8 TWh in 2030 auf 3,9 TWh in 2045.

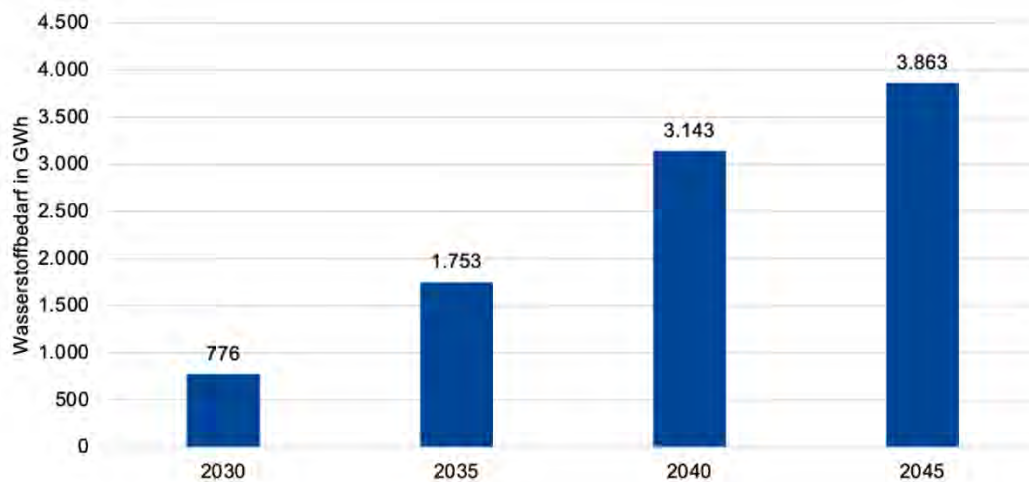


Abbildung 4-2: Wasserstoffbedarfsprognose der Chemieindustrie (stoffliche Nutzung) bis 2045, Hessenszenario (38)

Die Analyse des branchenspezifischen Wasserstoffbedarfs²⁴ zur energetischen Nutzung in Hessen zeigt, dass trotz eines allgemein rückläufigen Endenergieverbrauchs der Industrie, wie das von der BDI-Studie prognostiziert wird, der Wasserstoffbedarf in allen Branchen zunimmt. Diese Entwicklung ist auf steigende Anteile von Wasserstoff in Hoch- und Mitteltemperaturprozessen zurückzuführen. Besonders hervorzuheben ist die Chemieindustrie, die sowohl den größten Bedarf in allen Szenarien, aber auch die höchste Abweichung unter den Szenarien aufweist. Weitere wichtige Abnehmerbranchen sind die Metallerzeugung sowie die Verarbeitung von Steinen und Erden, letztere aufgrund ihres hohen Anteils an Hochtemperaturprozessen. In anderen Branchen wie Papier, Automobil, Gummi/Kunststoff oder Ernährung ist der Wasserstoffbedarf vergleichsweise gering, was auf die bessere Elektrifizierbarkeit ihrer Prozesse zurückzuführen ist. Insgesamt zählen zu den „relevanten Einflussfaktoren für die Höhe des Wasserstoffbedarfs die Entwicklung des branchenspezifischen Endenergieverbrauchs und die Auswahl von Wärmequellen bzw. -erzeugern zur Herstellung wettbewerbsfähiger Produkte“ (38).

²⁴ Die branchenspezifische Wasserstoffbedarfsanalyse basiert auf bundesweiten Daten und einem Top-down-Ansatz; regionale Besonderheiten hessischer Industrieprozesse konnten nicht berücksichtigt werden, da ein Bottom-up Ansatz dazu nötig wäre. Zusätzliche Unsicherheiten entstehen durch angenommene Skalierungsfaktoren und vereinheitlichte technische Parameter.

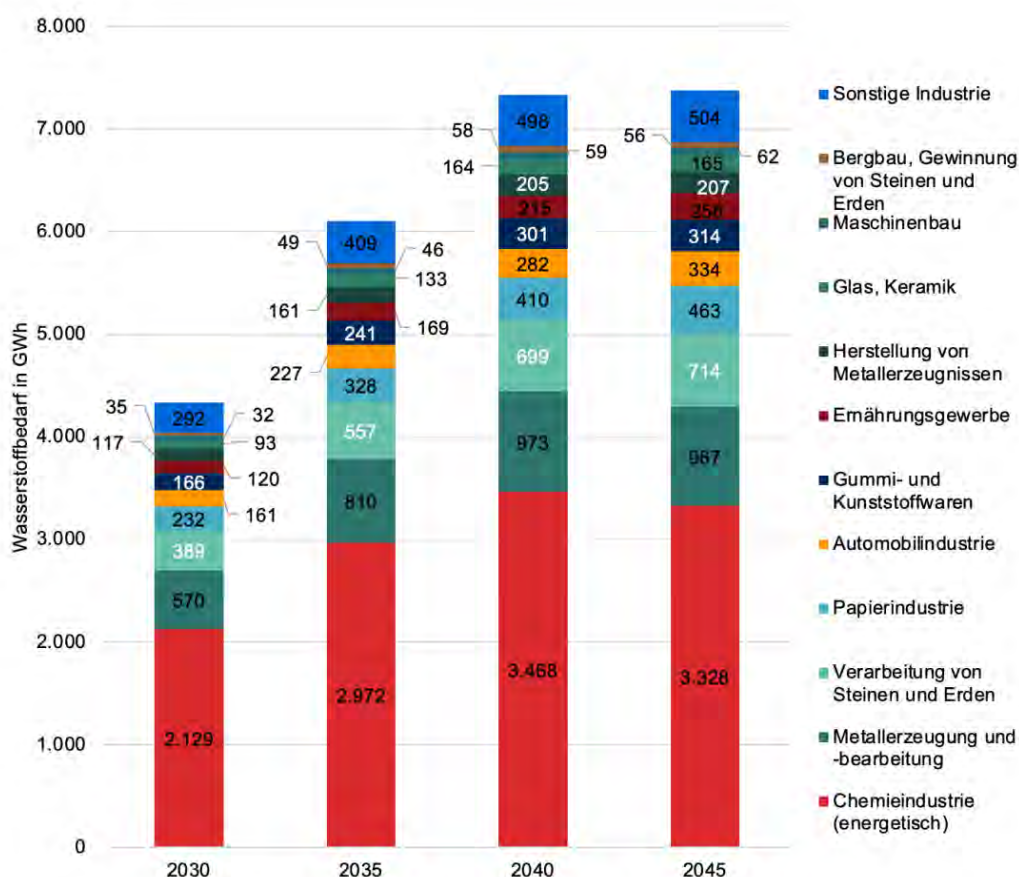


Abbildung 4-3: Wasserstoffbedarfsprognose der Industriebranchen (energetische Nutzung, ohne Industrie-KWK) bis 2045, Hessenszenario (38)

Regionale Verortung²⁵

Die Ergebnisse zeigen, dass sich der Wasserstoffbedarf unterschiedlich stark auf die drei hessischen Regierungsbezirke verteilt. Der Regierungsbezirk Darmstadt verzeichnet mit 5,1 TWh im Jahr 2045 den höchsten Bedarf, was auf die dort hohe Dichte an chemischen und pharmazeutischen Unternehmen sowie Industrieparks zurückgeführt wird. Der Regierungsbezirk Kassel weist ein ähnliches Branchenprofil auf und erreicht im selben Jahr einen Bedarf von 4,4 TWh. Im Regierungsbezirk Gießen liegt der Schwerpunkt auf der Metallindustrie und der Verarbeitung von Steinen und Erden, wodurch sich ein vergleichsweise geringerer Bedarf von 1,8 TWh im Jahr 2045 ergibt. Ergänzend zur Betrachtung auf Bezirksebene wird auch eine landkreisbezogene Aufschlüsselung vorgenommen. Besonders hervorgehoben wird das Rhein-Main-Gebiet mit Frankfurt (1,6 TWh im Jahr 2045) als größtem Einzelstandort. Weitere hohe Bedarfe werden für die Landkreise Hersfeld-Rotenburg (1,72 TWh, rund 15 % des gesamten Industriebedarfs), Fulda (0,92 TWh), Wiesbaden (0,71 TWh), Groß-Gerau (0,66 TWh) und Marburg-Biedenkopf (0,66 TWh) prognostiziert. Die räumlichen Unterschiede ergeben sich aus den jeweiligen Branchenstrukturen und der regionalen Verteilung industrieller Schwerpunkte.

²⁵ Die geodifferenzierte Aufbereitung basiert auf vereinfachten Annahmen und kann regionale Unterschiede in Produktarten, Verfahren und Energieeinsatz nicht abbilden. Die Ergebnisse liefern eine Orientierung über Größenordnung und räumliche Verteilung des industriellen Wasserstoffbedarfs, sind jedoch mit Unsicherheiten behaftet.

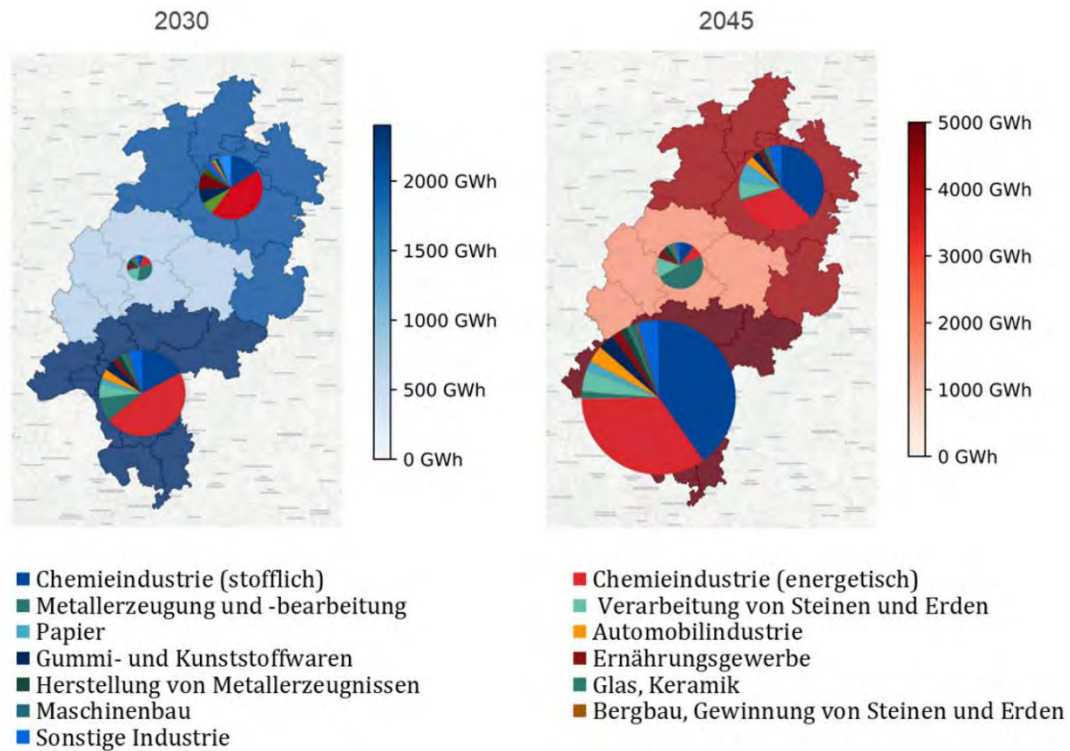


Abbildung 4-4: Branchenspezifischer Wasserstoffbedarf in der Industrie nach Regierungsbezirken in den Jahren 2030 (links) und 2045 (rechts), Hessenszenario (38)

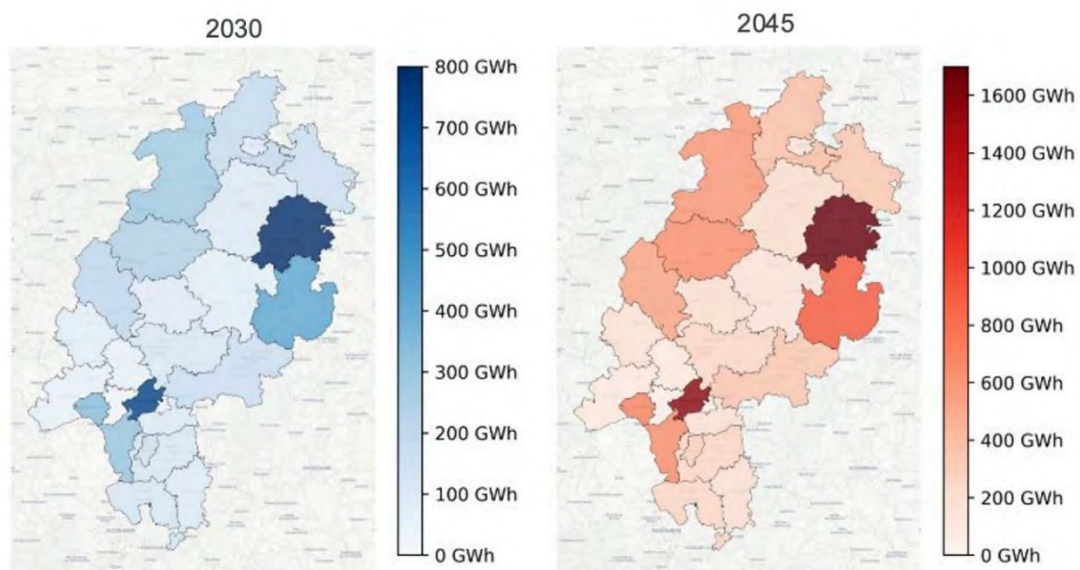


Abbildung 4-5: Wasserstoffbedarf in der Industrie nach Landkreisen in den Jahren 2030 (links) und 2045 (rechts), Hessenszenario (38)

4.1.2. Gebäude

Die Analyse des Wasserstoffbedarfs im Gebäudesektor basiert auf nationalen Transformationsstudien und berücksichtigt ausschließlich die dezentrale Wärmebereitstellung, während zentrale Wärmenetze dem Bereich Energiewirtschaft zugeordnet werden. Im Unterschied zur Industrie erfolgt die Berechnung über den gebäuderelevanten Endenergieverbrauch pro Kopf, unter Einbezug von Bevölkerungsprognosen und hessenspezifischen Verbrauchsdaten. Das

sogenannte Hessen-Szenario orientiert sich am KN100-Szenario der Studie „Aufbruch Klimaneutralität“, das in einem Round Table mit Expertinnen und Experten als realistische Annahme bestätigt wurde. Die Prognose erfolgt linear bis 2045 und die räumliche Verortung des Wasserstoffbedarfs erfolgt auf Landkreisebene auf Basis der Bevölkerungsverteilung, orientiert an der Methodik der Wasserstoffstudie Nordrhein-Westfalen und der NUTS2-Systematik.

Auf Grundlage dieser Methodik wird der Wasserstoffbedarf im hessischen Gebäudesektor bis zum Jahr 2045 prognostiziert. Im Hessen-Szenario liegt der Bedarf im Jahr 2030 bei 0,32 TWh und steigt bis 2045 auf 5,56 TWh. Der Hochlauf beginnt in den 2030er-Jahren, wobei die stärksten Zuwächse in den späten 2030er- und frühen 2040er-Jahren erwartet werden. Für die Jahre vor 2030 ist lediglich von einer (geringen) Wasserstoffeinspeisung ins bestehende Gasnetz auszugehen. Die Szenarienbetrachtung zeigt deutliche Unterschiede im prognostizierten Wasserstoffbedarf, abhängig von Annahmen zur Energieeffizienzsteigerung und zum Ausbau von Wärmepumpen. Während Szenarien mit hoher Effizienz und starkem Wärmepumpenausbau von einem Bedarf um 2,13 TWh im Jahr 2045 ausgehen, liegt er in Szenarien mit langsamer Entwicklung bei bis zu 11 TWh. Aus den zugrunde liegenden Studien lässt sich nicht ableiten, welche Gebäudetypen oder Regionen besonders betroffen sein werden. Potenziale für den Einsatz wasserstoffbasierter Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) auf Quartiersebene – etwa zur Entlastung der Stromnetze – werden in den betrachteten Quellen kaum berücksichtigt, was auf einen möglichen zusätzlichen Wasserstoffbedarf in zukünftigen Nahwärmelösungen hinweist.

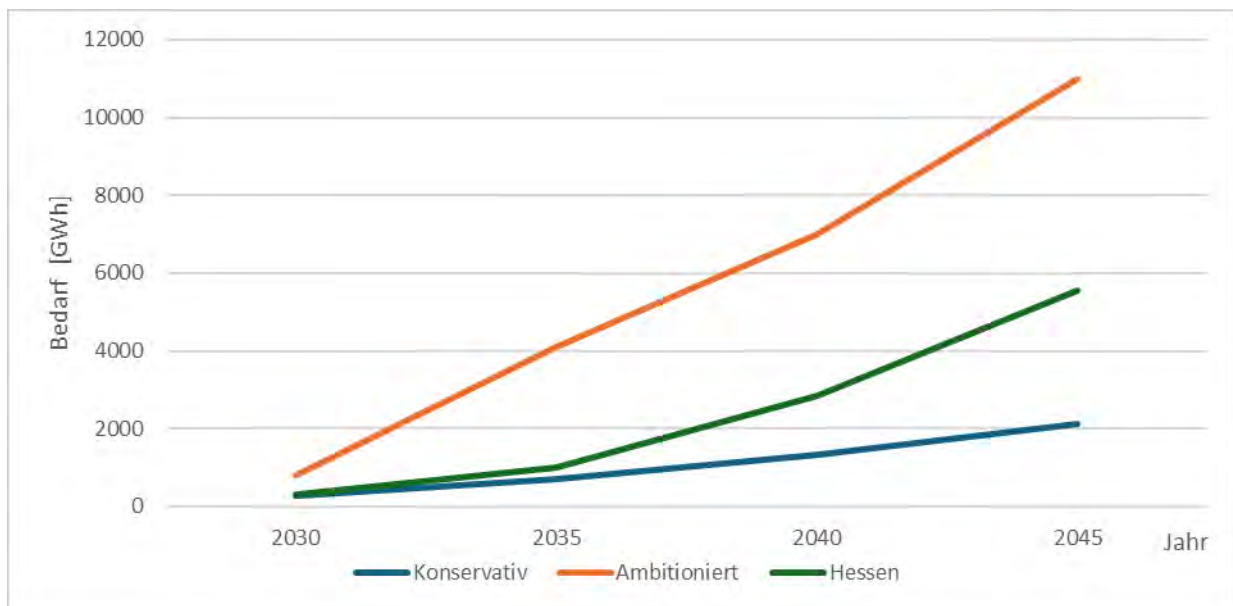


Abbildung 4-6: Szenarien Wärmebereitstellung Gebäude (Hessen und Dena Szenario sind gleich) (38)

Die nachfolgende Abbildung zeigt die landkreisbezogene Verteilung des prognostizierten Wasserstoffbedarfs im Gebäudesektor für das Hessen-Szenario in den Jahren 2030 und 2045. Insbesondere die Metropolregion Frankfurt mit einem Anstieg von etwa 45 GWh auf rund 750 GWh sticht heraus und wird als Verbrauchsschwerpunktregion erkennbar.

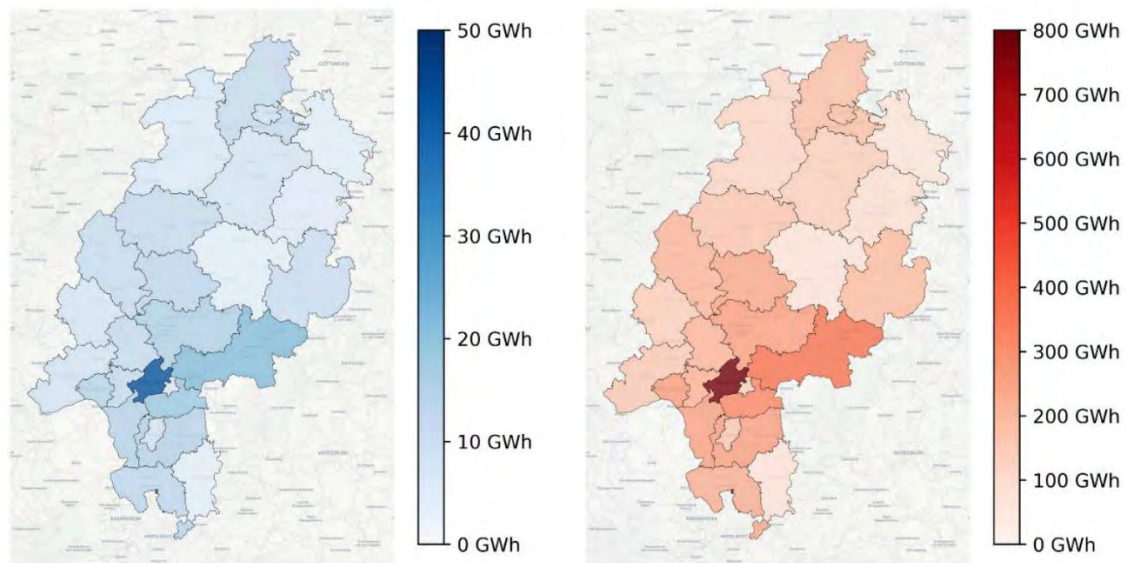


Abbildung 4-7: Wasserstoffbedarf nach Landkreisen in den Jahren 2030 (links) und 2045 (rechts), Hessenszenario (38)

Die Ergebnisse zum Wasserstoffbedarf im Gebäudesektor basieren auf einer Top-down-Methodik, die nationale Annahmen zum Endenergieverbrauch und Wasserstoffanteil übernimmt und auf Hessen überträgt. Dabei bleiben regionale Unterschiede im Gebäudebestand, Heizsystemen oder Sanierungsstand unberücksichtigt. Auch die räumliche Verortung erfolgt vereinfacht anhand von Bevölkerungsverteilungen, wodurch lokale Besonderheiten nicht abgebildet werden können. Die vorgestellte Bandbreite verschiedener Szenarien verdeutlicht die Unsicherheiten der Prognose, bietet jedoch eine erste Orientierung. Eine Rückkopplung mit Fachakteuren zeigt, dass die Ergebnisse insbesondere im Hessen- und im ambitionierten Szenario mit den Erwartungen der Praxis übereinstimmen, jedoch der Wunsch nach detaillierteren Bottom-up-Analysen besteht. In diesem Zusammenhang gewinnt die kommunale Wärmeplanung zunehmend an Bedeutung, da sie lokale Gegebenheiten systematisch berücksichtigt und somit eine wichtige Grundlage für die präzisere Ermittlung des zukünftigen Wasserstoffbedarfs auf regionaler Ebene bietet.

4.1.3. Verkehr

Die Methodik bei Bedarfsprognose und räumlicher Verortung unterscheidet zwischen Straßenverkehr und anderen Verkehrsarten.

Im Straßenverkehr erfolgt die Prognose des Wasserstoffbedarfs auf Grundlage der in Hessen gemeldeten Fahrzeuge und der bundesweit ermittelten durchschnittlichen Verkehrsleistungen. Zur Berücksichtigung von Verhaltensänderungen im Mobilitätssektor werden Anpassungsfaktoren aus einschlägigen Studien herangezogen. Berechnet wird der Wasserstoffbedarf durch Multiplikation der Verkehrsleistung und dem Anteil wasserstoffbetriebener Fahrzeuge und deren spezifischem Verbrauch. Für schwere Nutzfahrzeuge wird aufgrund verlässlicherer Daten eine modifizierte Berechnung mit einem hessenspezifischen Fahrleistungsfaktor angewendet. Hessen weist mit 1,204 im Vergleich zum Bundesdurchschnitt eine hohe Fahrleistung mautpflichtiger Lkw auf. Die für das Prognosemodell herangezogenen Verbrauchs- und Anteilswerte der Fahrzeuge stammen aus etablierten Transformationsstudien und wurden durch die Rückkopplung mit Branchenvertreterinnen und -vertretern aus Logistik, Güter- und Nahverkehr plausibilisiert. Die Darstellung konzentriert sich auf das Hessen-Szenario. Dieses sieht bis 2045 eine steigende Verkehrsleistung für alle Mobilitätsarten außer dem Pkw-Bereich vor. Für Pkw wird eine Abnahme der Verkehrsleistung um 25 % gegenüber 2019 angenommen, für

Omnibusse ein Anstieg um 32 %. Leichte Nutzfahrzeuge (< 3,5 t) verzeichnen eine prognostizierte Steigerung um 20 %, schwere Nutzfahrzeuge (> 3,5 t) um 10 %. Im Straßenschwerlastverkehr wird ein hoher Anteil an Wasserstoffnutzung angenommen, insbesondere aufgrund der Reichweiten- und Leistungsanforderungen: Für Fahrzeuge zwischen 3,5 und 12 t liegt der Wasserstoffanteil im Jahr 2045 bei 50 %, für Fahrzeuge über 12 t bei 72 %. Der Wasserstoffanteil bei Pkw (8 %), leichten Nutzfahrzeugen (11 %) und Omnibussen (25 %) ist niedriger, da in diesen Segmenten überwiegend eine Elektrifizierung erwartet wird. Die Prognosen beruhen auf einem methodischen Top-down-Ansatz und spiegeln den aktuellen Kenntnisstand sowie das Meinungsbild relevanter Fachakteure wider. Unterschiede zwischen städtischem und ländlichem Raum oder zwischen Nutzungsprofilen einzelner Fahrzeugklassen werden im Modell nicht differenziert betrachtet²⁶, fließen aber indirekt über die Verkehrsleistung und den Antriebsmix ein. Die Ergebnisse liefern eine quantifizierbare Einschätzung zur möglichen Entwicklung des Wasserstoffbedarfs im hessischen Straßenverkehr bis zum Jahr 2045. (38)

Die Prognose zum Wasserstoffbedarf im Straßenverkehr zeigt, dass der Einsatz von Wasserstoff maßgeblich durch den Straßengüterverkehr geprägt wird. Besonders der Bedarf schwerer Nutzfahrzeuge (> 12 t zGM) dominiert mit 3.000 GWh im Jahr 2045, gefolgt von mittelschweren Nutzfahrzeugen (3,5–12 t zGM) mit 345 GWh. Demgegenüber fallen die Bedarfe der leichten Nutzfahrzeuge (216 GWh), Omnibusse (178 GWh) und Pkw (760 GWh) deutlich geringer aus. Die Spannweite der Szenarien reicht für das Jahr 2045 von 2.580 GWh im konservativen Szenario bis 7.249 GWh im ambitionierten Szenario. Das Hessen-Szenario prognostiziert einen Bedarf von 4.519 GWh. Die räumliche Verortung erfolgt bei Pkw, leichten Nutzfahrzeugen und Omnibussen über Fahrzeugmeldedaten, während der Güterverkehr auf Basis der gemessenen Verkehrsleistung auf Autobahnen und Bundesstraßen zugeordnet wird. (38)

Die Ergebnisse verdeutlichen die strukturelle Relevanz des Schwerlastverkehrs für die Entwicklung des Wasserstoffbedarfs im Straßenverkehr. Weswegen die Nähe zu Nachfrageschwerpunkten und die strategische Platzierung an Straßengüterverkehrsknotenpunkten für die Planung der Tankstelle von ausschlaggebender Bedeutung ist.



Abbildung 4-8: Wasserstoffbedarfsprognose im Straßenverkehr nach Mobilitätsart bis 2045, Hessenszenario (38)

Die Prognose des Wasserstoffbedarfs für die Bereiche Luftfahrt, Schienenverkehr und Binnenschifffahrt basiert auf dem Endenergieverbrauch des Jahres 2019 sowie dessen erwarteter Entwicklung bis 2045. Grundlage der Berechnung ist eine Multiplikation des verbrauchsgruppenspezifischen Energieverbrauchs mit prozentualen Veränderungsraten aus bestehenden

²⁶ Regionale Differenzierungen konnten mangels Datengrundlage nicht systematisch berücksichtigt werden. Die räumliche Verortung basiert daher auf vereinfachten Annahmen

Studien. Falls keine Endenergieverbrauchswerte vorlagen, wurden Umrechnungsfaktoren aus der dena-Leitstudie verwendet, die das Verhältnis zwischen Verkehrsleistung und Energiebedarf abbilden. Der berechnete Energiebedarf wurde anschließend mit angenommenen Wasserstoffanteilen multipliziert. Für das Hessen-Szenario erfolgt die Darstellung auf Basis dieser Ankerwerte.

Im Jahr 2019 betrug der Endenergieverbrauch der Luftfahrt in Hessen rund 55,47 TWh, im Schienenverkehr 1,53 TWh und in der Binnenschifffahrt 0,22 TWh. Für das Jahr 2045 wird im Szenario davon ausgegangen, dass der Endenergiebedarf der Luftfahrt konstant bleibt. Begründet wird dies mit der Annahme, dass sich Effizienzgewinne und Veränderungen im Nachfrageverhalten gegenseitig ausgleichen. Für den Schienenverkehr wird ein Anstieg des Energiebedarfs um 35 % prognostiziert, für die Binnenschifffahrt um 50 %. Der Wasserstoffanteil am Endenergiebedarf beträgt 11 % im Schienenverkehr und 5 % in Binnenschifffahrt (ohne PtL-Nutzung, in 2045). (38)

Die Plausibilisierung der Annahmen erfolgte im Rahmen von Gesprächen mit Fachvertreterinnen und -vertretern der Luftfahrt und des Nahverkehrs. Die Angaben zur Luftfahrt beziehen sich vorrangig auf den Flughafen Frankfurt und die Lufthansa, die 2022 etwa 55 % aller Starts und Landungen durchführte²⁷. Laut Literatur wird die Dekarbonisierung der Luftfahrt in erster Linie durch den Einsatz importierten synthetischen Kerosins erfolgen. Der dafür benötigte Wasserstoff wird in dieser Studie nicht bilanziert²⁸. (38)

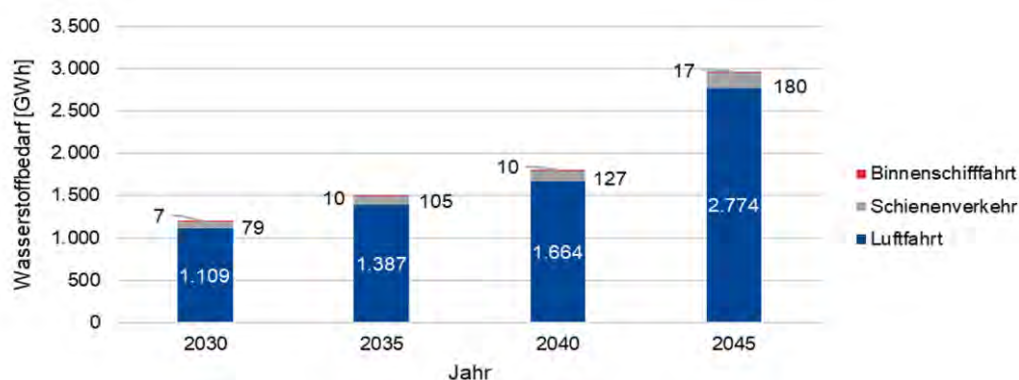


Abbildung 4-9: Wasserstoffbedarfsprognose Luftfahrt, Schienenverkehr und Binnenschifffahrt 2045, Hessenszenario (38)

Im Hessen-Szenario wird für das Jahr 2045 ein kumulierter Wasserstoffbedarf des Verkehrssektors von rund 7.500 GWh prognostiziert. Etwa 75 % entfallen dabei auf den Flug- und Straßengüterverkehr, bedingt durch hohe Endenergiebedarfe und Einsatzpotenziale für Wasserstoff. Die Spannweite der Szenarien reicht von 4.150 GWh (konservativ) bis 15.440 GWh (ambitioniert); das dena-Referenzszenario liegt bei etwa 7.520 GWh. (38)

²⁷ Lufthansa-Anteil je nach Jahr leicht variabel

²⁸ Der Anteil synthetischen Kerosins wird für das Jahr 2045 mit rund 94 % angegeben

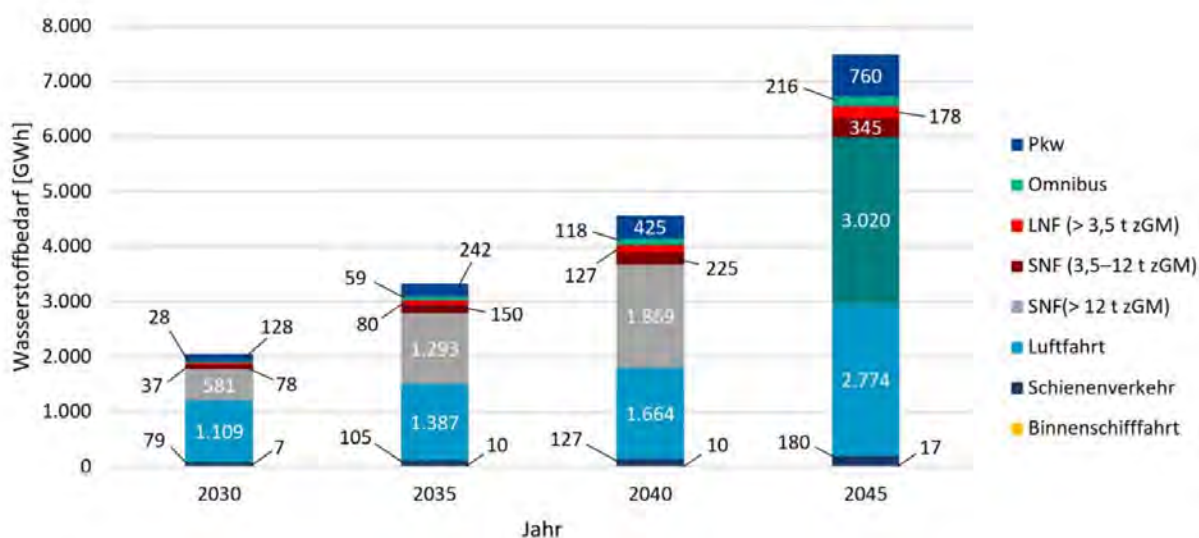


Abbildung 4-10: Wasserstoffbedarfsprognose Verkehrssektor 2045, Hessenszenario (38)

Die räumliche Verortung auf Landkreisebene zeigt für 2045 deutliche Schwerpunkte im Stadtkreis Frankfurt (ca. 3.100 GWh) sowie in Gießen und Hersfeld-Rotenburg, was auf Flughafen- und Autobahninfrastruktur zurückzuführen ist.

Im Schienenverkehr erfolgt die Verortung entlang nicht elektrifizierter Strecken, unter Einbezug geplanter Elektrifizierungen. Für Luftfahrt und Binnenschifffahrt wird die räumliche Zuordnung über Infrastrukturstandorte (z. B. Flughäfen, Binnenhäfen) vorgenommen, gewichtet nach Verkehrsleistung.

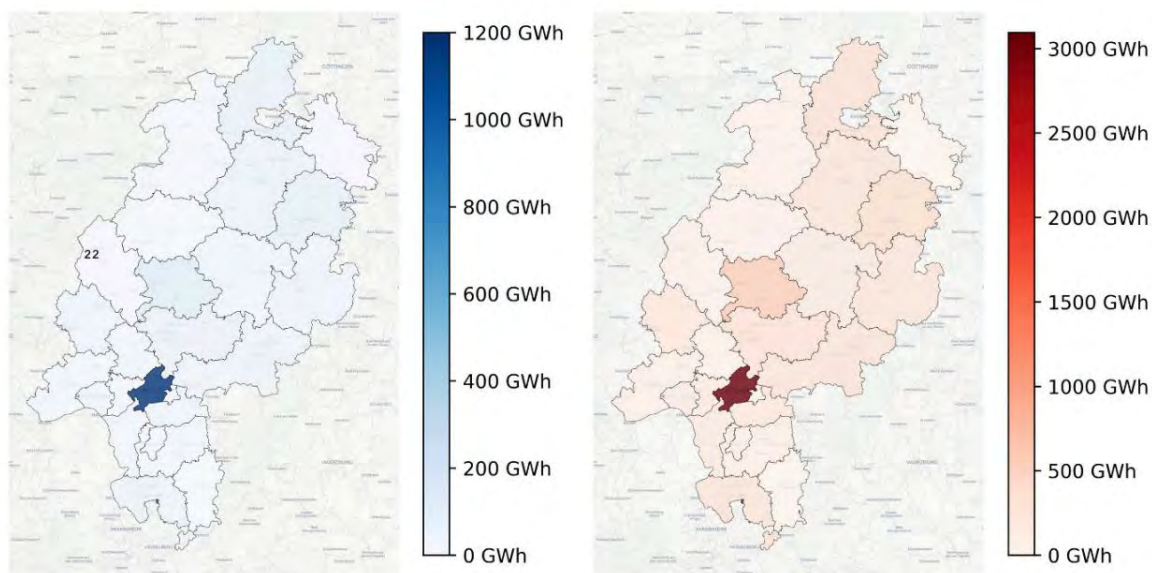


Abbildung 4-11: Wasserstoffbedarfsprognose Verkehrssektor nach Landkreisen in den Jahren 2030 (links) und 2045 (rechts), Hessenszenario (38)

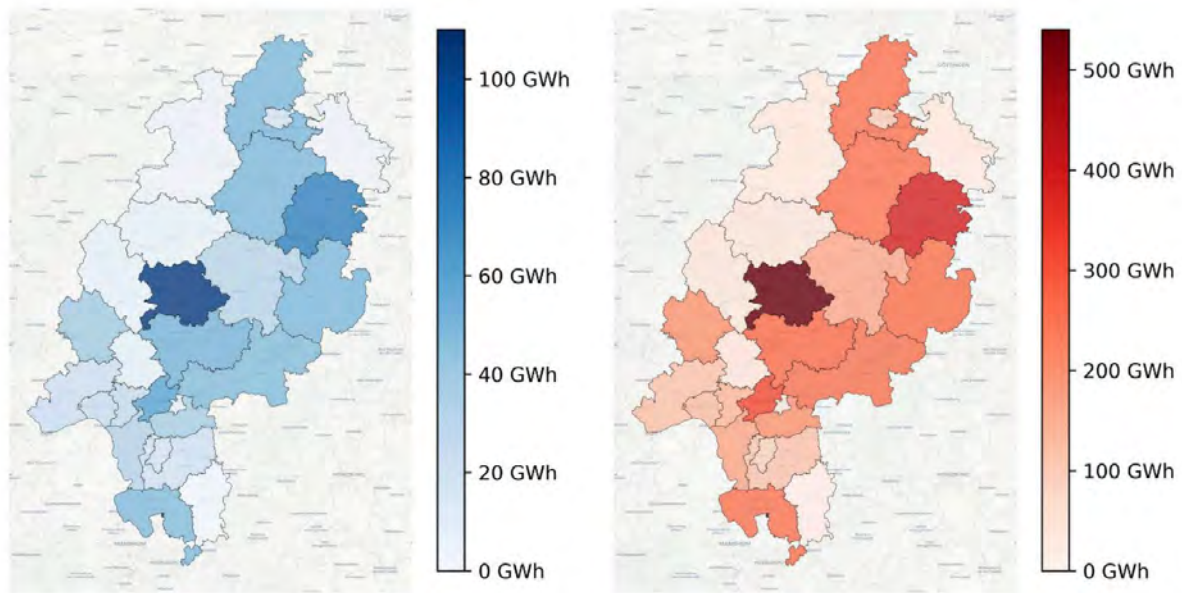


Abbildung 4-12: Wasserstoffbedarfsprognose nur Straßenverkehr nach Landkreisen in den Jahren 2030 (links) und 2045 (rechts), Hessenszenario (38)

4.1.4. Energiewirtschaft

Die Prognose des Wasserstoffbedarfs in der Energiewirtschaft bezieht sich auf den Einsatz in Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK) zur Erzeugung von Strom und Fernwärme. Grundlage der Berechnung ist simultan zu den vorigen Kapiteln der Endenergieverbrauch von Fernwärme in Hessen im Jahr 2019 (ca. 9,7 TWh), ergänzt um Literaturwerte zur Entwicklung des Verbrauchs und zum Anteil von Wasserstoff an der Fernwärmeerzeugung. Die Ergebnisse basieren somit auf einem Top-down-Ansatz und beziehen sich ausschließlich auf KWK-Anlagen, da der Einsatz von Wasserstoff in reinen Stromerzeugungsanlagen aufgrund geringer Leistungskapazitäten vernachlässigt wurde. Regionale Besonderheiten und konkrete Umstellungspläne von Kraftwerksbetreibern konnten mangels Rückmeldungen nicht berücksichtigt werden. Eine belastbarere Prognose erfordert einen Bottom-up-Ansatz, der in der Studie jedoch nicht umsetzbar war. Die Fernwärmeversorgung in Hessen erfolgte 2019 vollständig aus eigenen Anlagen. Im Bereich der Stromversorgung ist Hessen hingegen auf Importe angewiesen (2019: ca. 55 %).

Im Szenario „Hessen“ wurde ein stufenweiser Hochlauf des Wasserstoffeinsatzes in der Energiewirtschaft ab dem Jahr 2030 angenommen. Für die Fernwärmeerzeugung wird in der Modellierung ein wachsender Einsatz von Wasserstoff angenommen, der im Jahr 2045 einen Anteil von 28 % am Gesamtbedarf erreicht. Unter Berücksichtigung eines thermischen Wirkungsgrads von 50 % ergibt sich daraus ein Wasserstoffbedarf von rund 5.900 GWh im Jahr 2045.

Im Zeitraum bis 2030 wird kein relevanter Wasserstoffbedarf angenommen. Die Gespräche mit Vertreterinnen und Vertretern von Versorgungsunternehmen und Industrie zeigen jedoch, dass ein früherer Hochlauf unter der Voraussetzung ausreichender Wasserstoffverfügbarkeit prinzipiell denkbar wäre. Einzelne Anlagen sind laut öffentlichen Bekanntmachungen bereits als H₂-ready vorgesehen, beispielsweise das Heizkraftwerk „HKW West“ in Frankfurt.

In der konservativen Variante wird ein Rückgang der Fernwärmenachfrage um 15 % bis 2045 sowie ein Wasserstoffanteil von 26 % unterstellt. In der ambitionierten Variante steigen die Fernwärmeverbräuche um 32 % und der Wasserstoffanteil erreicht 40 %. Daraus resultiert eine

prognostizierte Bedarfsspanne von 4.670 GWh bis 11.130 GWh im Jahr 2045. Das dena-Referenzszenario folgt den konservativen Annahmen und liegt ebenfalls bei 4.670 GWh.

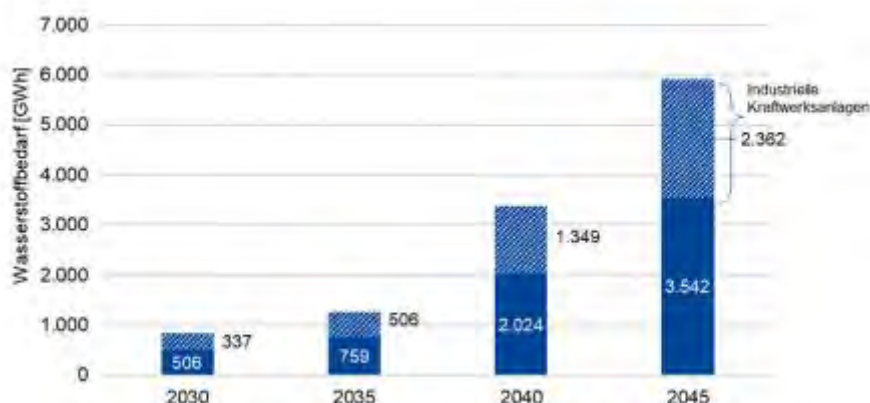


Abbildung 4-13: Wasserstoffbedarfsprognose Energiewirtschaftssektor 2045, Hessenszenario (38)

Die räumliche Verortung des Wasserstoffbedarfs erfolgt anteilig auf Landkreisebene anhand der von der Bundesnetzagentur veröffentlichten elektrischen Nennleistungen der in Hessen betriebenen KWK-Anlagen. Die auf diese Weise ermittelte regionale Verteilung zeigt klare Konzentrationen in wirtschaftsstarken Regionen mit hoher Wärmenachfrage und bestehender Infrastruktur.

Besonders hervor treten die Stadt Frankfurt mit einem prognostizierten Wasserstoffbedarf von 250 GWh im Jahr 2030 und 1.740 GWh im Jahr 2045, sowie der Landkreis Main-Kinzig (einschließlich der Stadt Hanau) mit 240 GWh (2030) und 1.660 GWh (2045). Diese Konzentrationen lassen sich durch bestehende KWK-Kapazitäten sowie durch die Nähe zu urbanen Wärmenetzen und industriellen Verbrauchszentren erklären. In anderen Landkreisen fällt der Bedarf entsprechend der dort installierten KWK-Leistung geringer aus.

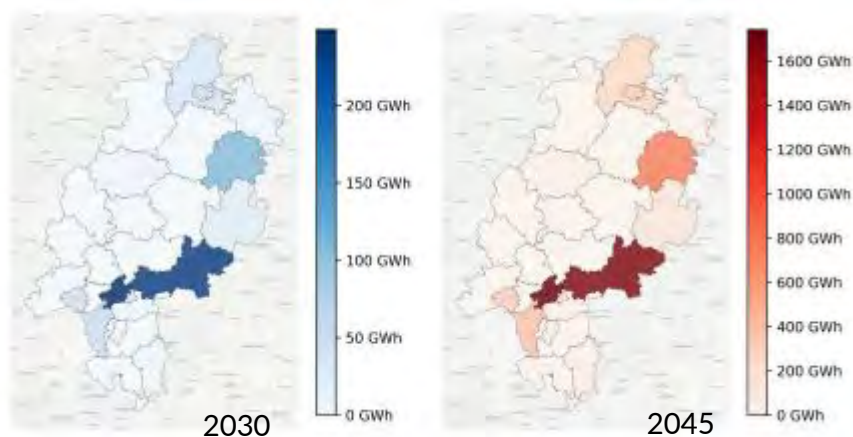


Abbildung 4-14: Wasserstoffbedarfsprognose für die Energiewirtschaft nach Landkreisen in den Jahren 2030 (links) und 2045 (rechts), Hessenszenario (38)

Die Entwicklung eines Wasserstoffbedarfsschwerpunkts in der Umgebung Rüsselsheim ist somit vorgezeichnet. Dabei können frühe Impulse und Initiativen in der Umgebung Kristallisationspunkte für wirtschaftliche, spezialisierte Cluster entlang der Wertschöpfungskette darstellen und einen Standort auf die Zukunft nachhaltig ausrichten. In welcher Größenordnung und in welchen technischen Grenzen, das in Rüsselsheim stattfindet oder stattfinden kann, ist von vielen Faktoren und Variablen abhängig. Die Nähe zu einem

Nachfrageschwerpunkt ist in diesem Zusammenhang aber als positiv zu bewerten, da sie Möglichkeiten zur wirtschaftlichen Weichenstellung bietet.

4.1.5. Zusammenfassung

Im Jahr 2045 ergibt sich im Hessen-Szenario ein gesamter Wasserstoffbedarf von rund 30,2 TWh. Der größte Anteil entfällt mit etwa 11,2 TWh (37 %) auf den Industriesektor, wobei Wasserstoffbedarfe industrieller Kraftwerke der Energiewirtschaft zugeordnet wurden. Der Verkehrssektor folgt mit rund 7,5 TWh (25 %), vor allem bedingt durch den erwarteten Einsatz im Schwerlastverkehr und der Luftfahrt auf Kurzstrecken. Der Gebäudesektor trägt mit ca. 5,6 TWh etwa 18 % zum Gesamtbedarf bei, wobei die Fernwärmeerzeugung separat unter dem Sektor Energiewirtschaft erfasst ist. Für diese wird ein Bedarf von ca. 5,9 TWh (20 %) prognostiziert.

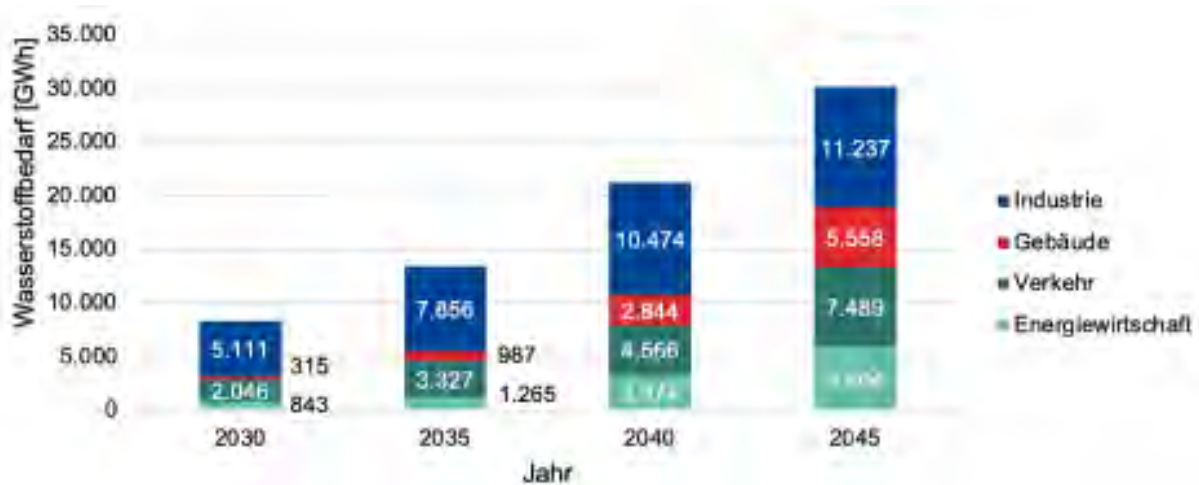


Abbildung 4-15: Wasserstoffbedarf in Hessen Sektorübergreifend im Verlauf der Jahre (38)

Die sektorübergreifende Spannweite der Wasserstoffbedarfsprognosen reicht – je nach Szenario – von 14,1 TWh (konservativ) bis 54,1 TWh (ambitioniert), das dena-Referenzszenario liegt bei 23,8 TWh. Die Werte zeigen die Unsicherheiten auf, die sich aus Annahmen zur technologischen Entwicklung, Verfügbarkeit und Infrastruktur ergeben.

Die räumliche Auswertung auf Landkreisebene verdeutlicht regionale Konzentrationen. Die höchsten Bedarfe treten in der Kreisfreien Stadt Frankfurt mit ca. 6.970 GWh auf, gefolgt vom Main-Kinzig-Kreis mit rund 2.440 GWh und dem Landkreis Hersfeld-Rotenburg mit etwa 2.860 GWh im Jahr 2045. Diese Ballungen lassen sich insbesondere durch große Industrie- und Energieerzeugungsstandorte sowie bedeutende Verkehrsinfrastrukturen erklären. Die räumliche Prognose bietet damit eine Grundlage für infrastrukturelle Überlegungen auf regionaler Ebene.

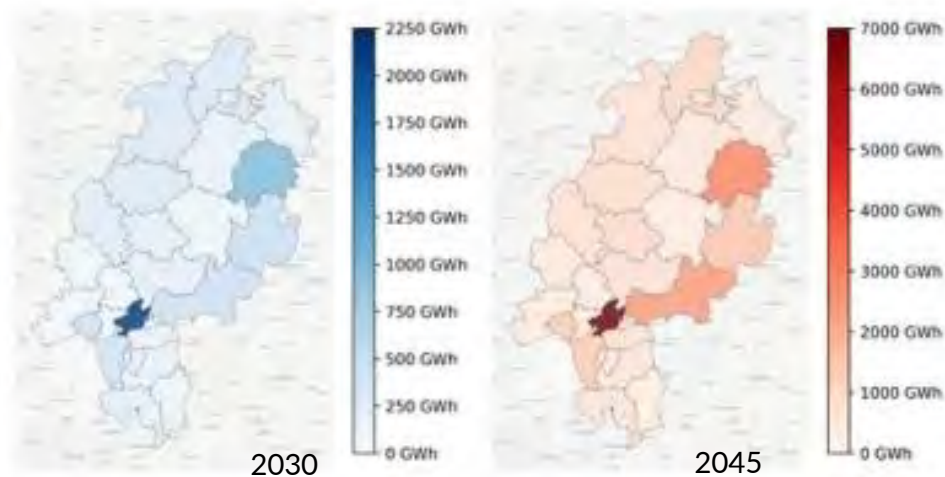


Abbildung 4-16: Wasserstoffbedarfsprognose sektorübergreifend nach Landkreisen in den Jahren 2030 (links) und 2045 (rechts), Hessenszenario (38)

Der Wasserstoffbedarf der an Rüsselsheim angrenzenden Landkreise und Städte ist in nachfolgender Abbildung dargestellt. Es zeigt sich ein Bedarf von bis zu 12 TWh jährlich bis 2045. Vereinfacht auf den Brennwert umgerechnet entspricht dies einem Bedarf von über 360.000 t H₂ pro Jahr.

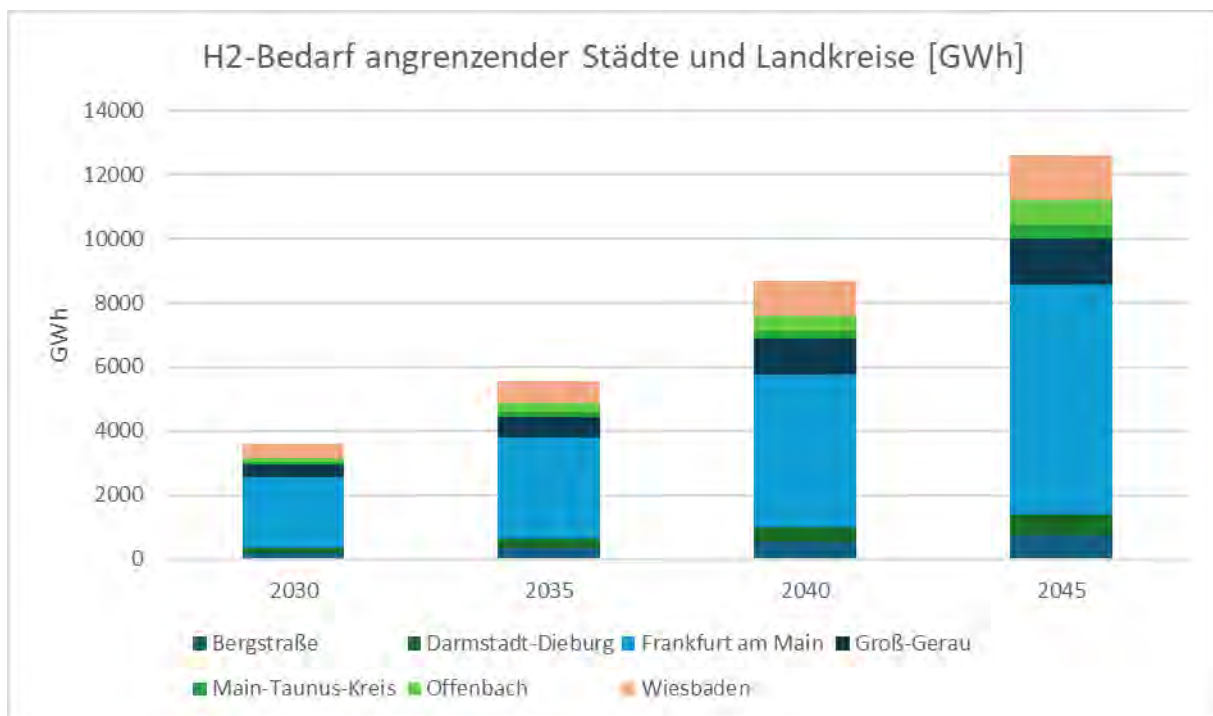


Abbildung 4-17: H₂-Bedarf der an GG angrenzender Städte und Landkreise (38)

4.2. Regionale Nachfrage nach Wasserstoff

Infrastruktur Verkehr (Schiene, Wasser, Luft) Rüsselsheim am Main + 25 km Radius

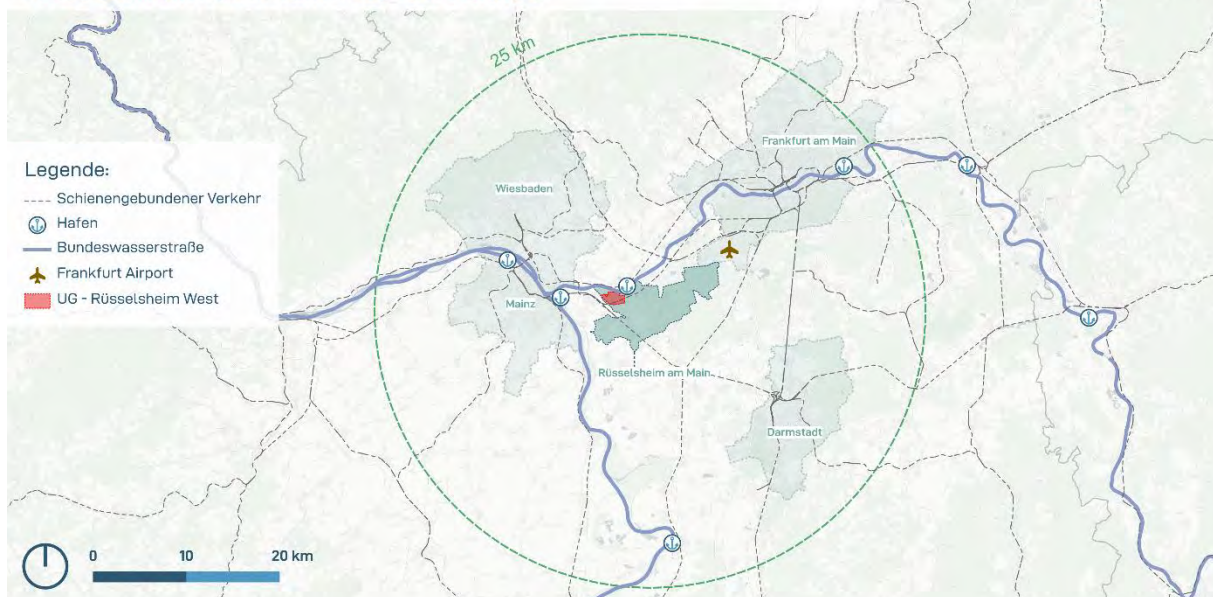


Abbildung 4-18: Verkehrsinfrastruktur in Rüsselsheim und Umgebung, ausgenommen Straßenverkehr (eigene Darstellung)

Das Rhein-Main-Gebiet stellt einen bedeutenden intermodalen Verkehrsknotenpunkt in Deutschland und Europa dar. Die Region verfügt über eine hochentwickelte Infrastruktur mit direkter Anbindung an das Autobahn- und Schienennetz, den internationalen Flughafen Frankfurt sowie an die Bundeswasserstraßen Rhein und Main.

Ein zentrales Element dieses Verkehrsraums ist das Frankfurter Kreuz, eines der meistbefahrenen Autobahnkreuze Europas: Mit täglich über 305.000 Fahrzeuge ist es die Schnittstelle zweier Hauptachsen des deutschen Autobahnnetzes – der A3 (Ost-West-Achse) und der A5 (Nord-Süd-Achse). Etwa 100 Kilometer nordöstlich davon bildet das Kirchheimer Dreieck einen weiteren strategischen Verkehrsknotenpunkt, an dem sich die A7 – die wichtigste Nord-Süd-Verbindung Europas – und die A4 als zentrale Ost-West-Achse kreuzen.

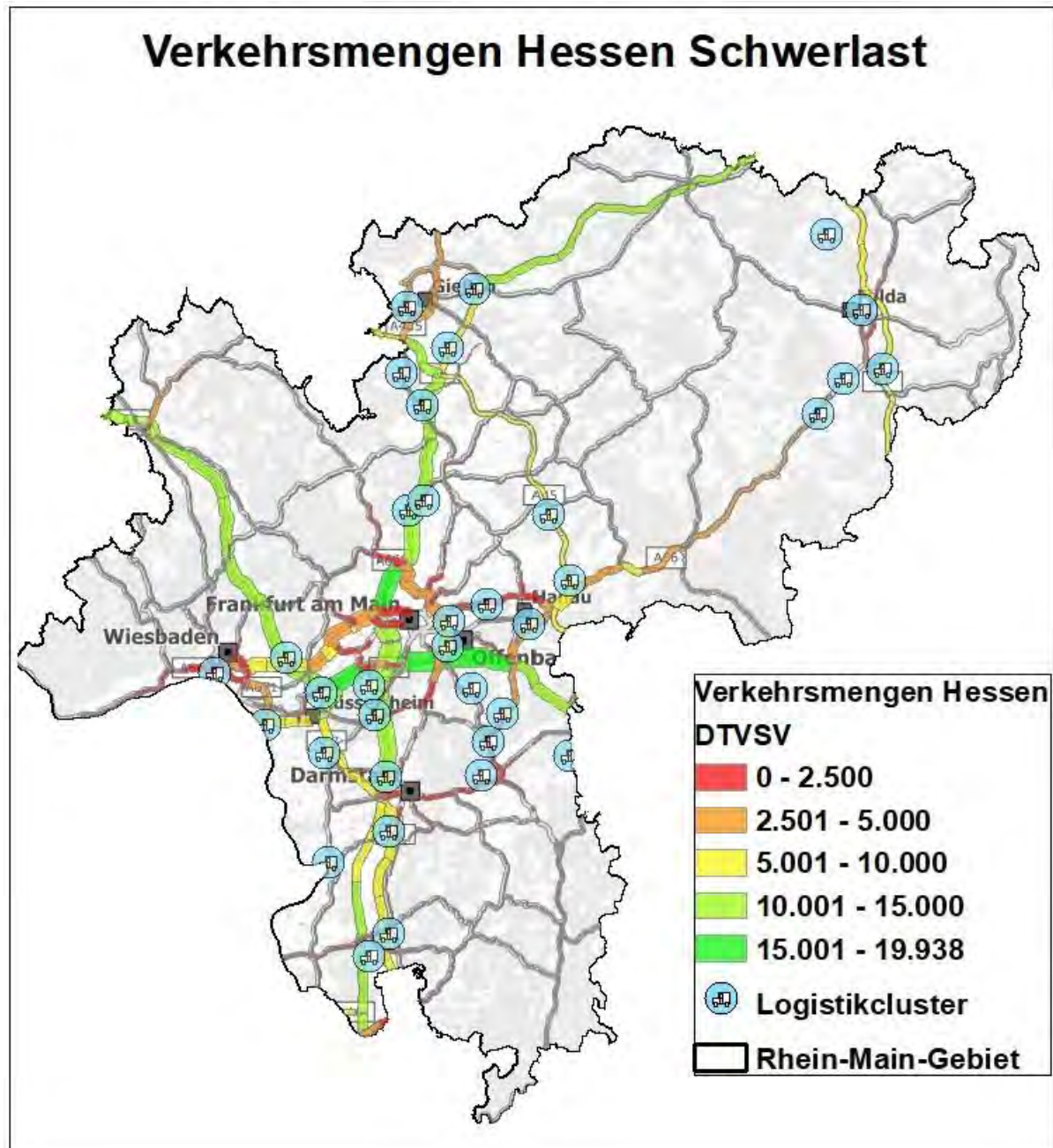


Abbildung 4-19: Verkehrsmenge Schwerlast in Hessen

Ergänzend zu seiner verkehrsgeografischen Bedeutung zählt Hessen und insbesondere die Region Rhein-Main wirtschaftlich zu den führenden Logistikstandorten Deutschlands. Mit rund 225.000 sozialversicherungspflichtig Beschäftigten in der Logistikbranche sowie einer hohen Dichte großer Branchenvertretern²⁹ verfügt Hessen über ein stark diversifiziertes Akteursnetz entlang zentraler Verkehrskorridore. Im bundesweiten Vergleich zählt die Prognos AG die Region Rhein-Main im Rahmen ihres Zukunftsatlas konsequent zu den drei leistungsfähigsten Logistikclustern des Landes.

²⁹ DB Cargo, Deutsche Post, DHL, UPS, Dachser, GLS, Lufthansa Cargo und DB Schenker

Der Flughafen Frankfurt zählt zu den weltweit bedeutendsten Luftverkehrsdrehkreuzen. Im Jahr 2024 wurden am Standort rund 61,6 Millionen Passagiere abgefertigt, (Wachstum von 3,7 Prozent gegenüber dem Vorjahr, insgesamt 99 Fluggesellschaften am Standort) (39).

Auch im Luftfrachtbereich nimmt der Flughafen Frankfurt eine führende Stellung ein: Mit einem jährlichen Umschlagvolumen von 2,1 Millionen Tonnen im Jahr 2024, was einer Steigerung von 6,2 Prozent gegenüber dem Vorjahr entspricht, bleibt er der größte Cargoflughafen Europas und zählt weltweit zu den bedeutendsten Frachtstandorten. Die Zahl der Flugbewegungen stieg um 2,4 Prozent auf 440.853 Starts und Landungen (39).

Im Rhein-Main-Verkehrsverbund (RMV), dessen Verbundgebiet eine Fläche von rund 14.000 km² umfasst, wurde im Jahr 2024 ein neuer Fahrgastrekord erreicht: 825 Millionen Passagiere. Dies entspricht einer deutlichen Steigerung gegenüber 2023 (730 Millionen Fahrgäste) und übertrifft sogar den bisherigen Rekord von 2019 mit 808 Millionen Fahrgästen. Der Erfolg wird maßgeblich dem Deutschland-Ticket zugeschrieben. Die Einnahmen des Verbunds beliefen sich 2024 auf 880 Millionen Euro (40).

Auch im überregionalen Schienenverkehr führen wichtige innerdeutsche wie internationale Fernverkehrsstrecken durch Hessen (z.B. Köln-Frankfurt und Hannover-Würzburg bzw. Frankfurt-Paris). Auf 25 Ferngleisen, 4 S-Bahngleisen, 4 U-Bahngleisen sowie 3 × 2 Tramgleisen wurden 2020 450.000 Reisende pro Tag bedient, womit der Frankfurter Hauptbahnhof im Jahr 2020 der am zweitmeisten frequentierte Bahnhof Deutschlands und der mit den meisten Direktverbindungen war (41).

Für die hessische Binnenschifffahrt sind der Rhein und der Main die wichtigsten Wasserstraßen. Sie koppeln das Rhein-Main-Gebiet an das europäische Wasserstraßennetz. Mit der Schifffahrtsroute Nordsee-Rhein-Main-Donau-Schwarzes Meer führt für die Binnenschifffahrt in Europa kaum ein Weg am Rhein-Main-Gebiet vorbei. Zusätzlich ist der Trimodalport im Industriepark Höchst, mit direkter Anbindung an Schiffs-, Schienen- und Straßenverkehr, der einzige deutsche Binnenhafen, in dem größere Mengen Gefahrstoffe gelagert um umgeschlagen werden können.

Von diesen infrastrukturellen Kernelementen in der Region kann die noch junge Wasserstoffwirtschaft ebenfalls florieren, da neben der Erzeugung auch die Distribution großer Mengen (multimodale Transportmöglichkeiten) und der Verbrauch von Wasserstoff insbesondere im Schwerlastverkehr und den Industrien auf einer stabilen Lieferkette und damit auf guter Infrastruktur fußen. In den vergangenen Jahren, hat es daher bereits eine initiale Entwicklung der Wasserstoffwirtschaft gegeben und es gibt bereits konkrete Wasserstoffaktivität in der Region. Diese reichen von spezifischen Projekten oder Tankstellen, über spezialisierte Unternehmen und Institutionen bis hin zu Stakeholdernetzwerken. In der folgenden Übersichtskarte und -tabelle sind die Wasserstoffaktivitäten der Region dargestellt und aufgelistet:

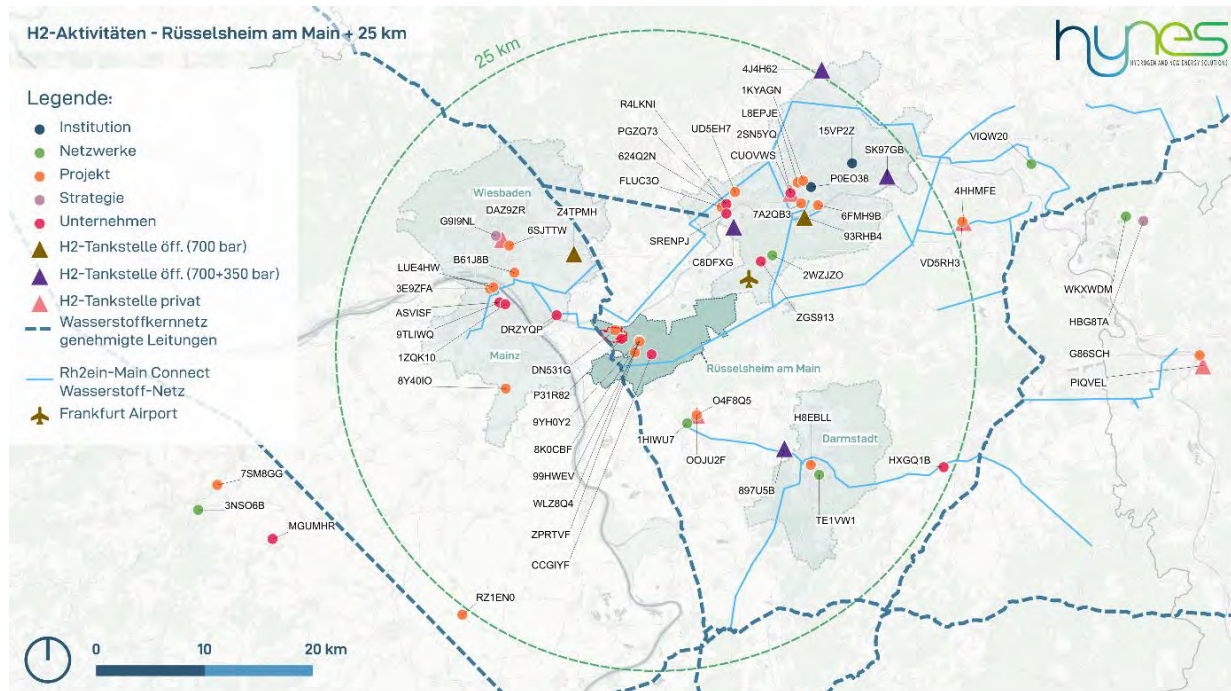


Abbildung 4-20: Wasserstoffaktivitäten in Rüsselsheim und Umgebung (eigene Darstellung)

Kennung	Titel	Kategorie
L8EPJE	MCFC Brennstoffzelle im Radisson-Blu-Hotel	Projekt
CUOVWS	Brennstoffzellen-Busflotte	Unternehmen
HXGQ1B	Brennstoffzellenbus für RMV	Unternehmen
8K0CBF	HyLevel - Optischer Füllstandssensor für Festkörper Wasserstofftanks	Projekt
1KYAGN	MH2Regio – Aus Müll wird Mobilität	Projekt
7A2QB3	EcoEdge PrimePower (E2P2) - Brennstoffzellen Rechenzentren	Projekt
99HWEV	rHYn-main - regionaler Wasserstoff für den ÖPNV	Projekt
B61J8B	Brennstoffzellen Müllwagen	Projekt
PGZQ73	Wasserstofftankstelle für Personenzüge	Projekt
R4LKNI	Brennstoffzellenzüge	Projekt
G9I9NL	Hessische Wasserstoffstrategie	Strategie
DRZYQP	Papiermaschine mit grünem Wasserstoff	Unternehmen
9TLIWQ	H ₂ -Einspeisung für Glasproduktion	Unternehmen
3NSO6B	HyStarter II: Region Rheinhessen-Nahe	Netzwerke
VD5RH3	Intelligentes Betankungskonzept zur ganzheitlichen Nutzung erneuerbaren Wasserstoffs	Projekt
ZPRTVF	KPM - Entwicklung und Integration von kleinen und präzisen MEMS-Mikrosensoren für selektive Wasserstoffmessungen	Projekt
1ZQK10	Brennstoffzellen-Busflotte	Unternehmen
624Q2N	PtL-Anlage	Unternehmen
ASVISF	Kopernikus - Projekt P2X	Projekt

LUE4HW	Zukunftskraftwerk (ZKW)	Projekt
9YH0Y2	CleanEngine - Plattform zur Entwicklung dynamisch-energetisch optimierter BZ-Antriebe	Projekt
DN531G	HyLightCom - Vivaro-e Hydrogen	Projekt
7SM8GG	HyStarter - H2 Produktion aus biogenen Reststoffen Kompostwerk	Projekt
RZ1EN0	HyStarter - Elektrolyse am Deponiestandort Framersheim	Projekt
FN0INH	HyStarter - Südzucker AG - H2 Einspeisung	Unternehmen
MGUMHR	HyStarter - JUWÖ Poroton-Werke - Energieversorgung	Unternehmen
3E9ZFA	MaHYnzExperts - Anschluss Mainz an RH2INE	Projekt
HBG8TA	Energiezukunft Alzenau	Strategie
PIQVEL	H2-Tankstelle Aschaffenburg	H2-Tankstelle privat
G86SCH	Brennstoffzellen-Müllsammelfahrzeug und Busse	Projekt
O4F8Q5	Brennstoffzellen-Busse	Projekt
P31R82	Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie	Unternehmen
H8EBLL	Reallabor DELTA - Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur	Projekt
TE1VW1	TU Darmstadt - Xchange-Cluster H2	Netzwerke
15VP2Z	H2-Labor	Institution
WLZ8Q4	H2-Labor	Institution
FLUC3O	Chlor-Alkali Elektrolyse	Projekt
UD5EH7	Brennstoffzelle für Klinikums Frankfurt Höchst	Projekt
P0EO38	Forschung Elektrolyse Pyrolyse	Institution
ZGS913	Flüssigwasserstoff	Unternehmen
1HIWU7	H2BZ Initiative Hessen e.V.	Netzwerke
2WZJZO	House of Logistics and Mobility	Netzwerke
VIQW20	Materials Valley (Hanau)	Netzwerke
WKXWDM	H2-Stammtisch Fraunhofer IWKS	Netzwerke
CCGIYF	Wasserstofftechnologie	Unternehmen
6FMH9B	H2-ready Kraftwerk am ehemaligen HKW West	Projekt
6SJTTW	Rh2ein-Main Connect - Regionales Wasserstoff-Netz	Projekt
SRENPJ	PEM-Elektrolyseanlagen	Unternehmen
8Y40IO	Energiepark Mainz	Projekt
Z4TPMH	H2-Tankstelle Wiesbaden	H2-Tankstelle öffentlich - 700 bar
C8DFXG	H2-Tankstelle - Frankfurt Höchst	H2-Tankstelle öffentlich - 700 bar + 350 bar
93RHB4	H2-Tankstelle Frankfurt Niederräder Ufer	H2-Tankstelle öffentlich - 700 bar
4J4H62	H2-Tankstelle Bad Homburg	H2-Tankstelle öffentlich - 700 bar + 350 bar
SK97GB	H2-Tankstelle Frankfurt Hanauer Landstr.	H2-Tankstelle öffentlich - 700 bar + 350 bar

897U5B	H ₂ -Tankstelle Weiterstadt	H ₂ -Tankstelle öffentlich - 700 bar + 350 bar
DAZ9ZR	H ₂ -Tankstelle Betriebshof	H ₂ -Tankstelle privat
2SN5YQ	H ₂ -Tankstelle Betriebshof	H ₂ -Tankstelle privat
OOJU2F	H ₂ -Tankstelle Betriebshof	H ₂ -Tankstelle privat
4HHMFE	H ₂ -Tankstelle	H ₂ -Tankstelle privat

4.3. Mögliche Abnehmer des Wasserstoffs (Industrie, Verkehr, Energieversorgung)

In vergleichbaren Regionen konzentriert sich die Nachfrage nach Wasserstoff insbesondere auf die Sektoren Mobilität, energieintensive Industrieprozesse sowie dezentrale Wärmeversorgung. Die Industrie zeigt sich in der Regel preissensitiv, Synergien durch gemeinsame Logistik oder Infrastruktur können jedoch wirtschaftliche Vorteile schaffen.

Als potenzielle Abnehmer gelten insbesondere kommunale Flotten im Bereich ÖPNV und Entsorgung. In vergleichbaren Projekten werden H₂-Bedarfe zwischen 10 und 100 Tonnen pro Jahr für solche Anwendungen kalkuliert. In der Region Rüsselsheim könnte zusätzlich der Verkehrssektor rund um den Frankfurter Flughafen berücksichtigt werden.

Auf Basis geeigneter, substituierbarer Flüge, zugehörigen Kerosinbedarfs, einem Flottentausch von 30 % des Kurzstreckensegments im Jahr 2050 wird am Flughafen Frankfurt ein Wasserstoffbedarf von bis zu 332 t/d in 2050 prognostiziert. Dabei handelt es sich um ein konservatives Szenario.

H₂-Bedarf in Tonnen pro Tag – Einflottung in Prozent

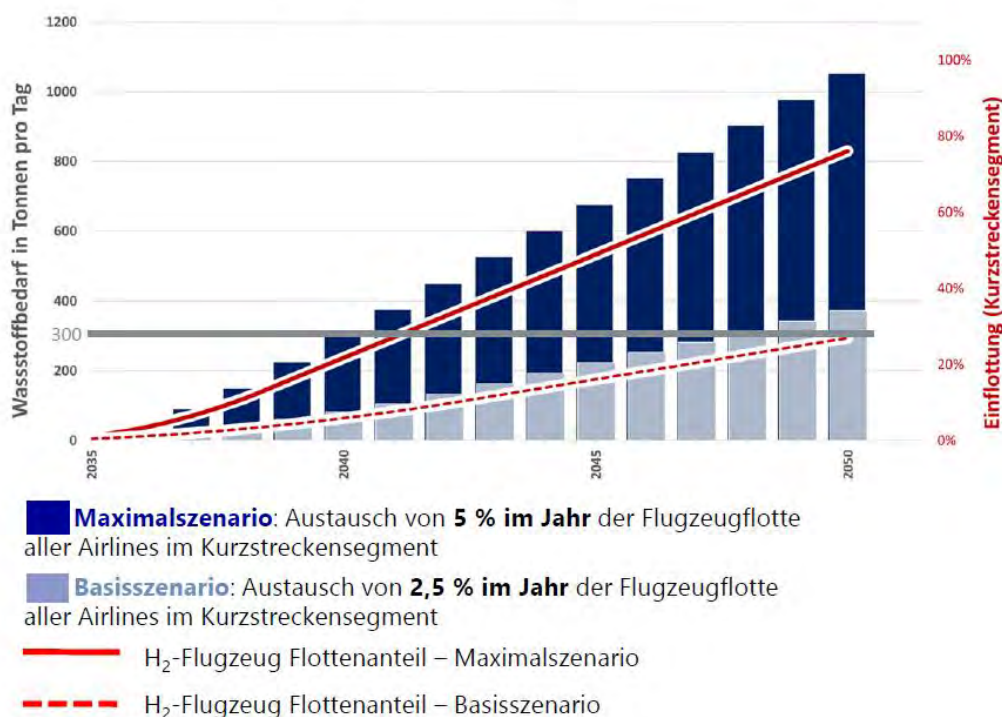


Abbildung 4-21: Hochlaufszzenarien und Wasserstoffbedarfe Flughafen Frankfurt (42)

In Frankfurt liegt der Anteil der Flüge, die durch Wasserstoffflugzeuge angeboten werden könnten (Streckenlänge bis 2.000 km und bis 100 Sitzplätzen) bei ca. 15 % am Gesamt-aufkommen. Übertragen auf Kerosinmenge könnten etwa 16 % des gesamten Kerosins durch Wasserstoff ersetzt werden. (42)

Für industrielle Wasserstoffanwendungen sind insbesondere Betriebe im verarbeitenden Gewerbe sowie in der chemischen oder metallverarbeitenden Industrie relevante Zielgruppen. Voraussetzung ist eine Anbindung an Transportachsen und ein kalkulierbarer Energiebedarf.

Neben den verkehrlichen Superlativen des Flughafens und der Logistik ist das Rhein-Main Gebiet vor allem von den Wasserstoffaktivitäten im Rahmen Rhein-Main Connect, des Industriepark Höchst als wichtigstem Wasserstoffhub und des Rhein-Main Verkehrsverbundes (RMV) geprägt.

Der Großraum Frankfurt ist durch den als chemisches Nebenprodukt des im Industriepark Höchst entstehenden (grauen) Wasserstoffs in der Lage, als zentrale Anfangsversorgung für Wasserstoffprojekte zu dienen. Der Standortbetreiber Infraserb Höchst bietet im Bereich Wasserstoff Lösungen zur Versorgung, Betankung und Infrastruktur für F&E-Anlagen sowie Wissenstransfer für mobile und stationäre Anwendungen an. Zusammen mit anderen Partnern werden innovative Konzepte rund um den Energieträger Wasserstoff entwickelt. Im Jahr 2022 wurde am Standort die Zugtankstelle für die weltweit größte Wasserstoff-Brennstoffzellenflotte von 27 Zügen des RMV in Betrieb genommen. Darüber hinaus bietet der Standort bereits seit 2006 eine der ersten öffentlichen (Wasserstofftankstelle - Hydrogen Refueling Station) HRS Deutschlands. Hier können einige hundert PKW, LKW und Busse Wasserstoff bei 350 und 700 bar tanken. Durch Projekte, wie die Beschaffung der Wasserstoff-Brennstoffzellen-Züge von Alstom oder die Umrüstungen von ÖPNV-Unternehmen in der Stadt Frankfurt (In-der-City-Bus) und in der näheren Umgebung auf Wasserstoff-Brennstoffzellen-Busse, ist jedoch eine Kapazitätsgrenze in naher Zukunft absehbar. Es ist also notwendig weitere Wasserstoffquellen zu erschließen und mit den Anwendern intelligent zu vernetzen. Das Gesamtsystem muss in der Lage sein, eine garantierte Grundversorgung für alle zukünftige Wasserstoffnutzer zu schaffen. Dabei müssen die Quellen nachhaltig erzeugten Wasserstoff in örtlicher Nähe zu den Anwendern bereitstellen, um durch kurze effiziente Transportwege den ökologischen Einfluss der Logistik auf das Gesamtsystem niedrig zu halten. Bei Brennstoffzellenanwendungen, bei dem der Reinheitsgrad des Wasserstoffs überaus wichtig ist, könnte der per Trailer aus einer eng kooperierenden Quelle angelieferte Wasserstoff relativ zu Kernnetzwasserstoff im Vorteil sein, da eine eventuell vorher anfallende Aufbereitung des Wasserstoffs ausgelassen werden kann.

Neben dem Verbrauch aus dem ÖPNV und kommunalen Flotten wird der zukünftige Wasserstoffbedarf von den Großverbrauchern des Frankfurter Flughafens bzw. der Fraport AG einschließlich den in der Peripherie ansässigen Logistikunternehmen, dem Rhein-Main Verkehrsverbund/der fahrzeugmanagement GmbH mit der Brennstoffzellenzugflotte und weiteren, meist industriellen Verbrauchern, wie der Schott AG oder Essety geprägt sein. Vor allem die Möglichkeiten der Defossilisierung des Luftverkehrs über Wasserstoff und dessen Derivate werden bei der Hessen Trade & Invest GmbH/CENA³⁰ gebündelt. Für einen im Zuge des Markthochlaufs brennstoffzellenelektrischer Anwendungen im Verkehrs- und Industriesektor steigenden Wasserstoffbedarf befinden sich die Energieversorgungsunternehmen bzw. Netzbetreiber Mainova AG, ESWE-Versorgung und Entega AG im Rahmen einer Machbarkeitsstudie zu einem regionalen Wasserstoffnetz im engen Austausch. Power-to-Liquid Aktivitäten sowie möglicher Import von Sustainable Aviation Fuels ist das wesentliche Geschäftsfeld der Hy2gen AG.

³⁰ Centre of Competence for Climate, Environment and Noise Protection in Aviation

Nur wenn die Wasserstoffwertschöpfungskette holistisch betrachtet und entwickelt wird, sind mittel- und langfristig Synergiepotentiale zu heben. Dies umfasst den Technologiemarkthochlauf genauso wie vor- und nachgelagerte Prozesse. Am Industriepark Hanau-Wolfgang befindet sich mit dem Materials Valley e.V. und der Fa. Umicore AG & Co. KG der Innovationstreiber für Katalysatoren, Materialforschung und Rezyklierung. Hier werden u.a. Elektrokatalysatoren für Brennstoffzellen und Elektrolyseure produziert. Unterstützt werden die Maßnahmen des Querschnittsthemas Circular-Economy vom GreenMat4H2 Leistungszentrum – GreenMaterials for Hydrogen –, bestehend aus der Fraunhofer-Einrichtung für Wertstoffkreisläufe und Ressourcenstrategie IWKS und dem Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF. Ziel des Leistungszentrums ist es, »grüne« Materiallösungen für die Wasserstoffwirtschaft zu entwickeln und die Zuverlässigkeit von Wasserstoff-beaufschlagten Systemen sicherzustellen. Auch die Schnitt- und Transferstelle zwischen Wissenschaft und Praxis im Verkehrssektor hat mit dem House of Logistics & Mobility (HOLM) GmbH ihren Sitz in Frankfurt/Rhein-Main. Ziel des HOLMS ist es, durch Wissenstransfer sowohl in Fachkreise als auch die breite Öffentlichkeit die Wettbewerbsfähigkeit der Mobilitäts- und Logistikwirtschaft in der Region und deutschlandweit zu stärken. Das HOLM ist durch das Aufgabengebiet sowie den Standort am Flughafen Frankfurt die passgenaue Schnittstelle in den Flug-, Schienenpersonen-, Schienengüter- sowie Straßengüterverkehr.

4.4. Kostenanalyse für die Elektrolyseanlage

Die Bandbreite der Levelised Cost of Hydrogen (LCOH) reicht laut Hydrogen Europe je nach Technologie und Rahmenbedingungen von ca. 1,7 bis über 10 €/kg H₂. Während Wasser-Elektrolyse derzeit die teuerste Technologie ist, weist sie das größte Kostenminderungspotenzial auf. Die hohe Abhängigkeit von Strompreisen und Auslastung führt zu einer Streuung der Kosten. (7)

Die LCOH setzen sich aus Investitionskosten (CAPEX), Betriebskosten (OPEX), Stromkosten, Netzgebühren, Wartung, Stack-Ersatz, Versicherungen und Nebenerlösen (z.B. Sauerstoffverkauf) zusammen. Für AEL-Elektrolyseure liegen die CAPEX aktuell bei ca. 2.250 €/kW. Die OPEX liegen bei etwa 2–3 % der CAPEX. Entscheidend ist die Strombezugsstrategie: Der Anteil erneuerbarer Energien, PPA-Verträge, Direktleitung und Reststrom aus dem Netz bestimmen die Stromkostenanteile, die mit bis zu 2/3 den größten Anteil an den Gesamtkosten ausmachen können. (7)

Ein 100-MW-AEL-Projekt verursacht aktuell LCOH von ca. 7,1 €/kg bei 5.500 Betriebsstunden/a, Strom aus einem Mix von Direktleitung, PPA und Netzbezug. Abhängig von Auslastung und Strompreis reichen die Werte von ca. 6,0 bis 9,1 €/kg.

Für die Potenzialanalyse werden drei Szenarien mit Anschlussleistungen von 10, 50 und 200 MW (siehe Kapitel 3.1) unterstellt. Diese basieren auf einem Betrieb mit 6.000 Volllaststunden pro Jahr. Unter den genannten Kostenannahmen ergeben sich für die Szenarien Investitionskosten (CAPEX) von rund 22,5 Mio. € (10 MW), 112,5 Mio. € (50 MW) und 450 Mio. € (200 MW). Die resultierende tägliche Wasserstoffproduktion liegt bei ca. 3,1 t, 15,6 t bzw. 62,4 t, was jährlich rund 1.138 t, 5.616 t bzw. 22.464 t entspricht. Ausgehend von einer konservativen LCOH-Schätzung von 6,5 bis 8,0 €/kg H₂ (bei AEL-Technologie), ergeben sich jährliche Produktionskosten von rund 7,4 bis 9,1 Mio. € (10 MW), 36,5 bis 45 Mio. € (50 MW) und 146 bis 180 Mio. € (200 MW). Mit zunehmender Anlagengröße sinken die spezifischen Herstellungskosten durch Skaleneffekte, während kleinere Anlagen wirtschaftlich nachteilig sind.

OPEX-Anteile (Wartung, Personal, Ersatzteile etc.) liegen je nach Szenario bei ca. 0,5 bis 1 Mio. €/a (10 MW), 2 bis 2,5 Mio. €/a (50 MW) und 8 bis 10 Mio. €/a (200 MW). Einnahmen aus

Sauerstoffverkauf, Nutzung von Abwärme (z. B. 56 bis 1.120 MWh/d je nach Szenario) und ggf. Flexibilitätsmärkten könnten zu Kostensenkungen beitragen, hängen jedoch stark vom jeweiligen Standort und den Absatzmöglichkeiten ab.

Szenario	CAPEX [Mio. €]	Produktionskosten p.a. [Mio. €]	OPEX p.a. [Mio. €]	Wasserstoffproduktion p.a. [t]
10 MW	22.5	7,4–9,1	0,5–1	1138
50 MW	112.5	36,5–45	2–2,5	5616
200 MW	450.0	146–180	8–10	22464

Tabelle 4-1: Kostenschätzungen der verschiedenen Szenarien (eigene Berechnungen)

5. Nachhaltigkeit und Umweltauswirkungen

Ein Wasserstoffprojekt auf dem ehemaligen Opel/Stellantis-Gelände in „Rüsselsheim West“ kann zu einem zentralen Baustein einer regionalen Energiewende und nachhaltigen Stadtentwicklung werden. Die Errichtung einer Wasserstoffproduktions-, Speicher- und Transportinfrastruktur auf Industrieflächen wirkt sich dabei direkt und indirekt auf mehrere Sustainable Development Goals (SDGs) der Vereinten Nationen aus. Diese lassen sich in primäre Effekte der Wasserstofferzeugung und -nutzung sowie in sekundäre Wirkungen durch den Aufbau eines regionalen Wasserstoffökosystems unterteilen.



Abbildung 5-1: Sustainable Development Goals (SDGs) der UN. grüner Rahmen = im Projekt betroffen

Klimaschutz und Energiewende (SDG 13, SDG 7)

Primäre Effekte auf SDG 13 (Maßnahmen zum Klimaschutz) ergeben sich durch die direkte Substitution fossiler Energieträger. Die ausschließliche Nutzung erneuerbarer Energien gewährleistet eine vollständige Dekarbonisierung der Wasserstoffproduktion und trägt gleichzeitig zur Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien im regionalen Energiemix bei (SDG 7). Zudem verbessert die Speicherfunktion des Wasserstoffs die Integration volatiler erneuerbarer Stromquellen und erhöht die Flexibilität des Energiesystems (43 S. 7).

Sekundäre Effekte entstehen durch den Aufbau einer regionalen Wasserstoffinfrastruktur. Wasserstofftankstellen ermöglichen die Umstellung von Schwerlast-, Logistik- und perspektivisch kommunalen Fahrzeugen auf Wasserstoffantriebe. Auch wenn die Stadtwerke Rüsselsheim GmbH derzeit auf batterieelektrische Busse setzen, könnten andere kommunale Einsatzfahrzeuge – etwa Müll- oder Winterdienstfahrzeuge – künftig vom Einsatz der Wasserstofftechnologie profitieren (44). Die strategische Lage Rüsselsheims im Rhein-Main-Gebiet erhöht zudem die überregionale Relevanz der Infrastruktur.

Die Anbindung an das Wasserstoffkernnetz eröffnet weitere Dekarbonisierungspotenziale. H₂-ready ausgerüstete Gaskraftwerke in der Region könnten sukzessive auf Wasserstoff umgestellt und so in die emissionsfreie Stromerzeugung integriert werden.

Menschenwürdige Arbeit und Bildung (SDG 8, SDG 4)

Das Projekt schafft hochwertige Arbeitsplätze im Anlagenbetrieb, der Wartung und Systemüberwachung. Deutlich bedeutender sind jedoch die indirekten Beschäftigungseffekte durch die Ansiedlung wasserstoffnutzender Industrien, etwa aus der Chemie- oder Stahlbranche. Diese können grünen Wasserstoff als Reduktionsmittel oder Prozessgas einsetzen und ihre Produktionsverfahren dekarbonisieren.

In Kooperation mit der Hochschule RheinMain kann ein regionaler Kompetenzcluster entstehen. Das bestehende Wasserstofflabor ermöglicht praxisnahe Ausbildung sowie angewandte Forschung und Entwicklung (45). Diese Verbindung von Wissenschaft und Industrie fördert SDG 4 (Hochwertige Bildung) durch zukunftsgerichtete Bildungsangebote und Fachkräfteentwicklung.

Gesundheit und Lebensqualität (SDG 3, SDG 11)

Wasserstoffbasierte Antriebe verursachen keine lokalen Luftschadstoffe wie Stickoxide, Feinstaub oder Schwefeldioxid. Ihre Anwendung im Verkehrssektor verbessert die Luftqualität nachhaltig. Besonders im urbanen Raum – wie dem dicht besiedelten Rhein-Main-Gebiet – ist diese Wirkung bedeutend (46 S. 15). Sekundär tragen die geringeren Lärmemissionen brennstoffzellenelektrischer Fahrzeuge zur Verbesserung der Lebensqualität bei.

Die Revitalisierung der Industriefläche vermeidet zusätzliche Flächenversiegelung und verhindert die Entstehung neuer Brownfieldflächen. Durch Integration in die bestehende Infrastruktur und intelligente Vernetzung mit anderen Sektoren entsteht eine klimaresiliente Stadtstruktur (SDG 11).

Industrie, Infrastruktur, Kreislaufwirtschaft (SDG 9, SDG 12)

Die Wasserstoffproduktionsanlage stellt eine innovative Industrieinfrastruktur dar. Nebenprodukte wie Sauerstoff und Abwärme können vollständig genutzt werden – in industriellen Prozessen oder Wärmenetzen –, was die Ressourceneffizienz erhöht und SDG 12 (Nachhaltige Produktionsmuster) unterstützt.

Durch die Nähe zur Hochschule, zu SEGULA Technologies als umfassenden Engineeringdienstleister und Hyundai als Brennstoffzellen-Nutzfahrzeug Vorreiter sowie zahlreichen anderen Technologieunternehmen entsteht ein regionales Innovationsökosystem. Dies fördert technologische Entwicklungen im Bereich Wasserstofftechnologie und -speicherung sowie neue industrielle Anwendungen (SDG 9).

Partnerschaften und Governance (SDG 17)

Die Umsetzung des Projekts erfordert enge Kooperation zwischen Kommunalverwaltung, Energiewirtschaft, Industrie, Forschung und Finanzierungspartnern. Diese sektorübergreifenden Allianzen schaffen neue Formen der Zusammenarbeit und stärken SDG 17 (Partnerschaften zur Zielerreichung). Die Wasserstoffwirtschaft verlangt komplexe Wertschöpfungsketten und neue Kooperationsmodelle, die als Blaupause für andere nachhaltige Entwicklungsprojekte dienen können.

Dabei gilt: Es gibt keine „One Size fits all“-Lösung. Die Transformation hin zu einer nachhaltigen Wirtschaft erfordert tiefgreifende Anpassungen bestehender Strukturen in nahezu allen Sektoren. Die Energiewende bringt Herausforderungen wie die Integration erneuerbarer Energien, die Sicherstellung der Rohstoffverfügbarkeit, den Ausbau von Langzeitspeichern und

die Bewältigung der Volatilität mit sich. Parallel dazu müssen Lösungen für die Wärmewende (z. B. Prozess- und Hochtemperaturwärme) sowie die Verkehrswende entwickelt werden – insbesondere im Gütertransport. Eine Wirtschaft, die auf Wasserstoff statt auf fossile Energieträger wie Erdöl und Erdgas basiert, ist komplex und verlangt ein neues Denken in Infrastruktur, Technologie und Zusammenarbeit.

Zusammenfassung

Das Projektvorhaben weist sowohl direkte als auch indirekte Wirkungen in Bezug auf Nachhaltigkeit im Sinne der Sustainable Development Goals auf.

Im Bereich Umwelt (Environmental) trägt die geplante Erzeugung von grünem Wasserstoff zur Minderung von CO₂-Emissionen bei (SDG 13). Durch die Funktion als Energiespeicher kann durch eine Wasserstoffherzeugung der Anteil erneuerbarer Energien am sektorenübergreifenden Endenergieverbrauch erhöht werden. Dadurch sinkt der Bedarf fossiler chemischer Energieträger wie Öl, Kohle und Erdgas. Die potenzielle Verwendung von Wasserstoff in Verkehr und Industrie wirkt sich zusätzlich positiv auf die Luftqualität aus (SDG 3) indem Luftschadstoffemissionen wie Stickoxide in brennstoffzellenelektrischen Anwendungen vollständig entfallen. Die Nutzung von Nebenprodukten wie Abwärme und Sauerstoff aus dem Elektrolyseprozess kann zur Effizienzsteigerung bestehender Infrastrukturen beitragen (SDG 9). Durch lokal produzierten Wasserstoff kann dem industriellen Sektor ein nachhaltiges Erdgassubstitut für Hochtemperaturprozesse bereitgestellt werden und Investitionen in Innovationen aktiv befördern.

Im sozialen Bereich (Social) sind Wirkungen in Form von Arbeitsplatzsicherung und potenzieller Beschäftigung in zukunftsorientierten Industriezweigen zu erwarten (SDG 8). Die Etablierung eines regionalen Wasserstoffclusters unterstützt die wirtschaftliche Entwicklung sowie die Diversifizierung der Energieversorgung (SDG 7, SDG 12). Durch Bildungs Kooperationen mit Hochschulen wird außerdem eine bildungsfördernde Dimension aufgespannt (SDG 4).

Governance-relevante Aspekte ergeben sich aus der Einbindung kommunaler, wirtschaftlicher und wissenschaftlicher Akteure in den Planungs- und Umsetzungsprozess (SDG 17).

Die Nutzung einer bereits versiegelten Industriefläche vermeidet zusätzliche Flächenversiegelung und steht im Einklang mit dem Ziel der ressourcenschonenden Flächennutzung (SDG 11).

6. Synergien und Innovationen

Das folgende Kapitel analysiert das Potenzial einer regionalen Wasserstoffwirtschaft in der Rhein-Main-Region. Es stellt die Chancen zur Dekarbonisierung und die sich ergebenden Synergieeffekte in Schlüsselbereichen wie Verkehr und Industrie den zentralen Herausforderungen gegenüber. Dazu zählen infrastrukturelle, marktliche und organisatorische Risiken. Die Einordnung in den strategischen Rahmen des Landes Hessen zeigt abschließend die politische und wirtschaftliche Bedeutung dieser Entwicklungen auf. Anschließend werden die Synergiepotenziale eines sektorübergreifend geplanten Wasserstoffelektrolyseurs für die städtische Infrastruktur erläutert, um dann die Bedeutung der regionalen Kooperationen zu beleuchten.

Chancen

Als flexibles Element der Sektorenkopplung wird Wasserstoff in den Sektoren Verkehr, Stromerzeugung und -verteilung, Industrie sowie dem Haushalts- und Gewerbesektor Verwendung finden. Um das volle Potenzial entfalten zu können, müssen die Wasserstofferzeugungs- und Verteilungskapazitäten allen Sektoren zuverlässig und diskriminierungsfrei zur Verfügung stehen. Der Verkehrssektor nimmt aufgrund der besonderen Bedeutung in der Region Rüsselsheim am Main /Rhein-Main in Deutschland und Europa eine hohe wirtschaftliche Bedeutung ein. Die herausragenden Verkehrsanbindungen bringen den Städten und Gemeinden und den dort ansässigen Wirtschaftsunternehmen einen wichtigen Standortvorteil. Andererseits fördert das enorme Verkehrsaufkommen den Klimawandel und führt zu hoher Luftverschmutzung und zu hohen Lärmbelastungen für die Bevölkerung des Ballungsraums. Hier können neben den batterieelektrischen auch die brennstoffzellenelektrischen Fahrzeuge eine deutliche Verbesserung bringen. Dies gilt insbesondere für den Güterverkehr und den Öffentlichen Personennahverkehr, da hier schwere Fahrzeuge hohe Tagesfahrleistungen zurücklegen. Nicht zuletzt hat der Flughafen Frankfurt großes Interesse, seine lokalen CO₂-Emissionen zu senken. Eine vollständige Umstellung der in der Region Rüsselsheim am Main entfallenen Verkehrslasten auf Wasserstoff würde einen signifikanten Beitrag zum Klimaschutz liefern. Um den steigenden Bedarf an Wasserstoff sektorenübergreifend zu decken und gleichzeitig eine höhere Versorgungssicherheit zu erreichen, ist der Aufbau einer effizienten und vernetzten Wasserstoffinfrastruktur notwendig.

Rüsselsheim am Main liegt durch die Nähe zu Frankfurt in der am schnellsten wachsenden Rechenzentrumsregion Europas und weist kontinuierlich steigenden Energiebedarf auf. Gemessen in IT-MW Anschlussleistung sind in Hessen im Jahr 2020 mehr als 600 MW Rechenzentrumskapazität installiert. Frankfurt weist mit dem DE-CIX hinsichtlich Datenvolumen den größten Internetknoten weltweit auf. Es werden insbesondere sehr große Rechenzentren neu geplant und gebaut, deren IT-Anschlussleistungen oberhalb von 100 MW liegt. Der Standort Rhein-Main nimmt hier eine besondere Bedeutung ein. Dabei kann auf Basis vergangener Projekte zum Einsatz der Brennstoffzellentechnologie in Rechenzentren (als Netzersatzanlage, Kühlleistung) ein Beitrag für weitere schwer zu dekarbonisierende Sektoren erreicht werden. Auch der Wärmeenergiebedarf in der Metropolregion Rhein-Main ist vor allem in den urbanen Gebieten enorm und kann durch lokale regenerative Quellen nicht vollständig gedeckt werden. Wasserstoff kann hier mittel- und langfristig zur Dekarbonisierung im Wärmemarkt beitragen. Ausgehend von einer Wasserstoffquelle in Rüsselsheim am Main, einer weiteren Betankungseinrichtung für Nutzfahrzeuge und der dadurch entstehenden regionalen Wasserstoffsенке können mittels leitungsgebundenem Wasserstofftransport Synergieeffekte in allen Sektoren gehoben und die Transportkosten deutlich gesenkt werden. Diese Initialzündung würde zu einer Marktdurchdringung in allen Wertschöpfungsstufen führen und Wasserstoff als Zukunftsenergieträger in der Region etablieren. Gleichzeitig könnten die geschaffenen Erzeugungs- und Verteilstrukturen vor Ort das entstehende

Wasserstoffwirtschaftssystem regional stützen, absichern und eine hohe Gesamtsystemresilienz erzeugen.

Die Industrie und Energiewirtschaft sowie der Verkehrssektor bergen enormes Potenzial für wasserstoffbasierte Anwendungen, erfordern aber parallel den Aufbau einer leitungsgebundenen Netzinfrastruktur. Die Versorgung bestehender Wasserstoffverbraucher und Wasserstofftankstellen wird bis dato vorrangig per Lkw abgewickelt. Für ein resilientes System werden jedoch zukünftig eigene dezidierte Wasserstoffleitungen in Deutschland auf Übertragungs- und Verteilnetzebene benötigt. Neben einer Vielzahl an Schritten zur Etablierung einer nationalen und internationalen Wasserstoffwirtschaft benennt der Nationale Wasserstoffrat ergänzende Maßnahmen, wie beispielsweise den Aufbau von Wasserstoffhubs, welche als Schnittstelle zwischen Übertragungs- zu Verteilnetz signifikanten Einfluss auf die spezifischen Transportkosten haben werden.

Risiken

Eine der zentralen Herausforderungen des Wasserstofftechnologie-Markthochlaufs ist die organisatorische, zeitliche, genehmigungsrechtliche und technische Koordination einzelner bestehender, sowie geplanter Maßnahmen öffentlicher und privatrechtlicher Stakeholder entlang der gesamten Wasserstoff-Wertschöpfungskette. Um die Distributionswege kurz und damit energetisch sinnvoll zu gestalten ist es notwendig lokale Wasserstoffquellen und -senken zusammen zu bringen. Gegenseitige Abnahme- und Lieferverpflichtungen sind einerseits der Schlüssel zum Erfolg, gleichzeitig auch mit hohen Investitions- und Reputationsrisiken verbunden. Vielfach ist die Sorge vor einer nicht ausreichenden Wasserstoffversorgung ein Hinderungsgrund für die Investition in Wasserstoff-Brennstoffzellen-Betriebsflotten. Ebenso gilt dies für den geplanten Ausbau der Wasserstoff-Erzeugung, die wegen befürchteter mangelnder Abnahme ihres Produkts, und damit betriebswirtschaftlich schädigenden Stillständen in der Produktion, nur schleppend vorankommt. Marktteilnehmer und Erzeuger müssen aufeinander synchronisiert werden.

In Ballungsräumen sind neue Flächen für Industrieanlagen wie große Elektrolyseure zur Erzeugung von Wasserstoff nur eingeschränkt verfügbar bzw. genehmigungsfähig. Diese Industrie-flächen benötigen neben verkehrstechnisch günstigen Mobilitätsanbindungen auch eine erhöhte Versorgungsinfrastruktur, wie zum Beispiel elektrischen Strom und Wasser. Hinzu kommen eventuelle sicherheitstechnische Aspekte. Eine Möglichkeit dieser Problematik entgegenzutreten ist es, vorhandene Industrieanlagen hinsichtlich ihrer Kapazität an Fläche und Infrastruktur für die Erzeugung von Wasserstoff zu nutzen. Darüber hinaus sind Fragen der Einbindung in ein regionales Wasserstoffversorgungskonzept im Vorfeld zu Investitionsentscheidungen zu beantworten, um Planungssicherheit für alle Beteiligten zu schaffen.

Neben den infrastrukturellen und regulatorischen Herausforderungen sind auch markttechnische Risiken zu berücksichtigen. Der künftige Einsatz von Wasserstoff steht im Wettbewerb mit anderen Dekarbonisierungsoptionen, wie etwa der Direktelektrifizierung oder dem Einsatz synthetischer Energieträger. Deren technologische Fortschritte, wirtschaftliche Rahmenbedingungen und sektorale Einsatzgrenzen können maßgeblichen Einfluss auf die Nachfrage nach Wasserstoff nehmen und sollten daher als strategische Unsicherheitsfaktoren in der weiteren Entwicklung mitgedacht werden.

Einbindung in strategischen Rahmen des Landes

Das Land Hessen unterstützt und fördert die Entwicklung und den Einsatz der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie seit mehr als zwanzig Jahren. Dies spiegelt auch die im Herbst 2022 vorgestellte Wasserstoffstrategie des Landes Hessen durch das Hessische Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Wohnen wider. Mitgewirkt an der Ausarbeitung hat ein Fachbeirat bestehend aus Vertretern aus Industrie und Wissenschaft. In der Strategie wird

festgehalten, dass Wasserstoff eine wichtige Rolle für die klimafreundliche Energieversorgung Hessens spielen wird. Wasserstoff und seine Derivate werden künftig das zentrale Speichermedium für das fluktuierende Angebot an Wind- und Solarstrom sein. Zudem können über Wasserstoff als Energieträger Anwendungen mit erneuerbaren Energien versorgt werden, bei denen eine direkte Elektrifizierung kaum oder nicht möglich ist (z.B. Flug- und Seeverkehr, Logistikbranche, industrielle Prozesse). Hessen kann wesentliche Beiträge zum Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft leisten und verfügt über umfangreiche Kompetenzen entlang der gesamten Wertschöpfungskette. So wurden in den vergangenen Jahren bereits eine Vielzahl an Projekten seitens des Landes unterstützt und gefördert. Dies soll in den kommenden Jahren weiter intensiviert werden. Die Wasserstoffstrategie benennt expliziert drei Schwerpunktbereiche, ohne andere relevante Bereiche dabei auszuschließen:

- Wasserstoffbasierte alternative Kraftstoffe im Flugverkehr
- ÖPNV und Logistik
- Intelligente Netzwerkprojekte

Das Vorhaben befördert einen koordinierten Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft in den beteiligten Regionen und bringt die Transformation des Wirtschaftsstandorts Hessen und angrenzender Regionen für diese Zukunftstechnologien voran.

6.1. Integration der Wasserstofftechnologie mit anderen städtischen Projekten

Im Folgenden wird erläutert, welche Synergiepotenziale ein Wasserstoffelektrolyseur mit anderen städtischen Infrastrukturprojekten und -problemstellungen birgt und welche Chancen sich ergeben, wenn unabhängig vom konkreten Projekt und der produzierten Ressource „grüner Wasserstoff“ der Elektrolyseur projekt- und sektorübergreifend geplant und eingebettet wird.

Trotz der geplanten Anbindung an das Wasserstoffkernnetz bietet die dezentrale Wasserstoffherzeugung in Rüsselsheim am Main erhebliche Vorteile: Sie ermöglicht eine frühzeitige Versorgung lokaler Verbraucher, reduziert Transportkosten und schafft regionale Resilienz gegenüber überregionalen Versorgungsengpässen. Die Kombination aus lokaler Produktion und überregionaler Netzanbindung stärkt die Versorgungssicherheit und erlaubt eine flexible Skalierung des Wasserstoffangebots.

6.1.1. Herausforderungen der zeitlichen Diskrepanz von Nachfrage und Verfügbarkeit erneuerbarer Stromquellen

Das Energiesystem der Zukunft wird geprägt sein von hoher Volatilität der Erneuerbare Energien. Zu Peak-Zeiten werden wir große Mengen günstigen Stroms im Netz haben, was sich heute schon in negativen Börsenstrompreisen äußert. Gleichzeitig erzielt Strom zu Zeiten der kalten Dunkelflaute Rekordpreise. Das führt zu zwei Problemfeldern.

RÄUMLICHE VERFÜGBARKEIT

Problem

Die Energie ist nicht dort, wo sie sein muss. Netzengpässe verhindern das theoretische Konzept der Kupferplatte, Stromverbraucher bekommen keinen Netzanschluss.

ZEITLICHE VERFÜGBARKEIT

Problem

Die Energie ist nicht dann verfügbar, wenn sie benötigt wird. Zu den Peak-Zeiten am Morgen und am Abend sowie grundsätzlich zur Mittagszeit ist zu wenig Strom im System.

Lösung

Netzausbau, Regionalisierung, Flexibilisierung, Wasserstoff.

Lösung

Kurzzeitspeicher Batterie, Langzeitspeicher Wasserstoff, Flexibilisierung, Sektorenkopplung, Kapazitätsmarkt

Besonders in Zeiten mit geringem Energiebedarf (Phase P1) wird durch erneuerbare Quellen wie Wind und Solar häufig ein Energieüberschuss erzeugt. Dieser Überschuss führt zu niedrigen Strompreisen. Anstatt Erzeugungsanlagen abzuschalten, kann die überschüssige Energie sinnvoll genutzt werden – etwa durch kurzfristige Speicherung in Batterien oder langfristige Speicherung in stofflichen Energiespeichern wie Wasserstoff.

In Zeiten mit hohem Energiebedarf und gleichzeitig geringer Erzeugung aus erneuerbaren Quellen (Phase P2) kann diese gespeicherte Energie wieder ins Netz eingespeist werden. Zwar geht bei der Umwandlung und Speicherung ein Teil der Energie durch Wirkungsgradverluste verloren, doch diese Verluste können durch die höheren Erlöse in Phasen mit hohen Strompreisen wirtschaftlich kompensiert werden.

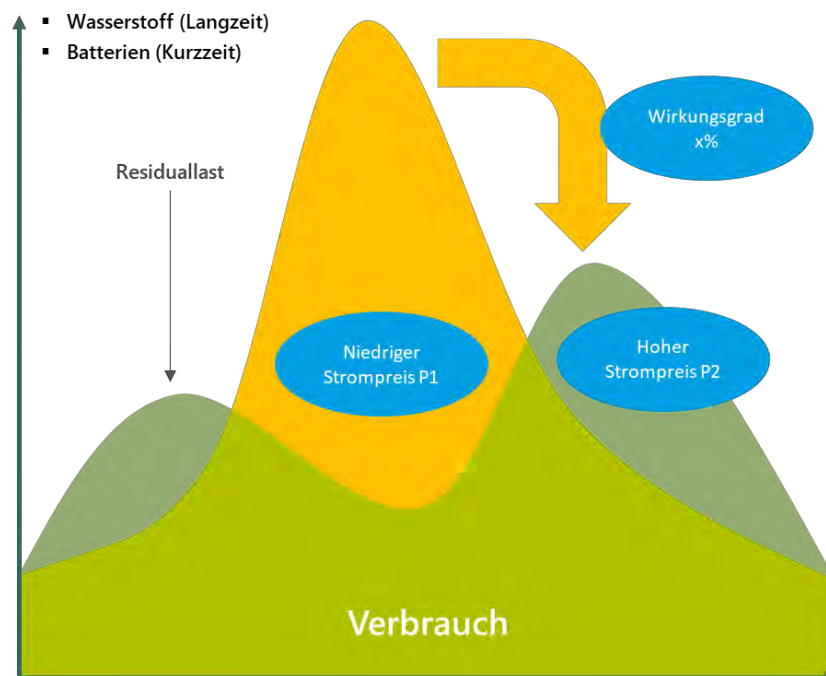


Abbildung 6-1: Herausforderung der zeitlichen Verfügbarkeit von EE (eigene Darstellung)

Hier bietet der Wasserstoff als Energiespeicher eine Möglichkeit die Nachfrage- und Angebotsspitzen im Gesamtsystem abzufangen und zu glätten, wodurch das Energiesystem stabiler und resilienter aufgestellt werden kann. Ein Elektrolyseur und der produzierte Wasserstoff müssen jedoch von weiteren Maßnahmen und Projekten flankiert werden, um effektiv als sektorübergreifend stabilisierender Versorgungsdienstleister aufwarten zu können.

6.1.2. Rechenzentren und Wärmenetze

Die zunehmende Digitalisierung von Prozessen in allen gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Bereichen und die damit verbundene Nachfrage nach Infrastruktur, die immer größere

Datenmengen verarbeiten kann, bilden einen der Grundsteine für eine nachhaltige und zukunftsorientierte wirtschaftliche Entwicklung einer Region und eines Landes.

Aufgrund dieser zentralen Relevanz, ist eine stabile, ausfallsichere und effiziente Energieversorgung von Rechenzentren von ausschlaggebender Bedeutung und sollte, auch aufgrund des hohen³¹ und durch das Wachsen von KI-Einsatz steigenden³² Energiebedarfs von Rechenzentren frühzeitig im energetischen Gesamtsystem der näheren Umgebung mitgedacht werden (47).

Eine Beschleunigung des Ausbaus ist demnach notwendig und bietet wirtschaftliche Potenziale für Regionen und Standorte: Innerhalb Deutschlands gilt insbesondere die Region Frankfurt/Rhein-Main, die mit dem weltweit größten Internetknoten DE-CIX verbunden ist, als besonders attraktiv. In dieser Region wird das größte Wachstum erwartet. Die hohen Strompreise und die regulatorischen Vorgaben zu Power Usage Effectiveness (PUE) und Abwärmenutzung stellen dabei eine Herausforderung dar (47).

Der Bau eines Elektrolyseurs und einer auch sonst stabilen und belastbaren Energieinfrastruktur bietet sehr gute Synergiepotenziale mit Rechenzentren, welche wiederum für positive regionale Wirkungen und Spill-over Effekte (dazu z.B. Oxford Economics, 2022).

In der Bitkom-Studie heißt es dazu: „Um Effizienz und Kosten zu optimieren, werden derzeit Notstromkonzepte neu bewertet, wobei der Fokus auf der Reduzierung der Anforderungsdauer (weniger Betriebsstunden) und einer vermehrten Standortredundanz liegt. Auch Alternativen zu den bisher häufig eingesetzten Notstromdieseln wie Brennstoffzellen gewinnen zunehmend an Bedeutung und werden in ersten Projekten eingesetzt.[...] Alternative Energiequellen zum Stromnetz wie eigene Gaskraftwerke, Brennstoffzellen oder Photovoltaikanlagen auf dem Gelände der Rechenzentren gewinnen ebenfalls an Relevanz.“ (47)

In einer Expertenbefragung durch Bordersteps gaben 44 % der Befragten an, dass Wasserstoff als Energieträger in der Energieversorgung von Rechenzentren eine vielversprechende Option wäre, um die Energieeffizienz und Flexibilität zu erhöhen (47).

Bei der Datenverarbeitung in Rechenzentren entstehen zudem Abwärme, die zum Beheizen von Gebäuden genutzt werden könnte. Ein weiteres Synergiepotenzial mit einem Wasserstoffelektrolyseur ergibt sich somit in der Reduzierung der lokalen CO₂-Emissionen in der Wärmeversorgung, da auch Wasserstoffelektrolyseure Abwärme produzieren, welche so genutzt werden könnte. Somit stünde mehr und (zeitlich und geographisch) diversifizierte Wärmeenergie zur Verfügung, wodurch die Wärmeversorgung stabiler, günstiger und weitreichender gebaut und betrieben werden kann (47). Hier bietet eine frühzeitige Einbindung in die kommunale Wärmeplanung eine Chance für ein energieeffizientes und wirtschaftliches energetisches Gesamtkonzept. Zum Grundschemata der Energieversorgung für ein Rechenzentrum: Ausreichende Erneuerbare Energien-Anlagen (Freiflächen-Photovoltaik und Wind) befinden sich in unmittelbarer Umgebung zum Gelände des Rechenzentrums und sind mit diesem durch eine Direktleitung verbunden. Die Stromversorgung des Rechenzentrums erfolgt primär über den Strom dieser Erneuerbaren Energien Anlagen. Bei Überschuss werden zunächst die Batterien auf dem Gelände des Rechenzentrums geladen, im Anschluss grüner Wasserstoff durch Elektrolyseure erzeugt und zwischengespeichert, ggf. ins Wasserstoffnetz eingespeist. Bei Unterdeckung an Strom erfolgt zunächst eine Versorgung des Rechenzentrums durch die Batterien. Sind diese leer, wird über die direkt auf dem Gelände befindlichen Brennstoffzellen der gespeicherte und bei Bedarf über das Wasserstoffnetz zugekaufter

³¹ zwischen 2022 und 2024 stieg die Anschlussleistung von Rechenzentren in Deutschland von 400 MW auf 2.730 MW (47)

³² IEA prognostiziert bis 2030 wird eine Verdopplung des Stromverbrauchs von Rechenzentren weltweit (74), in Deutschland wird bis 2030 eine Anschlussleistung von 4.850 MW prognostiziert (177% des Verbrauchs 2024) (47)

Wasserstoff in Strom zurückgewandelt. Durch Nutzung von Kältespeichern und damit Flexibilisierung des Verbrauchsprofils sowie Nutzung von Abwärme aus den Brennstoffzellen kann das System energetisch optimiert werden. Brennstoffzellen und Batterien bilden eine doppelte Redundanz und sichern höchste Verfügbarkeit! Ein eventuell reduzierter Netzzugang kann bei Bedarf zur wirtschaftlichen Optimierung des Gesamtsystems genutzt werden.

Positive Effekte	Negative Effekte
Gesteigerte Regionale Wertschöpfungskette (regionale H2 Erzeugung/Abnahme)	Gleichzeitigkeit der Nachfrage an EE sorgt für steigende Konkurrenz und steigende Energiepreise
Abwärme z.B. aus Rechenzentren kann für die Dekarbonisierung der städtischen Wärmeversorgung genutzt werden	Zunehmende Konkurrenz um Netzanschlüsse (Priorisierung wird notwendig)
Unvermeidbare Koppelprodukte wie Abwärme aus der Elektrolyse sorgen für weitere Investitionsmöglichkeiten z.B. Green Farming	
Gesteigerte Wirtschaftskraft und erhöhte Steuereinnahmen	
Ansiedlung neuer Unternehmen mit hohen Anforderungen an Latenzzeiten (z.B. KI-basierte Anwendungen)	
durch die Zunehmende Digitalisierung und die Ausweitungen auf den Dienstleistungssektor entfallen klassische Industriearbeitsplätze -> damit geänderte Anforderungen an Bildungsabschlüsse Chance: innovative und zukunftsorientierte Jobs entstehen in der Region	

Abbildung 6-2: Synergien/ Effekte Ansiedlung von Rechenzentren und Elektrolyseanlagen

Vorteile der Ansiedlung von Rechenzentren am Standort Rüsselsheim am Main

- Nähe zum Internetknotenpunkt Frankfurt
- Verbesserung der infrastrukturellen Voraussetzungen für die Ansiedlung stark datengetriebener Unternehmen (Industrie 4.0; KI basierte Anwendungen)
- Integration in die städtische Wärmeplanung (ein einzelnes 20 MW Rechenzentrum könnte bei 80 % Auslastung knapp 10 % des Wärmeenergiebedarfes von Rüsselsheim am Main decken)
- Wertschöpfungstiefe kann durch die Nutzung der Abwärme z.B. durch Urban Farming gesteigert werden
- Schaffung neuer Arbeitsplätze mit hohen Innovationsgrad und guten Entwicklungsperspektiven (Rechenzentren sowie nachgelagerte Industrien wie Unternehmen im Bereich Industrie 4.0 und KI) sorgen für die Steigerung der Attraktivität des Standorts
- Erhöhte regionale Wertschöpfung im Bau und dem Betrieb der Rechenzentren

Herausforderungen bei der Ansiedlung von Rechenzentren am Standort Rüsselsheim am Main

- Rechenzentren benötigen hohe Netzanschlusskapazitäten, dadurch stehen sie in direkter Konkurrenz mit anderen Vorhaben
- Problematik besteht hier in der Bewertung welches Projekt im Zweifelsfall eine höhere Priorität erhält z.B.: entweder Rechenzentren oder Industrieunternehmen im produzierenden Gewerbe oder ein E-Ladepark

- Hohe zusätzliche Energiebedarfe bei der Einspeisung der Abwärme in Fernwärmenetze
- Problematik besteht hier in dem Temperaturniveau der Abwärme (aktuell ca. 30°C) diese müsste entsprechend auf 60°C bzw. 90°C angeboten werden, damit eine Einspeisung in ein Wärmenetz möglich ist

Lösungsansätze für kombinierten Betrieb von Elektrolyseur und Rechenzentrum

- Erstellung eines integrierten Energiekonzeptes für die Region und Industrieparks
- Industrieparks: Kombination der verschiedenen Anschlussbegehren und Aufbau eines dynamischen Lastmanagementsystems
- Regional: Erstellung eines Energieversorgungskonzeptes und Stadtentwicklungsplanes in Zusammenarbeit zwischen der Stadtplanung, der Wirtschaftsförderung und einem geeigneten Energieversorger mit Berücksichtigung der stofflichen Nutzung → z.B. Wasserstoff für Rechenzentren, Industrie etc., Abwärmenutzung durch Einspeisung in Wärmenetze
- Dabei sind explizit Wechselwirkungen zu betrachten z.B. bei der Ausschreibung neuer Gewerbegrundstücke sollten diese eine Nähe zu Wärmenetzen besitzen sowie über eine sehr gute Datenanbindung verfügen (ggf. weitere Punkte berücksichtigen für möglichste hohe Synergieeffekte der Region)
- Zudem sollten die Grundstücke möglichst flexibel nutzbar sein. Fördermittel sollten insbesondere für Industrieprojekte bereitgestellt werden, die lokale Wertschöpfungsketten vertiefen, Elektrolyse-Wasserstoff an benachbarte Betriebe liefern und überschüssige Wärme in Wärmenetze einspeisen.
- Ziel: alle Koppelprodukte vermarkten, um Wirtschaftlichkeit zu steigern und dabei besonders lokale Vermarktung und Nutzung bevorzugen, um möglichst nachhaltig zu agieren

6.1.3. Flexible Kraftwerkskapazitäten und Wasserstoffintegration

Die Nutzung von Wasserstoff zur Flexibilisierung der Stromversorgung in H₂-ready-Gaskraftwerken wird zunehmend diskutiert. Die im Jahr 2023 und 2024 entwickelte Kraftwerkstrategie (KWS) der Bundesregierung sowie der zugehörige Entwurf für ein Kraftwerkssicherheitsgesetz (KWSG-E) sollten den dringend erforderlichen Ausbau steuerbarer Kraftwerkskapazitäten in Deutschland unterstützen. Ziel war es, insbesondere wasserstofffähige Gaskraftwerke als Brückentechnologie für den Kohleausstieg und zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit im Zuge des Ausbaus erneuerbarer Energien zu fördern.

Trotz weit fortgeschrittener fachlicher und europarechtlicher Vorarbeit konnte das Gesetzgebungsverfahren zum KWS und KWSG-E in der letzten Legislaturperiode nicht abgeschlossen werden; die erforderlichen Mehrheiten kamen nach dem Bruch der Koalition im November 2024 nicht zustande.

Das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) erklärte im Dezember 2024 das Gesetzesvorhaben für die 20. Legislaturperiode für nicht mehr umsetzbar. Damit verschoben sich die ursprünglich für 2025 geplanten Ausschreibungen für neue wasserstofffähige Kraftwerkskapazitäten auf unbestimmte Zeit. Die Folge ist eine zunehmende Unsicherheit über den Zeitplan und die Ausgestaltung des Zubaus steuerbarer Kraftwerke – mit unmittelbaren Auswirkungen auf den Kohleausstiegspfad und die Versorgungssicherheit im künftigen Stromsystem.

Die Kraftwerksstrategie wird im künftigen Kraftwerkssicherheitsgesetz überarbeitet: Bis 2030 sollen bis zu 20 GW Gaskraftwerksleistung errichtet werden. Ein Anteil an H₂-ready-Kraftwerken ist im Koalitionsvertrag nicht mehr vorausgesetzt. Neue Gaskraftwerke sollen in erster Linie an bestehenden Kraftwerksstandorten entstehen. Außerdem sollen die Potenziale inländischer Gasförderung genutzt werden. Die Synchronisation von Windkraft- und Netzausbau soll zudem verbessert werden, zum Beispiel durch die Ausweisung von befristeten Engpassgebieten. Dem Grunde nach ist dies jedoch bereits im Netzausbauplan § 14d Abs. 4 Nr. 1 EnWG vorgesehen.

In Rüsselsheim am Main ist mit dem KEO³³-Kraftwerk ein potenzielle Bestandsinfrastruktur vorhanden, die perspektivisch auf den Einsatz von grünem Wasserstoff umgestellt werden könnte.

6.1.4. Sauerstoffverwertung

Die bei der Wasserstoffelektrolyse entstehende Sauerstoffmenge stellt eine ökonomisch und technisch potenziell wertvolle Ressource dar. Diese bleibt bislang in vielen Projekten ungenutzt, jedoch wächst mit steigenden Elektrolysekapazitäten das Interesse an einer Verwertung, weswegen die technischen Einsatzmöglichkeiten, konkreten Anwendungen in Branchen und eine kritische Betrachtung der Sauerstoffverwertung im folgenden Abschnitt erläutert werden.

Technisch kann Sauerstoff u.a. als oxidierendes Medium in Verbrennungsprozessen verschiedener Branchen oder in der Abwasserreinigung eingesetzt werden.

Bei der Sauerstoffanreicherung von Verbrennungsluft, wird der Luftsauerstoffanteil im Verbrennungsprozess erhöht, um die Flammentemperatur zu steigern, den Ausbrand zu verbessern und Emissionen zu reduzieren (48).

In der Oxy-Combustion wird ausschließlich mit Reinsauerstoff verbrannt, was eine nahezu stickoxidfreie Verbrennung ermöglicht und das Abgasvolumen reduziert (48).

In der Abwasserbehandlung kann Sauerstoff der biologischen Reinigung durch Mikroorganismen dienen (49). Der Einsatz von Reinsauerstoff in der biologischen Stufe reduziert den Energieaufwand für Luftkompressoren deutlich und erhöht die Reinigungseffizienz. Alternativ kann Sauerstoff in der vierten Reinigungsstufe zu Ozon (O₃) aufbereitet und zur Entfernung von Mikroschadstoffen eingesetzt werden (50).

Konkrete Anwendungen finden sich unter anderem in der Glas- und Zementindustrie. In Glas-schmelzöfen erlaubt die Sauerstoffverbrennung eine effizientere Prozessführung. Brennstoffeinsparungen zwischen 5 und 45 % sind, in Abhängigkeit des verwendeten Glasschmelzofens, möglich. Darüber hinaus lassen sich durch den Einsatz von Sauerstoff eine Reduktion von Schadstoffemissionen, eine erhöhte Ofenlebensdauer, geringere CAPEX durch Reduktion oder Wegfall von Abgasbehandlungsanlagen und eine bessere Glasqualität realisieren (48). Auch in der Zementindustrie ist die Anwendung von sauerstoffangereicherter Verbrennung technisch erprobt und kann Effizienz und Produktionsraten steigern. Die Verwendung von Sauerstoff als alleinigem Oxidationsmittel (Oxyfuel-Combustion) weist jedoch noch eine geringe technische Reife auf (48).

Ähnliche Anwendungsmöglichkeiten finden sich in der thermischen Abfallverwertung: Hier kann Sauerstoff eingesetzt werden, um den Durchsatz von Fraktionen mit geringem Heizwert zu erhöhen und über die einhergehende Stickstoffabwesenheit die Effizienz zu steigern. Durch die gesteigerten Verbrennungstemperaturen durch den zugeführten Sauerstoff bei gleicher Fraktionszusammensetzung, findet außerdem der Abbrand sauberer statt und die Schadstoffemission kann signifikant reduziert werden. In der Folge bedeutet das für den Betrieb eine

³³ Konsortium Energieversorgung Opel

höhere Flexibilität bei der Abfallzusammensetzung (Trennung, Sortierung, Trocknung etc. erleichtert) und verringerte Wartungs- und Kapitalkosten durch die rückstandslosere Verbrennung (48; 51).

In der Strom- sowie Wärmeerzeugung können Oxyfuel-Verfahren in Kombination mit PtG-Prozessen den Wirkungsgrad verbessern und CO₂-Abtrennung ermöglichen. Beim Einsatz in GuD-Anlagen und anderen (Erd-)Gaskraftwerken, kann durch den gezielten Einsatz von Sauerstoff simultan zu den vorher beschriebenen Technologien die Verbrennungseffizienz und damit der Primärenergiewirkungsgrad erhöht werden. Gleichzeitig erhöht sich der CO₂-Anteil im Rauchgas, während Schadstoffe und Verbrennungsrückstände reduziert werden. Dies vereinfacht die CO₂-Abspaltung und spätere Speicherung (52).

Die Effizienz- und Umweltvorteile sind nachgewiesen, setzen für eine wirtschaftliche Umsetzung jedoch eine enge Abstimmung mit Abnehmern und gewisse physisch-geographische Grundlagen voraus: Eine wirtschaftliche Nutzung ist insbesondere bei kurzen Transportwegen und kontinuierlicher Nachfrage denkbar. Die zentrale Herausforderung liegt in der Logistik (Verflüssigung, Speicherung, Transport) sowie in der derzeit noch geringen Marktdurchdringung entsprechender technischer Anwendungen (53). Auch der wirtschaftliche Vergleich zu anderen Sauerstoffquellen wie der kryogenen Luftzerlegung sollte Einfluss auf eine Verwertungsstrategie von Elektrolysesauerstoff haben. Aus technischer Sicht ist die Anwendungsreife vereinzelt gegeben, während eine breitere industrielle Integration bislang die Ausnahme ist.

Auch für den Standort Rüsselsheim am Main ist eine Sauerstoffverwertung demnach grundsätzlich technisch möglich. Für die oben angeschnittenen Industriebranchen gibt es in der Projektregion konkrete Anknüpfungspunkte aus der Industrie. Eine systematische Bedarfsanalyse und Gespräche mit potenziellen regionalen Industriepartnern über Nachfragepotenziale und konkrete Planungsschritte sollten die Voraussetzung für eine Entscheidungsgrundlage bieten sowie die wirtschaftliche Machbarkeit im konkreten Fall feststellen.

6.2. Kooperationen mit der Industrie und Forschungseinrichtungen

Die Zusammenarbeit mit regionalen Industrieunternehmen und Forschungseinrichtungen bildet ein wichtiges Element für ein nachhaltiges Wasserstoffprojekt. Mit der Hochschule RheinMain steht eine akademische Partnerin zur Verfügung, die ihre Aktivitäten in Instituten und einem Anwendungszentrum bündelt und praxisnahe Forschungsbeiträge zu nachhaltiger Mobilität, Energieversorgung und Sektorenkopplung liefert. Das Anwendungszentrum AZARE fokussiert sich dabei auf die Dekarbonisierung von Mobilität, Gebäuden und Industrie und schafft durch sein Netzwerk eine Plattform für Kooperationen zwischen Wissenschaft, Industrie, Mittelstand und Politik.

Im industriellen Umfeld stärkt der Automotive-Cluster RheinMainNeckar mit rund 500 Mitgliedern die Vernetzung entlang der automobilen Wertschöpfungskette und bietet Unternehmen der Region vielfältige Austausch- und Kooperationsmöglichkeiten. Internationale Player wie Hyundai tragen mit Entwicklungsaktivitäten für Brennstoffzellenfahrzeuge und dem Aufbau eines lokalen H₂-Ökosystems wesentlich zur regionalen Innovationsdynamik bei. Hyundai entwickelt in Rüsselsheim am Main schwerpunktmäßig Brennstoffzellenantriebe für PKW und Nutzfahrzeuge, während Stellantis in Rüsselsheim am Main maßgeblich die Entwicklung und Markteinführung neuer Modelle vorantreibt.

SEGULA Technologies als Engineering-Dienstleister bietet umfassende Entwicklungs- und Prüfkompetenz im Bereich Brennstoffzellensysteme und Elektrolyseure. Mit modernen Testeinrichtungen am Standort Rüsselsheim am Main und Rodgau-Dudenhofen werden

vielfältige Projekte von der Konzeptentwicklung bis zur Serienfreigabe betreut. Die breit aufgestellten Kooperationen und Synergien zwischen Hochschule, global agierenden OEMs, dem Cluster und spezialisierten Entwicklungsdienstleistern leisten somit einen entscheidenden Beitrag zur Verankerung der Wasserstofftechnologie in der Region Rüsselsheim am Main und darüber hinaus.

Stakeholderanalyse

Hochschule RheinMain



- Fokus der Forschungsaktivitäten auf vier Themenschwerpunkte:
 - Nachhaltige Mobilität und Energie
 - Schlüsseltechnologien
 - Umwelt- und Medizintechnik
 - Medientechnologien
- Zur thematischen Bündelung der einzelnen Schwerpunktfelder wurden [...] Institute gegründet. Sie dienen als Schnittstelle für fachübergreifende Kooperationen, sowohl hochschulintern als auch -extern mit zahlreichen Partnern aus Industrie und Wissenschaft.
- Anwendungszentrum für alle regenerativen Energieformen zur Dekarbonisierung von Verkehr, Gebäuden und Industrie (AZARE)
- Institut für Mikrotechnologien (IMtech)
- Institut für Nachhaltige Mobilität und Energie (INME)
- Institut für Umwelt- und Verfahrenstechnik (IUVT)
- Centrum für berufsintegriertes Studieren (CeBIS)



Hochschule RheinMain

<https://www.hs-rhm.de/fachbereiche/ingenieurwissenschaften/forschungsthemenkomplexe/21406>

11

Abbildung 6-3: Zusammenfassung Stakeholder Hochschule RheinMain

Stakeholderanalyse

Hochschule RheinMain – AZARE



- Das Ziel von AZARE ist, Akteure, die sich im Hochlauf einer emissionsfreien Industriegesellschaft mit dem Fokus auf die Dekarbonisierung von Mobilität, Gebäuden und Produktion befassen, in der Bewältigung von technischen, sozioökonomischen und ökonomischen Herausforderungen zu unterstützen.
- Der ganzheitliche Ansatz, den das Forschungszentrum verfolgt, beruht auf einer energieeffizienten Nutzung von Strom, Wärme und Kraftstoff (Wasserstoff, SAFs, RNBOs), erzeugt aus erneuerbaren Energien, deren Nutzen und Speicherung unter Vermeidung von schädlichen Emissionen und Treibhausgasen. Ziel ist es, das heutige Energiesystem hin zur maximalen Nutzung erneuerbarer Energien zu wandeln und über Sektorenkopplung systemisch zusammenzuführen. Das Anwendungszentrum AZARE ist eine Plattform für Forschende, KMUs, die Industrie sowie Startups mit dem Schwerpunkt im Bereich Ingenieurwissenschaften. Durch Kooperationen mit der örtlichen Wirtschaft, der Politik (Land Hessen), der Stadt Rüsselsheim und anderen wird ein aktives Netzwerk für die Lösung anstehender Energiefragen aufgebaut.
- Schwerpunkte mit H2-Bezug:
 - Power-to-X
 - Infrastruktur für eine sichere und nachhaltige Energieversorgung
 - E-Mobilität
 - Schwer zu dekarbonisierende Industriebereiche
 - Qualifizierung und Sicherheit



azare

Hochschule RheinMain

<https://www.hz-hr.de/fachbereiche/ingenieurwissenschaften/forschung/profil/-schwerpunkte-21406>

15

Abbildung 6-4: Zusammenfassung Stakeholder AZARE

Stakeholderanalyse

Automotive Cluster Rhein Main Neckar

- Die Region Rhein-Main-Neckar ist in Deutschland ein wichtiger Standort für die Automobilindustrie in der 100.000 Beschäftigte direkt oder mittelbar arbeiten. Viele europäische (Opel, Seat, Skoda) und asiatische (Honda, Hyundai, Kia, Mitsubishi, Suzuki) Hersteller steuern ihre deutschen Aktivitäten aus der Region. Auch viele namhafte Zulieferer sind hier vertreten, zum Beispiel Continental, Umicore oder Freudenberg.
- Der Automotive-Cluster RheinMainNeckar, 2003 von der Industrie- und Handelskammer Darmstadt, dem Kreis Groß-Gerau und Bertrand GmbH gegründet, ist als Unternehmenscluster entlang der automobilen Wertschöpfungskette aufgestellt und hat aktuell rund 500 Mitglieder.
- Der Cluster leistet Netzwerkarbeit für die Zulieferindustrie und versteht sich als Plattform für die Kontaktabbauung zwischen Firmen aus der Region aber auch länderübergreifend - dabei helfen Matchmaking-Events sowie Messepräsenzen. Regelmäßige Clusterforen fördern den Austausch zwischen den Betrieben, bei Bedarf werden geschlossene Projektkreise eingerichtet, die der intensiven themenorientierten Arbeit und Diskussion dienen. Für internationale Wirkung sorgen Delegationsreisen ins Ausland und das Briefing von „Incoming Delegations“ aus dem Ausland.

**AUTOMOTIVE
CLUSTER**
Rhein
Main
Neckar

<https://www.ikr.de/darmstadt/service/kontakt/regionen/regionen-ikr-darmstadt/industri-und-nutzenverbundcluster-automotive-cluster-rheinmainneckar-4934754>
<https://www.automotive-cluster.de/de/infotagveranstaltungen>

Abbildung 6-5: Zusammenfassung Stakeholder Automotive Cluster Rhein Main Neckar

Stakeholderanalyse

Hyundai

Die Hyundai Motor Group ist weltweit führend im Bereich der Wasserstoffmobilität. Das Unternehmen blickt auf eine lange Vergangenheit bei der Entwicklung von Brennstoffzellensystemen sowie -fahrzeugen zurück und setzt auch in Zukunft auf eine Wasserstoffgesellschaft. Hyundai ist der einzige OEM weltweit, der schwere Nutzfahrzeuge mit Brennstoffzellenantrieb in Serie entwickelt und produziert, mit Deutschland als einem der Hauptmärkte. Kernaktivitäten der Entwicklung finden dabei im HMETC in Rüsselsheim statt.



17

- PKW-Entwicklung und Serienfertigung von Hyundai iX35 und Hyundai Nexo im PKW-Bereich, schwere Nutzfahrzeuge von Linienbus über Größte Flotte an Serien -FC-LKW weltweit auf der Straße, >15 Mio km allein in Europa.
- Präsentation eines neuen H2-Linienbusses nach europäischen Regularien sowie fortwährende Weiterentwicklung der H2-LKW
- Stete Erweiterung der Testfahrzeugflotte; Kundenerprobung des neuen H2 -Busses und der neuen Generation Hyundai Nexo
- Support europäischer Projekte zum Marktstart der H2 Produktion mittels Hyundai Elektrolyse-Technik

Zukünftig Interessens an:

- H2-Tankstelle im Raum Rüsselsheim (aktuell mindestens 1 LKW pro Tag betankt) sowie Ausweitung der H2-Infrastruktur bundesweit
- Clusterbildung mit Stadtwerken und lokalen Großspediteuren - Anforderungs- und Erfahrungsaustausch zu H2 Fahrzeugen, direkter OEM -Ansprechpartner vor Ort, Realerprobung mit großer Kunden -OEM-Nähe
- Erarbeitung eines lokalen Förderszenarios für die lokale Produktion von grünem Wasserstoff
- Vernetzung mit Servicewerkstätten - Anforderungen/Ausbildung bzgl. H2
- Infotag für Gewerbe in Rüsselsheim (Thema H2 Technologie)
- Infotag für weiterführende/berufsbildende Schulen in Rüsselsheim zum Thema H2

Abbildung 6-6: Zusammenfassung Stakeholder Hyundai

Stakeholderanalyse

Stellantis

- Stellantis ist ein global agierender Automobilhersteller und Mobilitätsanbieter, welcher u.A. die Marken Peugeot, Citroen, Opel, Alfa Romeo und Maserati unter sich vereint. Mit Blick auf eine nachhaltige, zukunftsfähige Mobilität, arbeitet Stellantis auch am Opel-Stammsitz in Rüsselsheim an Entwicklungsprojekten in Batterie- und Brennstoffzellentechnologie. Mit dem Errichten des green-Campus hat sich das Unternehmen vergangenes Jahr zum Standort Rüsselsheim und der Marke Opel bekannt.



- Seit über 25 Jahren werden Erfahrungen in der Brennstoffzellenentwicklung gesammelt
- Die Entwicklung der Fahrzeuge erfolgt am Standort Rüsselsheim
- 2021 wurde der Opel Vivaro als Brennstoffzellenfahrzeug (E-Hydrogen) mit Mid-Power-Konzept, also als Hybrid aus vollem FCEV und BEV mit BZ-Range Extender, am LCV-Markt platziert, mit den ersten Märkten in Deutschland und in Frankreich → Pionierrolle
- Die Märkte, das LCV-Portfolio und die Produktionskapazität werden zukünftig erweitert und sind Bestandteil der Unternehmensroadmap. Als nächstes steht die Entwicklung und Markteinführung der zweiten Generation von Brennstoffzellen-LCV (Mid-size Van + Large Van)
- Weiterhin wird der Aufbau eines H₂-Ökosystems für die Mobilität unterstützt und die Wiederaufnahme von Kaufanreizen von FCEV auf Bundesebene propagiert und angestrebt



<https://www.hawz.de/en/courses/management/leadership/wachstumsprozesse/wachstumsprozesse-vorlesung-thermen-stellung.pdf>

Abbildung 6-7: Zusammenfassung Stakeholder Stellantis

Stakeholderanalyse

Segula

- SEGULA als globales Unternehmen agiert in den Branchen Automobil, Nutzfahrzeug, Schiene, Luftfahrt und Energie. Und das vom Entwurf über Simulation, Test und Validierung bis zum serienreifen Produkt. Durch die Übernahme großer Teile des Opel/PSA Entwicklungszentrums in Rüsselsheim und dem Betrieb des Testcenters in Rodgau-Dudenhofen stehen umfangreiche Prüfstände, Labore und Teststrecke zur Verfügung. Im Fokus stehen vollständige Entwicklungs- und Erprobungsleistungen für Fahrzeuge, Antriebsstränge und Motoren aller Art.



<https://germany-regulatechnologies.com/de/#industries>

- Der Hauptsitz von Segula Deutschland ist in Rüsselsheim.
- Projekte im Bereich Brennstoffzelle und Elektrolyseure:
 - Entwicklung schlüsselfertiger Brennstoffzellensysteme (DL)
 - Kleinserien BZ-Systeme für maritime Anwendung (DL)
 - Systemtests Brennstoffzelle sowie Steuerung & Homologation, Fahrzeugtests auf Teststrecke & Prüfstand für europäische OEM
 - Entwicklung Abgassystem Brennstoffzelle und Shaker -Prüfstand für BZ-Luftfahrt für europäische Start-ups
 - „Flying Testbench“ für europäischen Luftfahrt-OEM
 - Betriebsstrategie, Thermomanagement & Struktur-Analyse für Brennstoffzelle im schweren LKW (deutsches Start-up)
 - KI-basierte Analyse von Brennstoffzellentests (deutsches Förderprojekt)
 - Entwicklung kompletter Hoch- & Niedertemperatur-Kühlkreise inkl. Terminplanung & Lieferantensteuerung
 - Serienfreigabe-Unterstützung für Kernkomponenten (Stack, Kompressor, H₂-Speicher)
 - Außerdem: Fehlersuche, Inbetriebnahme & Kalibrierung für Brennstoffzellenlieferant; Dauertests auf Erprobungsgelände Dudenhofen; Entwicklung Einzelzellen-Prüfstand mit TV Darmstadt; Mitwirkung an Standardisierungs-Konsortium; Umwelts tests Brennstoffzellensystem (Temperatur, Feuchtigkeit, Salznebel); Service & Wartung von Testflotten („Flying Engineers“); Verantwortung FMEA für Serienanwendungen (System & Design); Entwicklung Seriensteuerung im AUTOSAR-Umfeld



Abbildung 6-8: Zusammenfassung Stakeholder SEGULA Technologies

7. Wirtschaftliche und gesellschaftliche Auswirkungen

Der Wirtschaftsstandort Rüsselsheim am Main wurde in den vergangenen Jahrzehnten stark von Opel/Stellantis und der Automotive allgemein geprägt. Durch die zentrale Lage im Großraum Frankfurt/ Rhein-Main entstehen außerdem Standortvorteile für global agierende Unternehmen. Mit der Wirtschaftslage von Opel und den damit einhergehenden, sinkenden Beschäftigungszahlen am Standort, findet in Rüsselsheim am Main ein Strukturwandel statt.

Die Wertschöpfungskette, die durch eine Wasserstoffwirtschaft entstehen kann, ermöglicht Unternehmen, Standorten und Regionen eine Chance neue Marktpotenziale zu erschließen. Die Wertschöpfungskette der Wasserstoffwirtschaft ist vielfältig. Von der Produktion, über die Speicherung und den Transport bis hin zur Anwendung von Wasserstoff, besteht die Produktwertschöpfungskette der Wasserstoffwirtschaft aus vielen einzelnen Anlagen, Prozessen und Systemen, die ihrerseits wiederum neben der Montage und den Einzelteilen, auch Dienstleistungen im Bereich Engineering oder Quality Assurance benötigen. Die benötigten Komponenten sind Produkte der Zulieferer-, Maschinen- und Anlagenbauunternehmen, welche gleichzeitig besonders vom Rückgang der Automotive betroffen sind, wodurch das Kompensationspotenzial nochmal höher eingeschätzt werden kann.

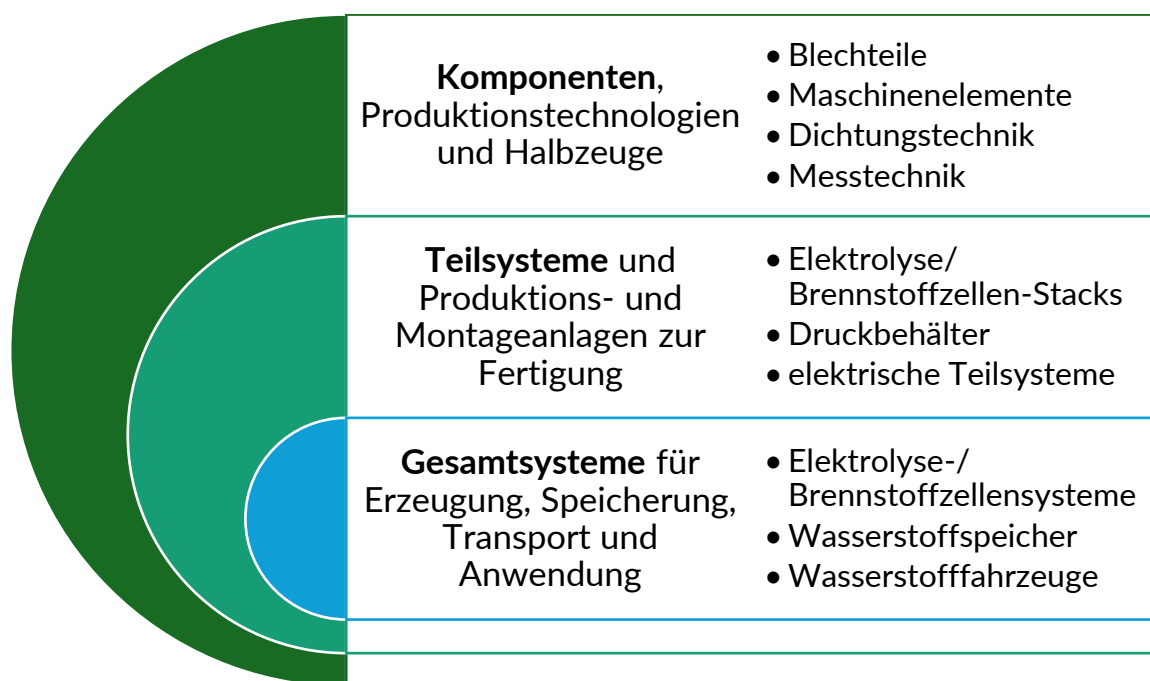


Abbildung 7-1: Produktwertschöpfung einer Wasserstoffwirtschaft

7.1. Schaffung von Arbeitsplätzen durch den Bau und Betrieb der Elektrolyseanlage

Aus einer Studie des Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking (FCH JU) geht hervor, dass die Bereitstellung von Wasserstoff eine signifikante Arbeitsplatzschaffung (in Europa) bewirken kann. Die Wertschöpfung einer Wasserstoffwirtschaft konzentriert sich auf fortgeschrittene Industrien, die im Vergleich zu fossilen Wertschöpfungsketten eine höhere direkte und indirekte Beschäftigung generieren. Vor allem in vorgelagerten und unterstützenden Industrien³⁴

³⁴ z.B. Maschinenbau und Ausrüstungsfertigung für Elektrolyseure, Brennstoffzellen, etc., aber auch traditionelle Sektoren wie Automobil-, Strom- und Gasversorgung

sowie in nachgelagerten Dienstleistungen und Anwendern³⁵ entstehen. Zur Quantifizierung dieses Potenzials werden Kennzahlen von 10 bis 15 Arbeitsplätzen pro Million Euro Umsatz in relevanten Branchen aufgerufen: etwa zehn Jobs in Maschinenbau und Energieversorgung, 13 Jobs in der Ausrüstungsfertigung und 15 Jobs im Aftermarket-Service, jeweils pro Million Euro Umsatz. Basierend auf den prognostizierten Umsätzen wird erwartet, dass die europäische Wasserstoffindustrie bis 2030 über eine Million Menschen beschäftigen könnte (54). So können bereits durch den Anlagenbau und die Fertigung von Stacks, Kühl- und Regelungstechnik zahlreiche Arbeitsplätze entstehen. Es handelt sich jedoch um eine volkswirtschaftliche Betrachtung des Umsatzes, der durch die Aktivitäten in der gesamten Wasserstoffindustrie generiert wird, und nicht nur um den direkten Verkaufserlös des in Rüsselsheim am Main produzierten Wasserstoffs allein.

Eine Analyse der Rhodium Group zeigt auf, dass während der zweijährigen Bauphase eines 100 MW-PEM-Elektrolysewerkes durchschnittlich 3,3 Arbeitsplätze pro installiertem Megawatt entstehen und im laufenden Betrieb weitere 0,45 Stellen je Megawatt am Elektrolysestandort gebunden werden (55). Diese direkte und indirekte Beschäftigungseffekte können die lokale Fachkräftebasis stärken und die Grundlage für weiterführende Qualifizierungs- und Transfermaßnahmen zur langfristigen Verankerung der Wasserstoffwirtschaft in Rüsselsheim am Main bilden, wenn politisch-ökonomische Impulse gesetzt werden. Welche und wie viele Arbeitsplätze in Rüsselsheim am Main selbst entstehen und verankert werden, lässt sich jedoch nur abschätzen: Die Wahrscheinlichkeit, dass für Betrieb und Wartung lokales Arbeitsplatzpotenzial geschöpft wird, ist dabei höher als Jobs in der Fertigung von hochspezialisierten Anlagenteilen. Generell kann gesagt werden, dass je häufiger eine Dienstleistung oder ein Produkt am Elektrolysestandort selbst benötigt wird, die Wahrscheinlichkeit für damit assoziierte Arbeitsplätze steigt.

Gewerke / Phase	Einheit	10 MW (Umsatz 6,8–10,4 M€/a)	50 MW (Umsatz 33,7–51,1 M€/a)	200 MW (Umsatz 134,8–204,4 M€/a)
Wertschöpfung aus H2-Produktion (nach FCH JU Studie)				
Maschinenbau & Energieversorgung		10 Jobs/M€ Umsatz		
Ausrüstungsfertigung		13 Jobs/M€ Umsatz		
Aftermarket-Service		15 Jobs/M€ Umsatz		
Anlagen-Investment & Betrieb (nach Rhodium Group Studie)				
Anlagen-Investment (Bauphase)	3,3 Jobs/MW	33	165	660
Operations and Maintenance (O&M)	0,45 Jobs/MW	4,5 (≈ 5)	22,5 (≈ 23)	90
Gesamtes Job-Potenzial (kumuliert)		295,5 – 432,5 (≈ 296 – 433)	1.468,5 – 2.130,5 (≈ 1.469 – 2.131)	5.872 – 8.517

Tabelle 7-1: Arbeitskräftepotenzial durch Elektrolyseur Rüsselsheim am Main [Bruttoarbeitsplätze]; eigene Berechnung nach (55) (54), Elektrolyseurkostenannahmen liegen bei 2250€/kW (inst.) (7)

Die Errichtung der notwendigen Netzanbindung, Rohrleitungsinfrastruktur und Transportlogistik führt zu zusätzlichen Beschäftigungspotenzialen in Kabel-, Rohrleitungs- und Tiefbauunternehmen ebenso wie bei Unternehmen für Druckbehälter, Kompressoren und Separatoren.

³⁵ z.B. Aftermarket-Service, Herstellung von Endanwendungen (Brennstoffzellenfahrzeuge, industrielles Equipment)

Ergänzend sind induzierte und katalytische Beschäftigungseffekte zu berücksichtigen. Erstere resultieren aus den Konsumausgaben, die Beschäftigte in den oben genannten Arbeitsplätzen im Einzelhandel, Gastgewerbe und weiteren Dienstleistungsbereichen tätigen. Die erhöhte Attraktivität des Standorts Rüsselsheim am Main, welche durch den erfolgreichen Aufbau und Betrieb einer Wasserstoffinfrastruktur kommen wird, kann neue Unternehmen anziehen und neue Investitionen und Beschäftigungszahlen stimulieren.

In Summe bewirkt der Bau und Betrieb einer Elektrolyseanlage in Rüsselsheim am Main nicht nur eine unmittelbare Stärkung von Maschinenbau und Ausrüstungsfertigung, sondern fördert auch ein nachhaltiges Dienstleistungs- und Zulieferökosystem, das die regionale Fachkräftebasis langfristig sichert und zur Ausbildung von Spezialisten für Wasserstofftechnologien beiträgt.

7.2. Auswirkungen auf die lokale Wirtschaft

Wie im vorangegangenen Kapitel aufgezeigt, erzeugt der Bau einer Elektrolyseanlage in Rüsselsheim am Main unmittelbar Aufträge für Zulieferer und Monteure aus Metallverarbeitung und Elektrotechnik sowie für Unternehmen im Bereich Netzanbindung und Rohrleitungsbau. Dienstleistungen in den Bereichen Engineering, Projektmanagement und Wartung, die Fachkräfte in Planung und Instandhaltung beschäftigen müssen, fallen außerdem an. Ferner resultieren aus den Konsumausgaben dieser Beschäftigten weitere Stellen im Einzelhandel, Gastgewerbe und im Dienstleistungssektor. Diese induzierten Effekte lassen sich im Rahmen dieser Studie nur schwer quantifizieren, tragen aber zu einer stabilen regionalen Nachfrage und Wirtschaft bei.

Der Erfolg des Projekts hängt maßgeblich von politischen Rahmenbedingungen ab. Landes- und Bundesförderungen können Investitionsrisiken mindern, erfordern jedoch klare Vorgaben und langfristige Zusagen. Niedrige Markteintrittsbarrieren, wie gemeinsame Infrastruktur- und Beschaffungsplattformen können das Gründen und Ansiedeln von H₂-Start-Ups und Spin-offs fördern.

Ein weiteres Risiko stellt die Verfügbarkeit geeigneter Fachkräfte dar. Ohne begleitende Qualifizierungsangebote können Kapazitätsengpässe auftreten, die Bauzeiten verlängern oder den späteren Betrieb einschränken. Je höher die Ebene in der Wertschöpfungshierarchie, (siehe Abbildung 7-1) umso stärker ist eine konkrete Ausrichtung auf Wasserstofftechnologien in den Bildungs- und Qualifizierungsangeboten erforderlich. In der noch jungen Wasserstoffwirtschaft fehlen dabei jedoch häufig ausreichende Systemkompetenzen und Erfahrung im Anlagenbetrieb. Durch strategische Partnerschaften mit wissenschaftlichen Institutionen und privatwirtschaftlichen Stakeholdern am Standort Rüsselsheim am Main können so für Unternehmen, deren Geschäftsfelder zukünftig wegfallen, Alternativen geschaffen werden (bspw. in der Automotive). Das Schaffen einer zentralen Anlaufstelle für Informationen, Projekt-Coaching, Förderberatung, Zertifizierungen und Schulungen in einem Kompetenzzentrum kann, ebenso wie Netzwerkevents, wie Roundtables, Konferenzen und Demotage, Multiplikator- und ökonomische Verdichtungseffekte schaffen. Hierdurch eröffnet der Standort Potenzial für (Bildungs-)Kooperationen mit Hochschulen und Forschungsinstituten.

Entwickeln sich Unternehmen im Bereich der Basiskomponenten der Produktwertschöpfung wie Einzelkomponenten und Halbzeuge, hat das den Vorteil, dass diese in einem breiten Technologiebereich auch außerhalb der Wasserstoffwirtschaft eingesetzt werden können. Das bietet Potenzial, um das unternehmerische Risiko zu reduzieren und damit die Stabilität und Beständigkeit der Arbeitsplätze zu sichern.

In Rüsselsheim am Main trifft die geplante Elektrolyseanlage auf eine Wirtschaftsstruktur, die stark von der Automotive geprägt ist. Freiwerdende Flächen und Fachkräfte, die u.a. durch den

Beschäftigungsabbau bei Opel/Stellantis frei werden, bieten zwar Potenzial für den Umbau zu einem Wasserstoffstandort, erfordern jedoch eine gezielte Qualifizierung ehemaliger Beschäftigter aus dem Automotive Bereich. Gleichzeitig müssen infrastrukturelle Engpässe beim Stromnetz oder bei Verkehrswegen adressiert werden, um den Standortwechsel von Fahrzeugfertigung zu Wasserstoffproduktion reibungslos zu ermöglichen. Der Erfolg einer solchen umfangreichen Transformation erfordert eine kooperative Zusammenarbeit aller Beteiligten aus Politik, Verwaltung, Wirtschaft und Zivilgesellschaft.

7.3. Akzeptanz und Beteiligung der Bevölkerung

Ein wesentliches Erfolgskriterium für Wasserstoffprojekte wie in Rüsselsheim am Main ist die frühzeitige und kontinuierliche Einbindung der Bevölkerung. Diese ist maßgeblich von der Anlagengröße, Lagermenge sowie der Transportlogistik abhängig, sollte jedoch auch bei kleineren Anlagen umgesetzt werden. Transparenz in allen Projektphasen bildet die Grundlage für ein sachliches Verständnis und ein realistisches Erwartungsmanagement. Zu Beginn des Genehmigungsverfahrens sind öffentlich zugängliche Informationsveranstaltungen empfehlenswert, in welchen Ziele, Zeitplan, erwartete Emissionen und verkehrliche Auswirkungen einer Produktionsanlage objektiv erläutert werden. Parallel dazu empfiehlt sich eine projektbegleitende Online-Plattform, auf der relevante Informationen, Unterlagen und Antworten auf häufig gestellte Fragen abrufbar sind.

Zur aktiven Beteiligung der Bürgerinnen und Bürger empfiehlt sich ein mehrstufiges Beteiligungsformat. Zunächst sind moderierte Informationsveranstaltungen mit thematischen Schwerpunkten wie Lärmimmissionsschutz, Gefahrstoffmanagement und Verkehrslogistik durchzuführen. Teilnehmen sollten dabei neben Anwohnerververtretungen auch Träger öffentlicher Belange, wie lokale Vereine, Schulen und Handwerksbetriebe. Eine digitale Feedback-Plattform zu implementieren, auf der Anregungen und Kritikpunkte kontinuierlich eingereicht und transparent beantwortet werden, kann die Akzeptanz ebenfalls steigern. Die Auswertung dieser Beiträge ermöglicht eine Nachsteuerung technischer und organisatorischer Projektbestandteile.

Kritische Punkte wie potenzielle Lärmbelastung, zusätzliche Verkehrsströme und Sicherheitsfragen müssen durch externe Fachgutachten geklärt und nachvollziehbar zusammengefasst werden. Die Ergebnisse sind in einfacher Sprache aufzubereiten und sowohl auf der Online-Plattform als auch in Flyer-Form zu veröffentlichen. Ergänzend bieten mobile Infostände in den Stadtteilen eine niedrigschwellige Möglichkeit, spezifische Anliegen der Anwohner direkt aufzunehmen.

Langfristig sichert ein strukturierter Kommunikationsplan die kontinuierliche Information und Beteiligung während Betrieb und Instandhaltung der Anlage. Regelmäßige Quartals-Newsletter, jährliche „Bürger-Foren Wasserstoff“ und Besichtigungstermine vor Ort ermöglichen es, die Öffentlichkeit über Betriebskennzahlen, Instandhaltungsmaßnahmen und Weiterentwicklungen auf dem Laufenden zu halten. Diese Maßnahmen tragen dazu bei, das Vertrauen in die Wasserstofftechnologie zu stärken und eine nachhaltige Akzeptanz in der Bevölkerung zu verankern.

7.4. Wasserstoffkompetenzzentrum inkl. Multiplikatoreneffekte wie Innovationshub und Tech-Park

Für den Aufbau eines Clusters und um möglichst schnell weitere innovative Wasserstoffprojekte umzusetzen, wird derzeit ein innovatives Organisations- und Managementmodell diskutiert: ausgehend von einer Projektkoordination mit der Aufgabe der Netzwerkarbeit und

des Projektmanagements wird ein Hebel für die organisatorische und managementseitige Umsetzung des Projekts gebildet. Die Aufgaben umfassen u.a. internes Netzwerken (Vernetzung der Projektpartner und Umsetzungsprojekte), Gremienarbeit (Cluster-Board und Beiratssitzungen), externes Netzwerken (Einbindung neuer Stakeholder und Projekte aus der Region, Ausbau der Partnerstruktur, Austausch mit anderen Wasserstoff-Aktivitäten, Clustern und Initiativen), Öffentlichkeitsarbeit (Organisation des Informationsaustauschs, Cluster-Treffs und Kooperationsforen) und schließlich die organisatorische Weiterentwicklung des Clusters.

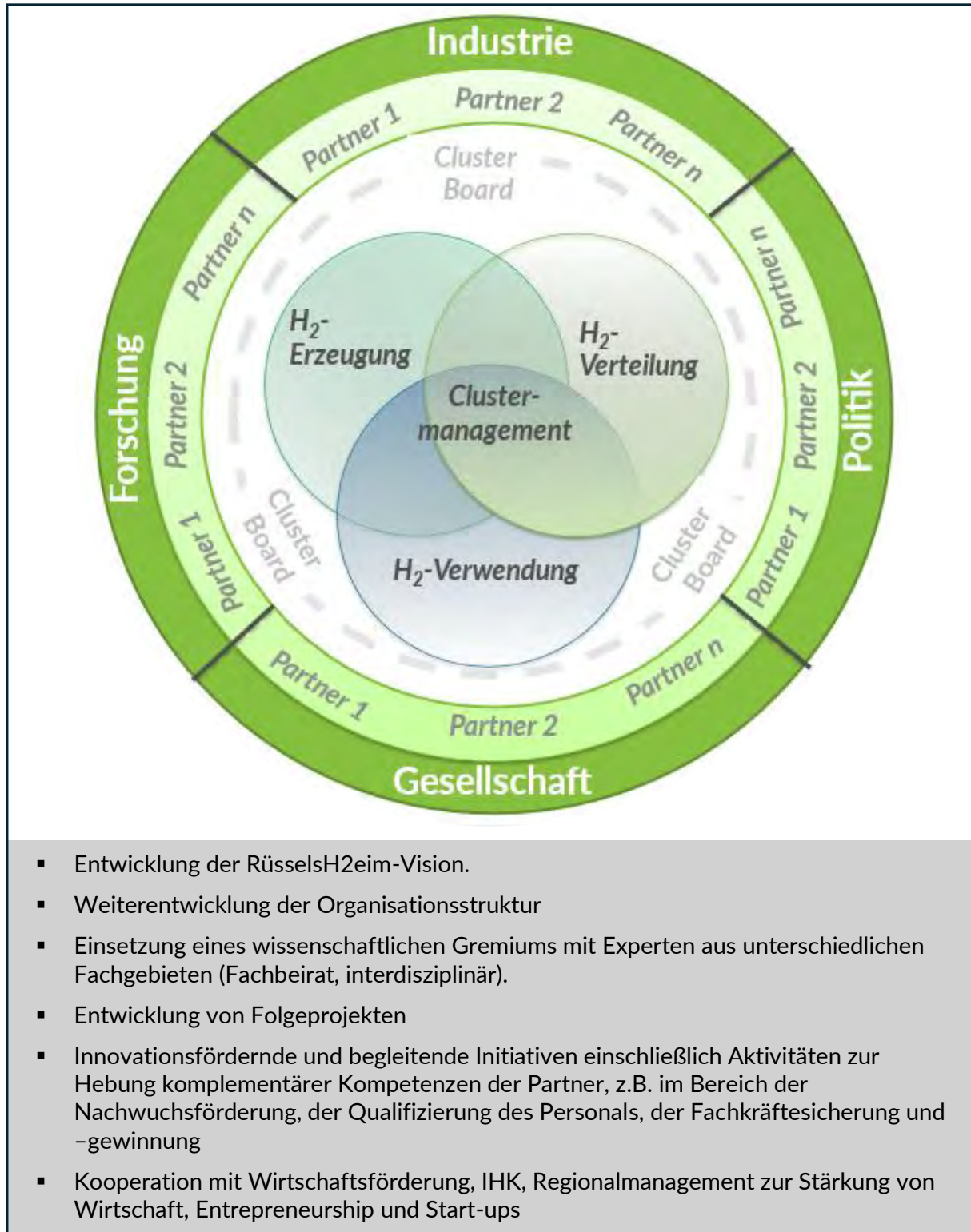


Abbildung 7-2: RüsselsH2eim Cluster Board (Eigene Darstellung nach „Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Initiative Hessen e.V. 2023“ & House of Energy e.V. 2023)

Die Zusammenarbeit kann durch die Bildung eines überregionalen Innovationsclusters als Kompetenzzentrum flankiert werden. Das Kompetenzzentrum hat zum Ziel:

- Ein Informationsnetzwerk zwischen Unternehmen, Hochschulen und Forschungseinrichtungen, öffentlich-rechtlichen Einrichtungen und anderen Partnern aufzubauen,

- den Wasserstoff-Technologietransfer zwischen Unternehmen und wirtschaftsnahen Einrichtungen auszubauen,
- externes Wissen aus den anderen Wasserstoff-Regionen in den Innovationsprozess der Unternehmen einzubinden,
- den Zugang zum Know-how anderer Unternehmen zu erleichtern und
- einen Beitrag zur gemeinsamen Nutzung von Anlagen und sonstigen technischen Ressourcen zu leisten und damit den Markthochlauf von Wasserstofftechnologien anzuregen.

Durch eine Accelerator-Plattform kann die regionale und überregionale Zusammenarbeit zwischen Unternehmen und wirtschaftsnahen Einrichtungen zielgerichtet unterstützt werden, um die Innovationsfähigkeit der Beteiligten anzuregen. Eine intensivere Zusammenarbeit zwischen den verschiedenen Akteuren soll die vorhandenen Potenziale stärken und die Wettbewerbsfähigkeit der Regionen erhöhen.

Im Accelerator werden Initiativen gestartet, welche die Zusammenarbeit des Netzwerks in Bezug auf einen markt- und produktbezogenen Austausch durch den Aufbau eines Gesamt-ökosystems für den Markthochlauf von Wasserstoff- und Brennstoffzellen Anwendungen fördern.

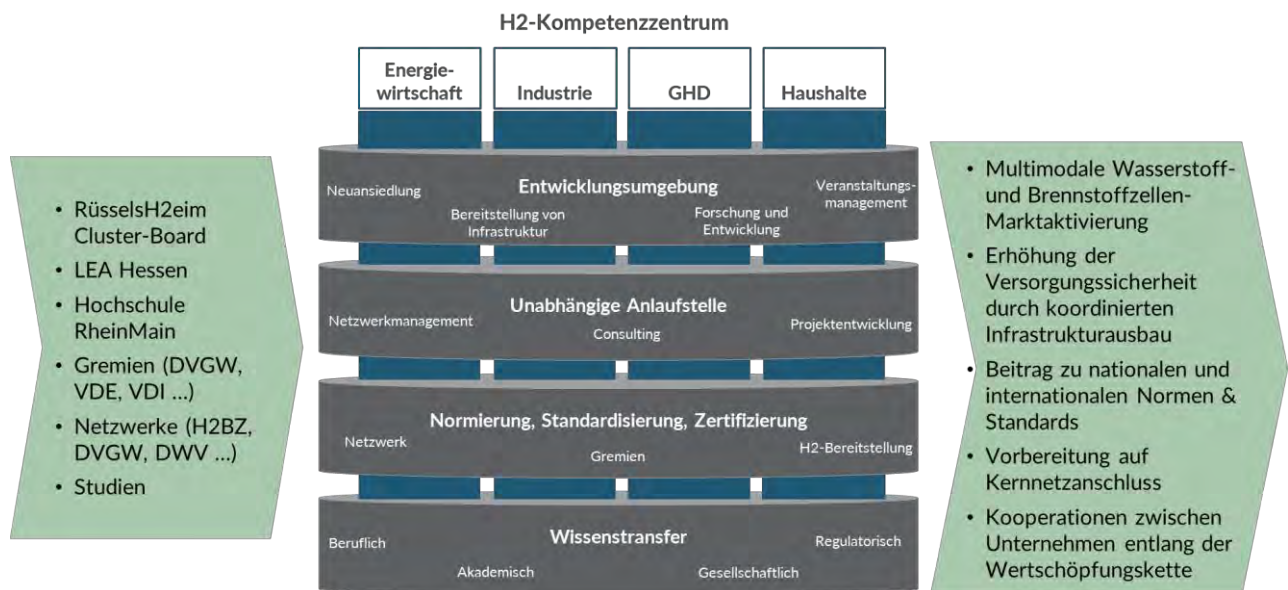


Abbildung 7-3: RüsselsH2eim-Kompetenzzentrum – Teilnehmer, Themen, Angebote, Ziele

Verstetigungsstrategie

Das Konzept sieht für einen dynamischen und nachhaltigen Cluster-Entwicklungsprozess folgende Punkte vor:

- Es sind gemeinsame Fördermittelanträge im Konsortium geplant. Die Vielzahl an Akteuren im Verbund sowie assoziierte Partner bilden hierfür den strategischen Kompetenz-Multiplikator.
- Es wird bereits aktiv während der Projektlaufzeit die Zusammenarbeit mit weiteren Hochschulen, Forschungseinrichtungen und Unternehmen gesucht. Weitere KMU und Start-ups werden aktiv in das Konsortium eingebunden.

- Das im Kompetenzcluster aufgebaute regional wirksame und überregional strahlende Wissenschaftsnetzwerk, insbesondere verknüpft mit Gesellschaft, Politik und Wirtschaft, wird sich nachhaltig positiv auf die regionale Innovationskraft auswirken. Hierzu zählt die Vermittlung von Forschungs- und Projektergebnissen und Beratung für den Gesetzgeber im Bereich Wasserstoff.
- Aufbauend auf den Erfahrungen der Verbundpartner sind Ausgründungen/Start-ups Ziel im Bereich Transfer. Hierfür ist auch die Aufnahme lokaler Start-up-Inkubatoren angestrebt. Ein Transferzentrum soll als physischer Ort regionaler Nähe die starke Vernetzung der Wirtschaft mit Wissenschaft, Gesellschaft und Politik sowohl im regionalen hessischen Raum als auch bundes- und europaweit ermöglichen und sicherstellen. Die langfristige Etablierung eines Clusters im Bereich Wasserstoff kann substanziell zur Profilbildung des Innovationsstandortes Deutschland beitragen.

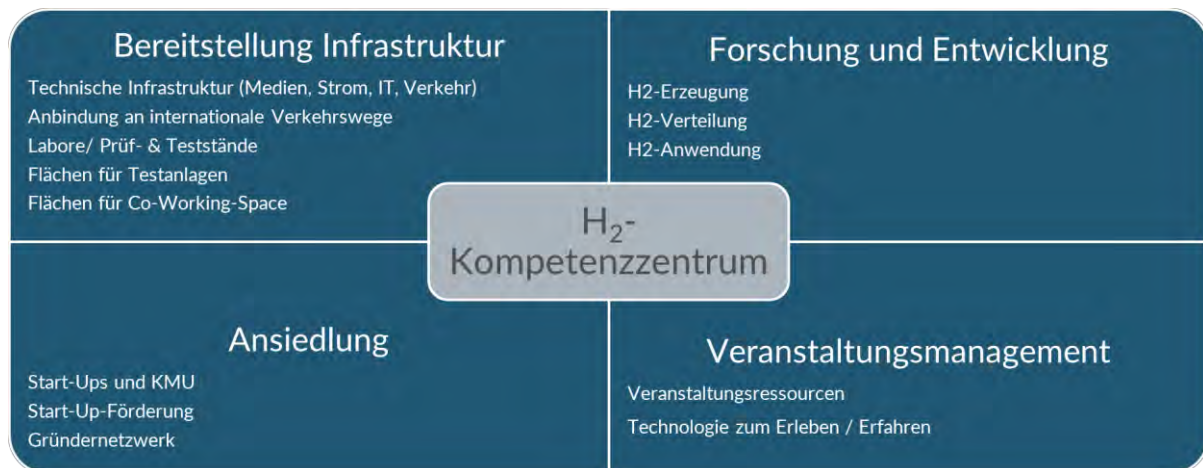


Abbildung 7-4: RüsselsH2eim Kompetenzzentrum – Entwicklungsumgebung

Das H₂-Kompetenzzentrum verfolgt das Ziel, Unternehmen und Institutionen eine umfassende, niederschwellige Entwicklungsumgebung für Wasserstofftechnologien bereitzustellen. Es ist vorgesehen ein Zentrum zu schaffen, welches sowohl organisatorische als auch logistische Hürden, die mit der Wasserstofftechnologie assoziiert sind, abbaut und allen Innovationstreibern eine schnelle Entwicklung ihrer Produkte und Dienstleistungen erlaubt. Das Zentrum soll dabei helfen, Neu- und Serienentwicklungen systematisch in Geschäftsmodelle zu integrieren und die verschiedenen Elemente eines erfolgreichen Unternehmens – Fachkräfte, Finanzmittel, Lösungen, Kunden – zu einem erfolgreichen Ganzen zusammenzufassen.

Bereitstellung von Infrastruktur: Sowohl Produktion, Dienstleistung als auch Forschung und Entwicklung (F&E) im Bereich der Wasserstofftechnologie weisen als kleinsten gemeinsamen Nenner die Notwendigkeit technischer Infrastruktur und peripher-ergänzenden Räumlichkeiten auf. Das H₂-Kompetenzzentrum soll Wasserstoff unabhängig von Qualität (Reinheit, Druck, Aggregatzustand) oder Quantität zur Verfügung stellen. H₂-Verfügbarkeit, Labor- und Testkapazitäten sowie Energieversorgung in Verbindung mit einer zu errichtenden H₂-Betankungseinrichtung bilden den erforderlichen Raum, um einen Innovationshub für Wasserstofftechnologie zu entwickeln.

Forschung und Entwicklung: Die Stadt Rüsselsheim am Main kann auf ein breites Angebot aus F&E aus den Unternehmen und Instituten zurückgreifen. Ziel ist es, das bestehende Knowhow aus vergangenen Projekten mit den Anforderungen aus der H₂-Erzeugung, Verteilung und Anwendung zu verbinden, um die H₂-Wertschöpfungskette gesamtheitlich optimieren zu können.

Ansiedlung: Durch gezielte Maßnahmen der Ansiedlung, wie bspw. dem institutionellen Ausbau von Innovations-Förderprogrammen (Bestehende nutzen), der Bereitstellung von Co-Working-Space (Raum für Innovation bieten), dem Aufbau eines technologiespezifischen Gründernetzwerkes (unternehmerischen Austausch fördern) und unternehmensgrößenabhängigen, vergünstigten Ansiedlungsprogrammen (Barrieren senken) sollen unternehmerische Risiken reduziert und Innovation aus dem Mittelstand forciert werden. Versuchs- und Demonstrationsanlagen können in Containerbauweise auf bereits vorhandenen Flächen mit Anbindung an Infrastruktur und Wasserstoff aufgestellt und bedarfsweise selbst oder fremd betrieben werden.

Veranstaltungsmanagement: Das RüsselsH2eim-Kompetenzzentrum bietet einerseits Ressourcen (Räume, Personal, Versorgung) für Veranstaltungen jeglicher Größenordnung, andererseits kann am Standort Wasserstofftechnologie zum Anfassen, Erleben und Erfahren bereitgestellt werden. Es sollen Führungen zu Großelektrolyseanlagen durchgeführt, HRS- und H₂-Versorgungskonzepte am praktischen Beispiel erläutert oder mobile Wasserstoffbrennstoffzellen-Anwendungen (PKW, Nutzfahrzeuge, H₂BZ-Personenzüge, Kleinstmobilität) unabhängig von Straßenzulassungen erfahren werden können.

8. Ergebniszusammenfassung und Handlungsempfehlungen

H2 für eine nachhaltige Energieversorgung:

Die Dekarbonisierung der Energieversorgung ist eine der größten Herausforderungen unserer Zeit. Deutschland hat sich das Ziel gesetzt, bis 2045 die Emission von Treibhausgasen (THG) auf Nettonull zu senken. Hierfür muss es seinen Energiebedarf aus THG-neutralen Quellen decken. Dabei spielt Wasserstoff, als sauberer und vielseitiger Energieträger, eine entscheidende Rolle. Zur Steigerung des Potenzials von Wasserstoff und zur Förderung einer sicheren, bezahlbaren und umweltverträglichen Energieversorgung hat die Bundesregierung 2020 die Nationale Wasserstoffstrategie (NWS) verabschiedet und 2023 mit einer Fortschreibung auf aktuelle Entwicklungen angepasst. Diese stellt den Rahmen für die zukünftige Entwicklung von Wasserstofftechnologien in Deutschland dar. Sie legt den Fokus der verschiedenen Handlungsfelder auf die Etablierung von Wasserstoff als Schlüsseltechnologie der Energiewende, die Schaffung von regulatorischen Voraussetzungen für den Markthochlauf der Wasserstofftechnologien, eine Stärkung der internationalen Konkurrenzfähigkeit und des Exports sowie die Versorgung mit grünem Wasserstoff. Dies setzt jedoch neben dem Aufbau einer nationalen Erzeugungsstruktur für Elektrolyseure, Brennstoffzellen und Wasserstoff auch die Etablierung einer deutschen Wasserstoffinfrastruktur voraus. Auf Landesebene werden durch die Hessische Wasserstoffstrategie wichtige Rahmenbedingungen für den Aufbau einer sektorübergreifenden Wasserstoffwirtschaft geschaffen, mit dem Ziel die sektorübergreifende Verfügbarkeit von Wasserstoff bereits ab 2030 zu gewährleisten.

H2-Hochlauf in Frankfurt Rhein-Main ab 2030:

Im Jahr 2045 ergibt sich im Hessen-Szenario ein gesamter Wasserstoffbedarf von rund 30,2 TWh. Der größte Anteil entfällt mit etwa 11,2 TWh (37 %) auf den Industriesektor, wobei Wasserstoffbedarfe industrieller Kraftwerke der Energiewirtschaft zugeordnet wurden. Der Verkehrssektor folgt mit rund 7,5 TWh (25 %), vor allem bedingt durch den erwarteten Einsatz im Schwerlastverkehr und der Luftfahrt auf Kurzstrecken. Der Gebäudesektor trägt mit ca. 5,6 TWh etwa 18 % zum Gesamtbedarf bei, wobei die Fernwärmeerzeugung separat unter dem Sektor Energiewirtschaft erfasst ist. Für diese wird ein Bedarf von ca. 5,9 TWh (20 %) prognostiziert. Die räumliche Auswertung auf Landkreisebene verdeutlicht regionale Konzentrationen. Die höchsten Bedarfe treten in der Kreisfreien Stadt Frankfurt mit ca. 6.970 GWh auf, gefolgt vom Main-Kinzig-Kreis mit rund 2.440 GWh und dem Landkreis Hersfeld-Rotenburg mit etwa 2.860 GWh im Jahr 2045.

Der Wasserstoffbedarf der an Rüsselsheim angrenzenden Landkreise und Städte summiert sich auf bis zu 12 TWh jährlich bis 2045. Vereinfacht auf den Brennwert umgerechnet entspricht dies einem Bedarf von über 360.000 t H₂ pro Jahr. Rüsselsheim am Main kann durch Ansiedlung von H₂-Erzeugung und Speicherung auf den betrachteten Geländen Rüsselsheim West grundsätzlich einen Teil der Nachfrage bedienen. Je nach Größenordnung der Erzeugung und Speicherung ergeben sich aber unterschiedliche Potenziale

Nachfolgend wird zunächst die Standortanalyse in Rüsselsheim am Main zusammengefasst, die Flächeneignung im konkreten Fall dargelegt und eine Handlungsempfehlung ausgesprochen.

8.1. SWOT Standortanalyse Rüsselsheim am Main

STÄRKEN

- Zentrale Lage im Rhein-Main-Gebiet
- Bestehende Energieversorgungsinfrastruktur (Gaskraftwerk, Strom und Gasnetzanschluss) auf Gelände „Rüsselsheim West“
- Nähe zu Wasserstoffkernnetz
- Vorhandene Fläche für produzierendes Gewerbe und Energieerzeugung (KEO)
- Einzugsgebiet Frankfurter Flughafen
- Naher Anschluss an BAB Netz und zu europäischen Hauptverkehrsachsen/TEN-T (A5, A3)
- Direkter Schifffahrtsanschluss an Bundeswasserstraße
- Automotive Unternehmen (Opel/Stellantis, Hyundai, SEGULA Technologies, Automotive Cluster)
- Hohe Verfügbarkeit von Ingenieuren und Beschäftigten mit technischer Ausbildung
- Zugang zu Forschungsinstituten mit Zukunftsthemen
- Ansiedelung von Logistikzentren im Projektumfeld bestehen (z.B. Cargo Movers GmbH) und vorgesehen (IKEA Deutschland GmbH & Co. KG)
- Unterschiedliche Wasserbezugsquellen
- Grundlegend ausreichend Fläche vorhanden, um Erzeugungs- und Lagerkapazität sukzessive auszubauen
- Direkte Anbindung an S-Bahn, Regionalbahn und Güterbahn
- Positive Bevölkerungsentwicklung in der Vergangenheit und positive Prognose für die Zukunft
- Zwei Stadtentwicklungsprojekte (Opel-Gelände & Eselswiese)
- Bestehendes Wärmenetz auf Opel-/Stellantisgelände

SCHWÄCHEN

- Fehlender Netzanschluss an Übertragungsnetz
- Getrennte Ver- und Entsorgungsinfrastruktur zwischen Stellantisflächen und Stadtwerken
- Unklare zukünftige Medienver- und -entsorgung
- Bestehende Bebauung z.T. unter Denkmalschutz
- Zugang zu bestehender Energieversorgungsinfrastruktur (Kraftwerk, Netzanschluss, Wärmenetz) nicht sichergestellt
- Keine unmittelbaren Abnehmer des H₂ vor Ort
- Kein flächendeckendes Wärmenetz als Wärmesenke vorhanden
- Mehrere Netzgebiete/Netzbetreiber auf einer Gemarkung (Stadtwerke Rüsselsheim, Mainzer Netze, Syna, Amprion, Stellantis)
- Geringe EE-Überschüsse im Projektumfeld (keine Direktleitung)
- Vorhandene Altlasten auf einem Teil der Flächen
- Unklare Wasserstoffabnahmesituation bei Unternehmen im Projektumfeld
- Rückläufige SVP-Beschäftigtenzahlen durch Transformation der Automotive-Branche
- Rückläufige Aktivitäten bei OEM, Engineering-DL und TIER 1-3 Zulieferern
- Fehlende Kommunale Wärmeplanung

CHANCEN

- Diversifizierung der Wirtschaftsstruktur
- Kristallisationspunkt einer Wasserstoffwirtschaft und eines Forschungs- und Start-Up-Ökosystems im Rhein-Main Gebiet
- Leuchtturm für erfolgreichen Strukturwandel
- Synergien mit ansässigen Unternehmen (Hyundai, Stellantis, SEGULA Technologies, Archigas)
- Energetisch abgestimmtes Gesamtkonzept aus Stromnetzanschluss, Wasserstofferzeugung, Speicher, Gaskraftwerk, Wärmenetzen, Rechenzentrum und Sauerstoffverwertung
- Ansiedlung von Gewerbe und Industrie mit hohem Wachstumspotenzial
- Synergien mit GreenCampus (Opel) und Square Campus (Hyundai)
- Fördernde Festsetzungen im Bebauungsplan (z.B. Sondergebiete)
- Netzdienlicher Betrieb der Anlage zur Reduktion von Strombezugskosten
- Großes Potenzial an Gewerbe und Wohnflächen
- Große Nachfrage nach dezentral produziertem Wasserstoff bei Verzögerung des Wasserstoffkernnetzes (z.B. durch Flughafen)

RISIKEN

- Zeitraum für Bereitstellung zusätzlicher elektrischer Energie
- Hemmende Festsetzungen im Bebauungsplan
- Konkurrenz um Netzanschluss mit Rechenzentren
- Zielkonflikte zahlreicher Stakeholder (Stadt Rüsselsheim am Main, Anlagenbetreiber, Flächeninhaber, Energieversorger, Netzbetreiber, Infrastrukturbetreiber etc.)
- Hemmende Eigentumsverhältnisse
- Herausforderung bei Beschaffung von erneuerbarem Strom (Direktleitung unwahrscheinlich)
- Wirtschaftlichkeit des P2G2P-Konzepts unsicher
- Kostenintensive Sanierungsmaßnahmen durch Bodenkontamination
- Technische oder wirtschaftliche Machbarkeit gefährdende Auflagen durch Genehmigungsbehörde (bspw. Immissionsschutz)
- Belegung der Flächen mit Nutzungen, die ein ungünstiges Flächen- und Beschäftigtenverhältnis aufweisen
- Ausbau der Lagerkapazität bei möglichem Hochlauf abhängig von umliegender Bebauung

8.2. Flächenpotenziale



Abbildung 8-1: Potenzialstandorte Elektrolyse Übersicht, Anmerkung: die schraffierten Flächen, haben sich im Laufe der Studie als nicht mehr verfügbar erwiesen

Insgesamt wurden acht Standorte in Abstimmung mit dem Auftraggeber ausgewählt, die anhand zuvor beschriebenen Kriterien, hinsichtlich ihrer Eignung als Standort für einen Wasserstoffelektrolyseur im industriellen Maßstab systematisch analysiert und bewertet wurden. Die Bewertungsspanne liegt zwischen 1,7 und 2,6 bei einem maximalen Scoring von 3.

Die Analyse hat ergeben, dass mit steigender Produktions- und Lagermenge genehmigungsrechtliche Hürden sowie die Bestandsinfrastruktur ein zunehmendes Projektrisiko darstellen. Die Integration einer Elektrolyseanlage einschließlich Lagerung in die bestehende Infrastruktur birgt mehrere Herausforderungen. Die begrenzten Stromkapazitäten und langen Vorlaufzeiten für Erweiterungen erschweren die Integration. Zudem stellt die Trennung der Wärmeversorgung und die wirtschaftlichen Herausforderungen bei der Nutzung von Wasserstoff in Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen ein großes Risiko dar, insbesondere da derzeit kein nennenswertes Fernwärmenetz außerhalb des Opelgeländes existiert. Die infrastrukturelle Trennung der Medien könnte ebenfalls zu Integrationsproblemen führen, da die Frischwasserversorgung durch die Stadtwerke und die Entsorgung durch die Stadt Rüsselsheim und das Tiefbauamt organisiert wird. Eine sorgfältige Planung und enge Zusammenarbeit zwischen den Stadtwerken, Opel/Stellantis und anderen Stakeholdern sind daher essenziell, um diese Herausforderungen zu bewältigen und eine nachhaltige Lösung zu finden.

Flächenbetrachtung	Option 1	Option 2	Option 3	Option 4	Option 5	Option 6	Option 7	Option 8
Grundstückbezeichnung	Mainzer Straße Süd	Mainzer Straße Nord	Weisenauer Straße	Rugby-Ring Nord	Rugby-Ring Süd	Rugby-Ring Mitte	Rugby-Ring West	Gewerbepark West
Beschreibung	Auswertung	Auswertung	Auswertung	Auswertung	Auswertung	Auswertung	Auswertung	Auswertung
Kategorie								
Grundstück	3,0	2,5	1,5	2,0	2,0	3,0	2,5	3,0
Bebauung	2,0	3,0	1,0	1,0	1,0	2,0	1,0	2,0
Boden/Umwelt	2,5	2,3	2,3	1,8	2,3	2,3	2,3	2,5
Baurecht / Genehmigung	2,7	2,3	2,0	2,3	2,3	2,3	2,3	2,7
Wirtschaftlichkeit / Abwicklung / Betrieb	3,0	3,0	3,0	1,0	2,0	2,0	2,0	3,0
Infrastruktur	2,7	2,7	2,3	2,0	2,0	2,0	1,7	2,3
Ergebnis	2,6	2,6	2,0	1,7	1,9	2,3	2,0	2,6

1 = Anforderung
nicht erfüllt

2 = Anforderung
erfüllt

3 = Anforderung
übererfüllt

1
2
3

Tabelle 8-1: Ergebnismatrix Standortbewertung

Die drei aussichtsreichsten Standorte sind:

- **Mainzer Straße Nord**
Mit 44,8 ha die größte untersuchte Fläche. Sie weist eine sehr gute Anbindung an die Mainzer Straße und die B43 auf. Teilbereiche stehen unter Denkmalschutz, was bei der Planung berücksichtigt werden muss. Die Nähe zu einem Umspannwerk und der direkte Zugang zum Main sind positive Standortfaktoren. Die Fläche ist baurechtlich als gewerbliches Gebiet ausgewiesen und grundsätzlich genehmigungsfähig.
- **Gewerbepark West**
Eine 14,1 ha große Fläche mit gewerblicher Prägung und guter Anbindung an die B43 und die A671. Die Fläche ist baurechtlich genehmigungsfähig und nicht durch Schutzgebiete oder Denkmalschutz eingeschränkt. Die Nähe zu einem Umspannwerk und die direkte Wasserversorgung über den Main sind ebenfalls vorteilhaft. Einschränkungen bestehen durch geplante Nutzungen durch den Eigentümer (IKEA) und Schutzstreifen zur Bundesstraße.
- **Mainzer Straße Süd**
Eine 19,7 ha große Fläche mit guter verkehrlicher Erreichbarkeit und Nähe zu bestehenden Umspannwerken. Die Fläche ist baurechtlich als gewerbliches Gebiet ausgewiesen, ohne Denkmalschutzaufgaben. Einschränkungen bestehen durch bereits geplante Nutzungen (grEEn-Campus, LKW-Hof), dennoch bietet die Fläche gute infrastrukturelle Voraussetzungen für eine Elektrolyseanlage.

Diese drei Standorte bieten aufgrund ihrer Größe, Lage, infrastrukturellen Anbindung und planungsrechtlichen Voraussetzungen besonders günstige Bedingungen für die Realisierung einer Elektrolyseanlage und sollten in der weiteren Projektentwicklung prioritär betrachtet werden.

Neben den Flächenpotenzialen für Elektrolyseure wurde im Rahmen der Studie auch die Errichtung einer Wasserstofftankstelle (HRS – Hydrogen Refueling Station) intensiv geprüft. Die Standortanalyse hat gezeigt, dass insbesondere die Flächen an der Mainzer Straße sowie im Gewerbepark West auch für eine Tankstelleninfrastruktur geeignet sind. Die Nähe zur geplanten Wasserstoffproduktion, die verkehrliche Anbindung sowie die Entfernung zu immissionssensiblen Nutzungen wurden dabei als zentrale Bewertungskriterien herangezogen. Die Ergebnisse der Standortbewertung für H₂-Tankstellen sind in Kapitel 3.7 dargestellt und durch eine Übersichtskarte visualisiert. Aufgrund ihrer strategischen Bedeutung für die lokale Wasserstoffanwendung – insbesondere im Verkehrssektor – sollte die Tankstelle als integraler Bestandteil eines zukünftigen Wasserstoffclusters in Rüsselsheim am Main mitgedacht werden.

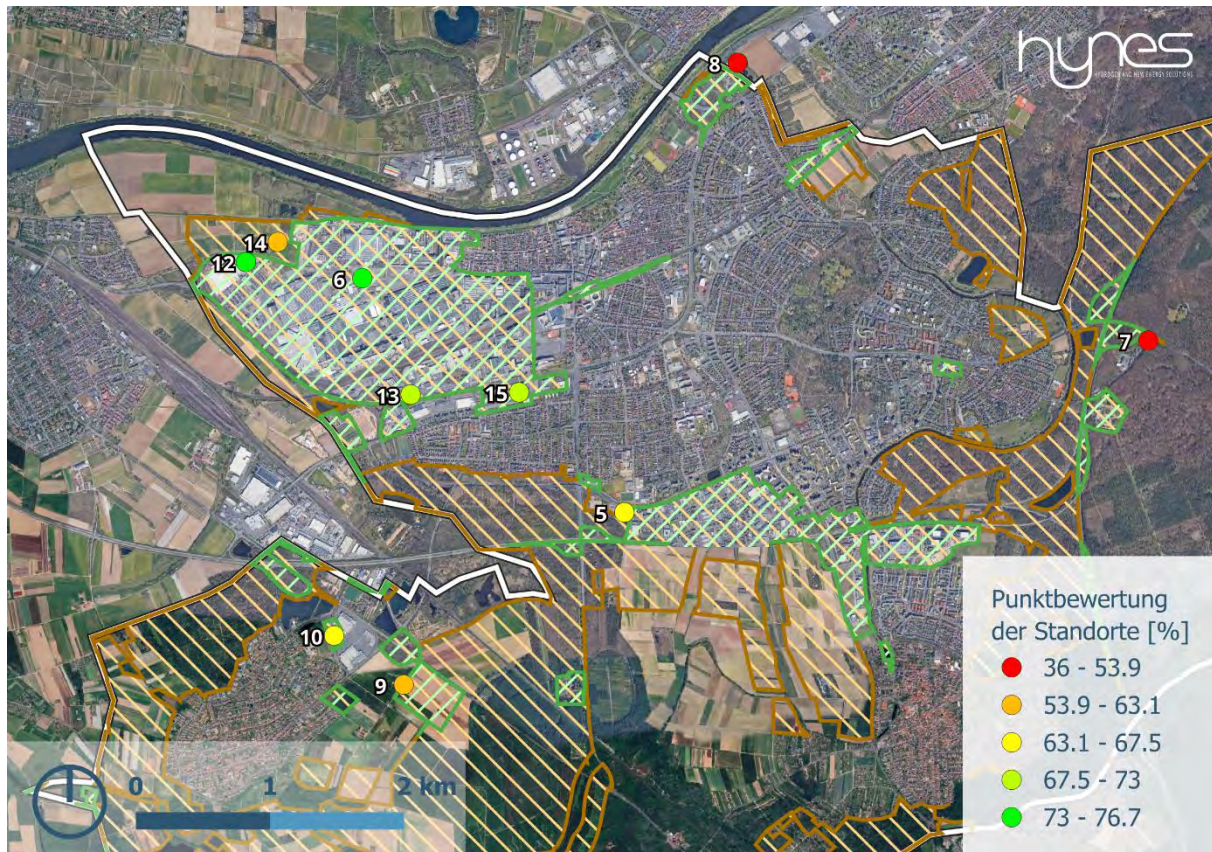


Abbildung 8-2: Lage und Bewertung der Potenzialstandorte (eigene Darstellung), Einzeldarstellungen aller Potenzialstandorte sind im Anhang zu finden - Standorte 1-4 sowie 11 sind aufgrund von im Bewertungsprozess offenkundig gewordenen Ausschlusskriterien nicht weiter Teil der Betrachtung

Infrastrukturell weist Rüsselsheim am Main trotz der lokalen Herausforderungen mehrere Standortvorteile auf. Hervorzuheben ist die Gasnetzinfrastruktur. Das Stadtgebiet Rüsselsheim am Main ist in das deutsche Ferngasnetz eingebunden, das in der Region vorrangig durch die Open Grid Europe GmbH sowie die terranets bw GmbH betrieben wird. Aufgrund seiner Lage im Zentrum des Rhein-Main-Gebiets fungiert Rüsselsheim als strategisch bedeutender Netzknoten für die regionale Gasversorgung. Die Versorgung erfolgt über ein mehrstufiges System (von Fernleitungen über regionale Verteilsysteme bis hin zu den lokalen Stadtwerken) unter Berücksichtigung unterschiedlicher Druckstufen und technischer Spezifikationen.

Besonders hervorzuheben die direkte Lage am Wasserstoffkernnetz. Westlich von Rüsselsheim verläuft ein Netzkorridor des genehmigten Wasserstoffkernnetzes. Dieser ist Teil der regionalen Ausbauteils des H2ercules-Projekts, welches durch die OGE betreut wird. Die Inbetriebnahme ist für Ende 2032 geplant und wird auf der Druckstufe 70 bar erfolgen. Diese Leitung bildet eine Wasserstoffhaupttransportachse zum Abtransport großer Einspeisemengen aus Nordwesten und deren Verbindung mit Ausspeiseschwerpunkten in den folgenden Bereichen Kraft-Wärme-Kopplung, Eisen & Stahl, Chemie, Raffinerie, Glas inkl. Glasfaser, Keramik und Ziegelprodukte.



Obwohl das geplante Wasserstoffkernnetz in unmittelbarer Nähe zu den untersuchten Flächen in Rüsselsheim am Main verlaufen soll, ist eine dezentrale Wasserstofferzeugung vor Ort strategisch sinnvoll und ergänzend. Die lokale Produktion ermöglicht eine frühzeitige Versorgung regionaler Abnehmer insbesondere für Pilot- und Testprojekte im Verkehrs- und Industriesektor und schafft Unabhängigkeit von übergeordneten Infrastrukturen, deren Realisierung und Anschlussfähigkeit zeitlich verzögert erfolgen kann. Eine Skalierung der Verwendung, könnte so nahtlos mit dem Anschluss an überregionale Versorgungsleitungen geschehen. Darüber hinaus reduziert die dezentrale Erzeugung Transportkosten, erhöht die Versorgungssicherheit und stärkt die Resilienz gegenüber Netzengpässen oder Lastspitzen. Die Kombination aus lokaler Produktion und perspektivischer Netzanbindung bietet somit eine flexible und robuste Grundlage für den Aufbau eines regionalen Wasserstoffclusters in Rüsselsheim am Main. Diese Argumentation kann auch im politischen Raum von Bedeutung sein, etwa bei der Priorisierung von Infrastrukturmaßnahmen oder der Bewertung von Förderwürdigkeit.

8.3. Handlungsempfehlungen:

Aus der SWOT-Analyse lassen sich nachfolgende strategische Handlungsempfehlungen ableiten.

Infrastruktur und Netzananschluss gezielt ausbauen: Frühzeitige Koordination mit Netzbetreibern (Amprion, Stadtwerke Rüsselsheim, Syna etc.), um Planungssicherheit bei notwendigen **Netzan schlüssen** für Strom, Gas, Wasserstoff und Wärme sicherzustellen.

Wasserstoffwirtschaft strategisch verankern: Etablierung des Standorts als Modellregion für Wasserstoffwirtschaft im Rhein-Main-Gebiet mit Fokus auf Produktion, Speicherung, Nutzung und Logistik – z. B. über eine Cluster-Strategie mit lokalen Unternehmen und Bildungseinrichtungen.

Bauleitplanung und Flächenmanagement integrieren: Frühzeitige Abstimmung mit der Stadtplanung zur Berücksichtigung in der Bauleitplanung, Ausweisung von Sondergebieten für Wasserstoffwirtschaft und Sicherung von ausreichend Flächen für Produktion und Logistik.

Standortmarketing & Partnergewinnung: Aktive Ansprache potenzieller Abnehmer und Investoren aus Industrie, Logistik und Mobilität, um die Nachfrage nach Wasserstoff zu steigern und Wertschöpfung am Standort zu halten.

Gezielte Ansiedlungspolitik entwickeln: Es wird empfohlen, Kriterien für eine gezielte Ansiedlungspolitik zu entwickeln, die auf Faktoren wie die Anzahl der Arbeitsplätze, Gewerbesteuerereinnahmen und die Qualifikation der Beschäftigten abzielt. Die Stadt sollte versuchen neue und innovative Unternehmen anzusiedeln und relevante Zukunftsthemen aufgreifen. Ein Fokus auf ausgewählte Zukunftsbranchen wird empfohlen. So kann die Ansiedlung einer H₂-Erzeugung als Ankerpunkt für weitere innovative Gründungen verstanden werden.

Entwicklung eines integrierten Energie- und Wärmekonzepts: Aufbau eines ganzheitlichen energetischen Versorgungskonzepts mit Wärmenetz-Ausbau, Einbindung erneuerbarer Energien, Power-to-Gas-to-Power (P2G2P), CO₂-neutraler Prozesswärme und Nutzung der Nebenprodukte (z. B. Sauerstoff).

Kommunale Wärmeplanung forcieren: Einbinden potenzieller H₂-Aktivitäten in kommunale Wärmeplanung, um Potenziale für Abwärmenutzung und H₂-basierte Wärmeversorgung zu identifizieren, bewerten und gezielt umzusetzen.

Nutzung von Förderprogrammen: Evaluierung von Bundes-/EU-Förderprogrammen (z. B. EFRE, Hydrogen Valleys) zur Finanzierung von Infrastruktur und Sanierungsmaßnahmen.

Stakeholder-Management: Einrichtung eines **regionalen Steuerungsgremiums** oder einer Projektgesellschaft zur Abstimmung zwischen Stadt, Landkreis, Land, Netzbetreibern, Unternehmen und Bürgern.

Verifizierung von H₂-Bedarfen: Für die Netzauslegung müssen valide Bedarfszahlen durch Abstimmung mit Ankernkunden und kommunale Wärmeplanung verifiziert werden.

Bildung & Fachkräfteentwicklung sichern: Kooperation mit Hochschule RheinMain, Berufsschulen und Unternehmen zum Aufbau eines Wasserstoff-Kompetenzzentrums.

Die Standortanalyse hat ergeben, dass die Ansiedlung großer Anlagen zur Wasserstoffherzeugung und Speicherung mit Projektrisiken seitens der Medienver- und -entsorgung sowie der Genehmigungsfähigkeit verbunden sind. Fortschreitende Planungen potenzieller Projektbeteiligter erfordern ein abgestimmtes stofflich und energetisch integriertes Gesamtkonzept aller Beteiligten, sodass Stromversorgung, Wasserversorgung, Wasserstoffabnahme, aber auch die Verwendung der Nebenprodukte Wärme und Sauerstoff sichergestellt sind. Die Analyse hat günstige Bedingungen an den Standorten Mainzer Straße Nord und Gewerbepark West identifiziert.

Es wird empfohlen mit einer moderaten Leistung der Wasserstoffherzeugung zwischen 5 MW und 20 MW zu beginnen, um einen Kristallisationspunkt für die Wasserstoffwirtschaft im Rhein-Main Gebiet aufzubauen. Ein engerer Austausch zu den Projektbeteiligten das Wasserstoffkernnetzes sowie der Netzstudie Rhein-Main wird empfohlen, um den Prozess eines möglichen Anschlusses aktiv zu gestalten. Des Weiteren haben die in der Studie

angefragten Unternehmen grundlegend positiv auf die Ansiedlung einer Wasserstofftankstelle für Nutzfahrzeuge reagiert. Im Rahmen einer weiterführenden Machbarkeitsuntersuchung sollte der funktionale Zusammenhang der Wasserstofferzeugung, -abfüllung und gegebenenfalls -betankung an einem Standort technisch, wirtschaftlich und genehmigungsrechtlich analysiert werden. Diese Aktivitäten können strategisch durch die Ansiedlung eines Wasserstoff Kompetenzzentrums flankiert werden, mit dem Ziel die Ansiedlung von Gewerbe und Industrie mit einem hohen Wachstumspotential zu fördern.

Abschließend gilt es die Zentrale Lage Rüsselsheims in Bezug auf potenzielle Abnehmer und Infrastruktur zu nutzen und zu einem Leuchtturm des erfolgreichen Strukturwandels zu etablieren.

9. Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1-1: VERORTUNGSKARTE - LAGE RÜSSELSHEIM AM MAIN (EIGENE DARSTELLUNG).....	10
ABBILDUNG 1-2: ÜBERSICHTSKARTE UNTERSUCHUNGSGBIET "RÜSSELSHEIM WEST" (EIGENE DARSTELLUNG).....	11
ABBILDUNG 2-1: ÜBERSICHT: WASSERSTOFF-FARBENLEHRE (3)	15
ABBILDUNG 2-2: WIRKSCHHEMA ELEKTROLYSE (AEL/PEMEL).....	16
ABBILDUNG 2-3: FLIEßSCHEMA DER PROZESSE ZUR WASSERSTOFFAUFBEREITUNG.....	18
ABBILDUNG 2-4: TRANSPORTTRAILER FÜR WASSERSTOFF. LINKS: GH2 TUBE TRAILER, MITTE: CGH2-MEGC-TRAILER, RECHTS: LH2-TRAILER (5).....	20
ABBILDUNG 2-5: VERLAUF DES EUROPEAN HYDROGEN BACKBONE.....	21
ABBILDUNG 2-6: DIE IN DEUTSCHLAND GENEHMIGTEN WASSERSTOFFTRANSPORTLEITUNGEN DES WASSERSTOFF-KERNNETZES	22
ABBILDUNG 2-7: TRANSPORTARTEN VON WASSERSTOFF.....	23
ABBILDUNG 2-8: ENERGETISCHE NUTZUNGSPFADE VON WASSERSTOFF IN STATIONÄREN ANWENDUNGEN	24
ABBILDUNG 2-9: H2-WERTSCHÖPFUNGSKETTE IN INTEGRIERTER ENERGIEVERSORGUNG	25
ABBILDUNG 3-1: BÖDEN, DEREN FLÄCHEN MIT UMWELTGEFÄHRDETEN STOFFEN BELASTET SIND. QUELLE: REGIOMAP, 2025.....	32
ABBILDUNG 3-2: STROMGESTEHUNGSKOSTEN FÜR ERNEUERBARE ENERGIEN UND KONVENTIONELLE KRAFTWERKE AN STANDORTEN IN DEUTSCHLAND IM JAHR 2024 (16).....	33
ABBILDUNG 3-3: KOSTENSTRUKTUR: PEM-ELEKTROLYSEUR 1 BIS 5 MW; STROMBEZUG: OFFSHORE-PPA; ZEITPUNKT ANALYSE: ENDE 2023 (17).....	34
ABBILDUNG 3-4: POTENZIALSTANDORTE ELEKTROLYSE ÜBERSICHT.....	35
ABBILDUNG 3-5: MAINZER STRAßE SÜD INKL. UMFELDNUTZUNGEN.....	36
ABBILDUNG 3-6: MAINZER STRAßE NORD INKL. UMFELDNUTZUNGEN.....	37
ABBILDUNG 3-7: GEWERBEPARK WEST INKL. UMFELDNUTZUNGEN.....	38
ABBILDUNG 3-8: VERSORGUNGSINFRASTRUKTUR IN RÜSSELSHEIM (EIGENE DARSTELLUNG AUF GRUNDLAGE VON (18))	39
ABBILDUNG 3-9: STROMINFRASTRUKTUR IN RÜSSELSHEIM (EIGENE DARSTELLUNG AUF GRUNDLAGE VON (18))	39
ABBILDUNG 3-10: FERNLEITUNGSNETZ (72).....	42
ABBILDUNG 3-11: GAS- UND WASSERSTOFFINFRASTRUKTUR RÜSSELSHEIM UND UMGEBUNG (EIGENE DARSTELLUNG).....	45
ABBILDUNG 3-: ÜBERSICHT HRS-POTENZIALFLÄCHEN- (EIGENE DARSTELLUNG).....	55
ABBILDUNG 3-13: METHODISCHES VORGEHEN BEI DER HRS STANDORTANALYSE IN RÜSSELSHEIM AM MAIN	57
ABBILDUNG 3-14: POTENZIALSTANDORTE (X-ACHSE) UND DEREN BEPUNKTUNG (Y-ACHSE) (EIGENE DARSTELLUNG).....	58
ABBILDUNG 3-15: LAGE UND BEWERTUNG DER POTENZIALSTANDORTE (EIGENE DARSTELLUNG), EINZELDARSTELLUNGEN ALLER POTENZIALSTANDORTE SIND IM ANHANG ZU FINDEN - STANDORTE 1-4 SOWIE 11 SIND AUFGRUND VON IM BEWERTUNGSPROZESS OFFENKUNDIG GEWORDENEN AUSSCHLUSSKRITERIEN NICHT WEITER TEIL DER BETRACHTUNG	58
ABBILDUNG 3-16: VERORTUNG UND BEWERTUNG HRS-POTENZIALSTANDORT 6.....	59
ABBILDUNG 3-17: VERORTUNG UND BEWERTUNG HRS-POTENZIALSTANDORT 12	60
ABBILDUNG 3-18: VERORTUNG UND BEWERTUNG HRS-POTENZIALSTANDORT 13	61
ABBILDUNG 3-19: VERORTUNG UND BEWERTUNG HRS-POTENZIALSTANDORT 14	62
ABBILDUNG 3-20: FORMEN DES SCHIENENGEBUNDENEN WASSERSTOFFTRANSPORTS (35).....	64
ABBILDUNG 3-21: VERGLEICH DER UNTERSCHIEDLICHEN WASSERSTOFFTRANSPORTFORMEN (EIGENE DARSTELLUNG NACH (35)).....	66

ABBILDUNG 4-1: WASSERSTOFFBEDARFE ALLER SEKTOREN BIS ZUM JAHR 2045, ALLE SZENARIEN (38).....	74
ABBILDUNG 4-2: WASSERSTOFFBEDARFSPROGNOSE DER CHEMIEINDUSTRIE (STOFFLICHE NUTZUNG) BIS 2045, HESSENSZENARIO (38)	75
ABBILDUNG 4-3: WASSERSTOFFBEDARFSPROGNOSE DER INDUSTRIEBRANCHEN (ENERGETISCHE NUTZUNG, OHNE INDUSTRIE-KWK) BIS 2045, HESSENSZENARIO (38)	76
ABBILDUNG 4-4: BRANCHENSPEZIFISCHER WASSERSTOFFBEDARF IN DER INDUSTRIE NACH REGIERUNGSBEZIRKEN IN DEN JAHREN 2030 (LINKS) UND 2045 (RECHTS), HESSENSZENARIO (38).....	77
ABBILDUNG 4-5: WASSERSTOFFBEDARF IN DER INDUSTRIE NACH LANDKREISEN IN DEN JAHREN 2030 (LINKS) UND 2045 (RECHTS), HESSENSZENARIO (38)	77
ABBILDUNG 4-6: SZENARIEN WÄRMEBEREITSSTELLUNG GEBÄUDE (HESSEN UND DENA SZENARIO SIND GLEICH) (38)	78
ABBILDUNG 4-7: WASSERSTOFFBEDARF NACH LANDKREISEN IN DEN JAHREN 2030 (LINKS) UND 2045 (RECHTS), HESSENSZENARIO (38)	79
ABBILDUNG 4-8: WASSERSTOFFBEDARFSPROGNOSE IM STRAßENVERKEHR NACH MOBILITÄTSART BIS 2045, HESSENSZENARIO (38)	80
ABBILDUNG 4-9: WASSERSTOFFBEDARFSPROGNOSE LUFTFAHRT, SCHIENENVERKEHR UND BINNENSCHIFFFAHRT 2045, HESSENSZENARIO (38)	81
ABBILDUNG 4-10: WASSERSTOFFBEDARFSPROGNOSE VERKEHRSSEKTOR 2045, HESSENSZENARIO (38).....	82
ABBILDUNG 4-11: WASSERSTOFFBEDARFSPROGNOSE VERKEHRSSEKTOR NACH LANDKREISEN IN DEN JAHREN 2030 (LINKS) UND 2045 (RECHTS), HESSENSZENARIO (38)	82
ABBILDUNG 4-12: WASSERSTOFFBEDARFSPROGNOSE NUR STRAßENVERKEHR NACH LANDKREISEN IN DEN JAHREN 2030 (LINKS) UND 2045 (RECHTS), HESSENSZENARIO (38)	83
ABBILDUNG 4-13: WASSERSTOFFBEDARFSPROGNOSE ENERGIEWIRTSCHAFTSSEKTOR 2045, HESSENSZENARIO (38)	84
ABBILDUNG 4-14: WASSERSTOFFBEDARFSPROGNOSE FÜR DIE ENERGIEWIRTSCHAFT NACH LANDKREISEN IN DEN JAHREN 2030 (LINKS) UND 2045 (RECHTS), HESSENSZENARIO (38)	84
ABBILDUNG 4-15: WASSERSTOFFBEDARF IN HESSEN SEKTORÜBERGREIFEND IM VERLAUF DER JAHRE (38)	85
ABBILDUNG 4-16: WASSERSTOFFBEDARFSPROGNOSE SEKTORÜBERGREIFEND NACH LANDKREISEN IN DEN JAHREN 2030 (LINKS) UND 2045 (RECHTS), HESSENSZENARIO (38)	86
ABBILDUNG 4-17: H ₂ -BEDARF DER AN GG ANGRENZENDER STÄDTE UND LANDKREISE (38)	86
ABBILDUNG 4-18: VERKEHRSINFRASTRUKTUR IN RÜSSELSHEIM UND UMGEBUNG, AUSGENOMMEN STRAßENVERKEHR (EIGENE DARSTELLUNG)	87
ABBILDUNG 4-19: VERKEHRSMENGE SCHWERLAST IN HESSEN	88
ABBILDUNG 4-20: WASSERSTOFFAKTIVITÄTEN IN RÜSSELSHEIM UND UMGEBUNG (EIGENE DARSTELLUNG).....	90
ABBILDUNG 4-21: HOCHLAUFSZENARIEN UND WASSERSTOFFBEDARFE FLUGHAFEN FRANKFURT (42).....	92
ABBILDUNG 5-1: SUSTAINABLE DEVELOPEMENT GOALS (SDGs) DER UN. GRÜNER RAHMEN = IM PROJEKT BETROFFEN	96
ABBILDUNG 6-1: HERAUSFORDERUNG DER ZEITLICHEN VERFÜGBARKEIT VON EE (EIGENE DARSTELLUNG).....	102
ABBILDUNG 6-2: SYNERGIEN/ EFFEKTE ANSIEDLUNG VON RECHENZENTREN UND ELEKTROLYSEANLAGEN.....	104
ABBILDUNG 6-3: ZUSAMMENFASSUNG STAKEHOLDER HOCHSCHULE RHEINMAIN	108
ABBILDUNG 6-4: ZUSAMMENFASSUNG STAKEHOLDER AZARE	108
ABBILDUNG 6-5: ZUSAMMENFASSUNG STAKEHOLDER AUTOMOTIVE CLUSTER RHEIN MAIN NECKAR	109
ABBILDUNG 6-6: ZUSAMMENFASSUNG STAKEHOLDER HYUNDAI	109
ABBILDUNG 6-7: ZUSAMMENFASSUNG STAKEHOLDER STELLANTIS	110
ABBILDUNG 6-8: ZUSAMMENFASSUNG STAKEHOLDER SEGULA TECHNOLOGIES	110

ABBILDUNG 7-1: PRODUKTWERTSCHÖPFUNG EINER WASSERSTOFFWIRTSCHAFT	111
ABBILDUNG 7-2: RÜSSELSH2EIM CLUSTER BOARD (EIGENE DARSTELLUNG NACH „WASSERSTOFF- UND BRENNSTOFFZELLEN-INITIATIVE HESSEN E.V. 2023“ & HOUSE OF ENERGY E.V. 2023).....	116
ABBILDUNG 7-3: RÜSSELSH2EIM-KOMPETENZZENTRUM – TEILNEHMER, THEMEN, ANGEBOTE, ZIELE.....	117
ABBILDUNG 7-4: RÜSSELSH2EIM KOMPETENZZENTRUM – ENTWICKLUNGSUMGEBUNG	118
ABBILDUNG 8-1: POTENZIALSTANDORTE ELEKTROLYSE ÜBERSICHT	123
ABBILDUNG 8-2: RÄUMLICHE VERTEILUNG DER ELEKTROLYSEPROJEKTE.....	67
ABBILDUNG 8-3: BRACHFLÄCHENKATEGORIEN AUS DER LANDESWEITEN BRACHFLÄCHENERFASSUNG NORDRHEIN-WESTFALEN (STAND: 10.6.2023, 50% DER GESAMTFLÄCHE ERFASST) (56).....	71
ABBILDUNG 8-4: KRAFTWERKSSTANDORTE IN DEUTSCHLAND (57).....	72

10. Tabellenverzeichnis

TABELLE 2-1: VERSCHIEDENEN TYPEN DER ELEKTROLYSETECHNOLOGIEN UND DEREN SPEZIFIKATIONEN (5), (4).....	16
TABELLE 2-2 ELEKTROLYSEHERSTELLER, MARKTRECHERCH AUS 2024 (6)	17
TABELLE 3-1: SZENARIEN: STROMBEDARF, H ₂ - UND O ₂ -PRODUKTION	26
TABELLE 3-2: SZENARIEN: MEDIENVER- UND -ENTSORGUNG	27
TABELLE 3-3: SZENARIEN: SPEICHERBEDARF PRO TAG.....	27
TABELLE 3-4: SZENARIEN: WASSERSTOFFVERTEILUNG.....	28
TABELLE 3-5: SZENARIEN: FLÄCHENBEDARFE	28
TABELLE 3-6: VERWENDETE QUELLEN FÜR STANDORTANALYSE	29
TABELLE 3-7: EINZELFAKTOREN DER STANDORTBEWERTUNG	30
TABELLE 3-8: ERGEBNISMATRIX STANDORTBEWERTUNG (1 = ANFORDERUNGEN NICHT ERFÜLLT (ORANGE), 2 = ANFORDERUNGEN ERFÜLLT (GELB), 3= ANFORDERUNGEN ÜBERERFÜLLT(GRÜN))	35
TABELLE 3-9: INTERVIEWS MIT DEN STAKEHOLDERN	45
TABELLE 3-10: ÜBERSICHT ÜBER DIE REGULATORISCHEN UND GENEHMIGUNGSRELEVANTEN GESETZE UND VERORDNUNGEN FÜR ERZEUGUNG, LAGERUNG UND FEUERUNG VON WASSERSTOFF (EIGENE DARSTELLUNG).....	47
TABELLE 3-11: SZENARIO 1 LUFTSCHADSTOFFEMISSIONEN	51
TABELLE 3-12: SZENARIO 2 LUFTSCHADSTOFFEMISSIONEN	51
TABELLE 3-13: SZENARIO 3 LUFTSCHADSTOFFEMISSIONEN	51
TABELLE 3-14: ERHÖHUNG DES BEURTEILUNGSPEGELS ENTLANG DER B43 IN RÜSSELSHEIM	52
TABELLE 3-15: EINZELFAKTOREN DER HRS STANDORTANALYSEMATRIX.....	57
TABELLE 3-16: GEGENÜBERSTELLUNG VON XEMU UND BEMU	63
TABELLE 4-1: KOSTENSCHÄTZUNGEN DER VERSCHIEDENEN SZENARIEN (EIGENE BERECHNUNGEN).....	95
TABELLE 7-1: ARBEITSKRÄFTEPOTENZIAL DURCH ELEKTROLYSEUR RÜSSELSHEIM [BRUTTOARBEITSPLÄTZE]; EIGENE BERECHNUNG NACH (55) (54), ELEKTROLYSEURKOSTENANNAHMEN LIEGEN BEI 2250€/KW (INST.) (7).....	112
TABELLE 8-1: ERGEBNISMATRIX STANDORTBEWERTUNG.....	124

11. Literaturverzeichnis

1. **LEA LandesEnergieAgentur Hessen GmbH.** Wasserstoffstartnetz Wiesbaden / Mainz. Wiesbaden : s.n., 2025.
2. **Stadt Rüsselsheim am Main.** Bebauungsplan Nr. 153 „Mainzer Straße Süd“ - Begründung (Vorentwurf). 2025.

3. **Pauline Horng, Michael Kalis.** Wasserstoff - Farbenlehre. *IKEM-Website*. [Online] Dezember 2020. https://www.ikem.de/wp-content/uploads/2021/01/IKEM_Kurzstudie_Wasserstoff_Farbenlehre.pdf.
4. **Doppelbauer, Martin.** Energiespeicher. *Grundlagen der Elektromobilität*. Wiesbaden : s.n., 2025.
5. **Pichlmaier, Simon, Kigle, Stephan und Hübner, Tobias.** *Elektrolyse – Die Schlüsseltechnologie für Power-to-X*. s.l. : Forschungsinstitut in der Energiewirtschaft (FfE), 2019.
6. **Heuser, Ralf.** Power-to-X-Marktübersicht: 92 Elektrolyseure von 17 Herstellern. *power to x*. [Online] 1. September 2022. <https://power-to-x.de/power-to-x-marktuebersicht-92-elektrolyseure-von-17-herstellern/>.
7. **Hydrogen Europe.** *Clean Hydrogen Production Pathways - Report 2024*. [Präsentationsfolien] Brüssel : s.n., 2024.
8. **Prof. Dr. Birgit Scheppat, David Coleman, Matthias Werner.** *Wasserstoff als Energiequelle der Zukunft - Grundlagen, Konzepte und mögliche Anwendungsbereiche*. Bad Homburg/Wiesbaden : FERI Cognitive Finance Institute, 2022.
9. **Karlsruhe Institute of Technology - Institute of Technical Physics.** Liquid hydrogen – overview of a special energy carrier. [Online] 14. 01 2025. [Zitat vom: 15. 05 2025.] https://www.itep.kit.edu/english/liquid_hydrogen_overview_of_a_special_energy_carrier.php.
10. **EMCEL GmbH.** *Wasserstoff-Infrastruktur für Straße, Schiene und Wasserwege*. s.l. : LEA LandesEnergieAgentur Hessen GmbH, 2023.
11. **BMWi.** FAQ zum Wasserstoff-Kernnetz. [Online] 2025. [Zitat vom: 08. 08 2025.] <https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/FAQ/Wassertstoff-Kernnetz/faq-wasserstoff-kernnetz.html>.
12. —. *Die Nationale Wasserstoffstrategie*. Berlin : Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), 2020.
13. **Carmo, M, et al.** A comprehensive review on PEM water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2018, 32.
14. **DVGW.** *Das Gasnetz - Rückrad der Wasserstoffwelt*. 2024.
15. **H2 MOBILITY.** *Overview Hydrogen Refuelling for Heavy-Duty Vehicles*. 2021.
16. **Christoph Kost, Paul Müller, Jael Sepúlveda Schweiger, Verena Fluri, Jessica Thomsen.** *Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien*. [Hrsg.] Fraunhofer-Institut für solare Energiesysteme ISE. Freiburg : s.n., 2024.
17. **Spinrärer, Eric.** *Analyse der Erzeugungspotenziale von Wasserstoff in Hessen in technischer und ökonomischer Sicht*. [Vortragsfolien] s.l. : Ernst & Young Real Estate GmbH, 2024.
18. **Regionalverband FrankfurtRheinMain.** *Geoportal des Regionalverbandes FrankfurtRheinMain*. Frankfurt : s.n.
19. **Netze, Mainzer.** *Netzzustands- und Netzausbaubericht der 110-kV-Netzgruppe Mainz-Wiesbaden*. 30. Januar 2024.

20. **Amprion GmbH Genehmigungen Süd/Umweltschutz Leitungen.** *Planfeststellung für die Änderung der Leitungseinführung in die Umspannanlage Bischofsheim* . 2021.
21. **Energieversorgung Rüsselsheim GmbH.** Netzstrukturdaten 2024. [Online] [Zitat vom: 13. 06 2025.] <https://www.swr-netze-ruesselsheim.de/de/Stromnetz/Veroeffentlichungspflichten/Netzstrukturdaten/>.
22. **Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen.** *Genehmigung eines Wasserstoff-Kernnetzes.*
23. **Bundesnetzagentur.** *Anlage 4 der Genehmigung eines Wasserstoff-Kernnetzes.* Genehmigung eines Wasserstoff-Kernnetzes gemäß §28q Abs. 8 S. 1 i. V. m. § 28q Abs. 1, 2, 4, 5, 6 Satz 1 sowie des Abs. 7 EnWG.
24. **Umweltbundesamt.** Daten- und Rechnungsmodell TREMOD – Transport Emission Modell, Version 6.51. 2023.
25. **Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen - FGSV.** Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen. RLS-19: R1: Richtlinien zum Ersatz der RLS-90 mit der Verabschiedung der Änderung der 16. BImSchV. [PDF]. Köln : FGSV Verlag GmbH, 2019. 2019.
26. **Cabalzar, Urs.** Fachartikel: Betankung gasförmiger Kraftstoffe. *AQUA & GAS* . 2018, 9.
27. **Alstom.** Weltpremiere: Erstes Netz mit 14 Wasserstoffzügen nimmt in Niedersachsen Betrieb mit Passagieren auf. [Online] 22. August 2022. <https://www.alstom.com/de/press-releases-news/2022/8/weltpremiere-erstes-netz-mit-14-wasserstoffzuegen-nimmt-niedersachsen>.
28. **ahh/dpa.** Bahnstrecke in Niedersachsen: Wasserstoffzügen fehlt Wasserstoff. [Online] Spiegel, 10. September 2024. <https://www.spiegel.de/auto/niedersachsen-wasserstoffzuegen-fehlt-wasserstoff-bahnausfaelle-um-bremervoerde-a-3f102e1b-6400-46de-86af-992a9ba06de5>.
29. **Boeswillwald, Pierre, et al.** *Strategie für lokal-emissionsfreie Fahrzeuge auf nicht elektrifizierten Strecken.* 2022. S. 241.
30. **Theloke, Jochen, Vondran, Johanna und Benz, Thomas.** *Wasserstoff für den Schienenverkehr.* [Hrsg.] VDI/VDE-Studie. Düsseldorf : s.n., 2022. S. 36. Bd. 14/2022. 978-3-949971-15-0.
31. **Schwarz, Magnus.** Alstom: Wasserstoff-Güterzug ab 2025 im Einsatz. [Online] 28. November 2022. <https://h2-news.de/wirtschaft-unternehmen/alstom-wasserstoff-gueterzug-ab-2025-im-einsatz/>.
32. **Pluta, Werner.** Wasserstoffzüge im Taunus fallen dauernd aus. *golem.de*. [Online] 2. Oktober 2024. <https://www.golem.de/news/alstom-coradia-ilint-wasserstoffzuege-im-taunus-fallen-dauernd-aus-2410-189454.html>.
33. **Schiefenhövel, Jan.** Chaos bei der Taunusbahn - Statt mit Wasserstoff fahren die Züge wieder mit Diesel. *Frankfurter Allgemeine Zeitung*. [Online] 18. Februar 2023. <https://www.removepaywall.com/search?url=https%3A%2F%2Fwww.faz.net%2Faktuell%2Frhein-main%2Fwasserstoffzuege-fuer-taunusbahn-werden-nachgeruestet-18687279.html>.
34. **Dorn, Julian.** Debakel mit den Wasserstoffzügen: Ungebremst gegen die Wand. *Frankfurter Neue Presse*. [Online] 11. Oktober 2024. <https://www.fnp.de/lokales/hochtaunus/die-wand-debakel-mit-den-wasserstoffzuegen-ungebremst-gegen-93326616.html>.

35. **DB Cargo.** DB Cargo entwickelt Transportlösung für Wasserstoff . [Online] 27. Juni 2023.
<https://nachhaltigkeit.deutschebahn.com/de/news/db-cargo-entwickelt-transportloesungen-fuer-wasserstoff>.
36. **Regenbrecht, Bjarne.** *H2Rail - Wasserstofflogistik der DB Cargo BTT GmbH.* [Hrsg.] DB Cargo BTT GmbH. 2023.
37. **Vito Milella, Bodo Nachbar, Andrew Kelly, Stefan Lieske, Stephan Bude, Thomas Bayer, Elmar Horn, Michael Ismar, Reinhold Sturny, Simon Pfennig, Michelle Schwenker.** *Potenzialbeschreibung Wasserstofftransport über das Schienennetz.* [Hrsg.] DB Energie GmbH. [Prod.] LandesEnergieAgentur Hessen GmbH (LEA). 2020.
38. **GmbH, LEA LandesEnergieAgentur Hessen.** *POTENZIALANALYSE WASSERSTOFF IN HESSEN.* Wiesbaden : s.n., 2023.
39. **©2004-2025 Fraport AG Frankfurt Airport Services Worldwide.** Fraport-Verkehrszahlen 2024: Frankfurt bleibt führend bei der Hub-Anbindung in die Welt. [Online] 2025.
<https://www.fraport.com/de/newsroom/pressemitteilungen/2025/verkehrszahlen/fraport-verkehrszahlen-2024--frankfurt-bleibt-fuehrend-bei-der-h.html>.
40. **Rhein-Main-Verkehrsverbund GmbH.** Fahrgast-Höchststand dank Deutschland-Ticket. [Online] 2025. <https://www.rmv.de/c/de/informationen-fuer-journalisten/presse/aktuelle-pressemitteilungen/23012025-fahrgast-hoechststand-dank-deutschland-ticket>.
41. **DB InfraGO AG.** Frankfurt (Main) Hauptbahnhof. [Online] 2020.
<https://bauprojekte.deutschebahn.com/p/frankfurt-m-hbf>.
42. **Fraport AG.** *Die Bedeutung von Wasserstoff für die Energieversorgung und den Flugverkehr.* 2024.
43. **Oliver Riedel, Katharina Hölzle, Wilhelm Bauer, Bernd Bienzeisler, Jens Neuhüttler.** *Wasserstoffspeicher für dezentrale Energiesysteme.* Heilbronn : s.n., 2024.
44. **Stadtwerke Rüsselsheim.** Die Stadtwerke setzen künftig auf E-Busse. *stadtwerke-ruesselsheim.de.* [Online] 24. Juli 2023. <https://www.stadtwerke-ruesselsheim.de/de/Privatkunden/Presse/Presse-2023/Die-Stadtwerke-setzen-kuenftig-auf-E-Busse.html>.
45. **Hochschule RheinMain.** Forschung - Ingenieurwissenschaften. *hs-rm.de.* [Online] o.J. .
<https://www.hs-rm.de/ingenieurwissenschaften/forschung/fachgebiete/wasserstofftechnologie-und-energiespeicher/forschung>.
46. **Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz.** 2. *Fortschreibung Luftreinhalteplan für den Ballungsraum Rhein-Main, Teilplan Rüsselsheim.* [Dokument] 2015.
47. **Hintemann, R., Hinterholzer, S. & Progni, K.** *Bitkom-Studie Rechenzentren in Deutschland: Aktuelle Marktentwicklungen – Stand 2024.* Berlin : s.n., 2024.
48. **Jr., Charles Baukal.** *Oxygen-Enhanced Combustion.* Bosa Roca : s.n., 2013. 9781439862285.
49. **Mark Jentsch, Sebastian Büttner.** Dezentrale Umsetzung der Energie- und Verkehrswende. *gwf Gas + Energie.* 2019, 06/2019.

50. **Mohammadpour, Hossein, et al.** Utilisation of oxygen from water electrolysis – Assessment for wastewater treatment and aquaculture. *Chemical Engineering Science*. 2021, 246.
51. **Andrea Liberale Rispoli, Nicola Verdone, Giorgio Vilardi.** Green fuel production by coupling plastic waste oxy-combustion and PtG technologies: Economic, energy, exergy and CO₂-cycle analysis. *Fuel Processing Technology*. 2021, 221.
52. **Manuel Bailera, Nouaamane Kezibri, Luis Romeo, Sergio Espatolero, Pilar Lisbona, Chakib Bouallou.** Future applications of hydrogen production and CO₂ utilization for energy storage: Hybrid Power to Gas-Oxycombustion power plants. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017, 42.
53. **Lehner, Markus, et al.** *Power-to-Gas: Technology and Business Models*. Cham : s.n., 2014.
54. **Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking.** *Hydrogen roadmap Europe – A sustainable pathway for the European energy transition*. [Hrsg.] Publications Office of the EU. 2016.
55. **Galen Bower, Whitney Jones, Ben King and Nathan Pastorek.** *Clean Hydrogen Workforce Development: Opportunities by Occupation* . [Hrsg.] Rhodium Group. September 2023.
56. *Landesweite Brachflächenerfassung Nordrhein-Westfalen.* **Berief, Klaus-Jürgen.** Dresden : s.n. DFNS 2023 – Dresdner Flächennutzungssymposium (DFNS 2023).
57. **EWI.** *Standortbewertung für systemdienliche Elektrolyseure*. [Präsentationsfolien] 2024.
58. **ENTSOG AISBL.** Hydrogen Infrastructure Map. [Online] 1. 09 2024.
<https://www.h2inframap.eu/#map>.
59. **e-mobil BW GmbH – Landesagentur für Elektromobilität und Brennstoffzellentechnologie; Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE.** *WASSERSTOFF-INFRASTRUKTUR FÜR EINE NACHHALTIGE MOBILITÄT - Entwicklungsstand und Forschungsbedarf*. Stuttgart : s.n., 2013.
60. **Burckhardt Compression.** Wasserstoff-Kompressorlösungen. [Online]
<https://www.burckhardtcompression.com/products/process-gas-compressors/>.
61. **Pluta, Werner.** Wasserstoffzüge im Taunus fallen dauernd aus. [Online] 2. Oktober 2024.
<https://www.golem.de/news/alstom-coradia-ilint-wasserstoffzuege-im-taunus-fallen-dauernd-aus-2410-189454.html>.
62. **Schwarz, Magnus.** Wasserstoffzüge: Heidekrautbahn muss Betrieb nach zwei Wochen einschränken. [Online] H2News, 2. Januar 2025. <https://h2-news.de/wirtschaft-unternehmen/wasserstoffzuege-heidekrautbahn-muss-betrieb-nach-zwei-wochen-einstellen/>.
63. **Fraunhofer IML.** Innovationsprojekt entwickelt neuartigen Transport-Container für die Schiene. [Online] 08. Dezember 2022.
https://www.iml.fraunhofer.de/de/presse_medien/pressemitteilungen/h2logisticsonrail.html.
64. **bulwiengesa.** *Machbarkeitsstudie Opel-Areal (Stellantisflächen) Rüsselsheim am Main*. 2023.
65. *Highly efficient high temperature electrolysis.* **Hauch, Anne, et al.** 2008.
66. **Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V.** *Wasserstoff verkleinert den. CO₂ -Fußabdruck – auf vielen Wegen* : s.n., April 2023.
67. *Meta-analysis of climate impact reduction potential of hydrogen usage in 9 Power-to-X pathways.* **Jani Sillman, Jouni Havukainen, Rami Alfasfos, Nashmin Elyasi, Miro Lilja, Vesa Ruuskanen, Emma**

Laasonen, Lauri Leppäkoski, Ville Uusitalo, Risto Soukka. Volume 359, Lappeenranta : s.n., 2024, Applied Energy.

68. **DVGW.** DVGW-Arbeitsblatt G 262. s.l. : DVGW, 2011.

69. **H2-Mobility.** Wasserstoffbetankung von Schwerlastfahrzeugen – die Optionen im Überblick. s.l. : H2-Mobility, 2021.

70. **Open Grid Europe GmbH .** Beteiligungen der OGE. [Online] [Zitat vom: 28. 05 2025.] <https://oge.net/de/wir/unternehmen/beteiligungen>.

71. **Energieversorgung Rüsselsheim GmbH.** Erdgasnetz Netzbeschreibung. [Online] [Zitat vom: 13. 06 2025.] <https://www.swr-netze-ruesselsheim.de/de/Erdgasnetz/Veroeffentlichungspflichten/Netzbeschreibung/>.

72. **Vereinigung der Fernleitungsnetzbetreiber Gas e.V.** Fernleitungsnetz (NEP Gas 2022-2032). [Online] o.A. <https://fnb-gas.de/deutschland-sicher-mit-erdgas-versorgen/fernleitungsnetz/>.

73. **Zandt, Florian.** Server sind Stromverbraucher Nummer eins in der IT . *statista.com*. [Online] Statista, 27. Juli 2022. <https://de.statista.com/infografik/27846/stromverbrauch-von-deutschen-rechenzentren-und-kleineren-it-installationen-pro-jahr/>.

74. **IEA.** Energy demand from AI . *iea.org*. [Online] April 2025. <https://www.iea.org/reports/energy-and-ai/energy-demand-from-ai/>.

75. **Spiegel.** [Online] <https://www.spiegel.de/auto/hessen-blamage-fuer-die-brennstoffzelle-a-1ff2d6e9-d936-4a39-ae12-8f52e2d273b8>.

12. Anhang

12.1. Bewertungsmatrix

Die Bewertungsmatrix für alle untersuchten Standortalternativen wird im separaten Anhang_12.1.1_Standortalternativen_Matrix sowie Anhang_12.1.2_Bewertungsmatrix zur Verfügung gestellt.

12.2. Modellszenarien

Die Parameter, die in die Modellszenarien eingeflossen sind, werden im separaten Anhang_12.2_Modellszenarien zur Verfügung gestellt.

12.3. Genehmigungsleitfaden

Eine detailliertere Ausführung über die genehmigungsrechtlichen Rahmenbedingungen ist in Anhang_12.3_Genehmigungsleitfaden aufgeführt

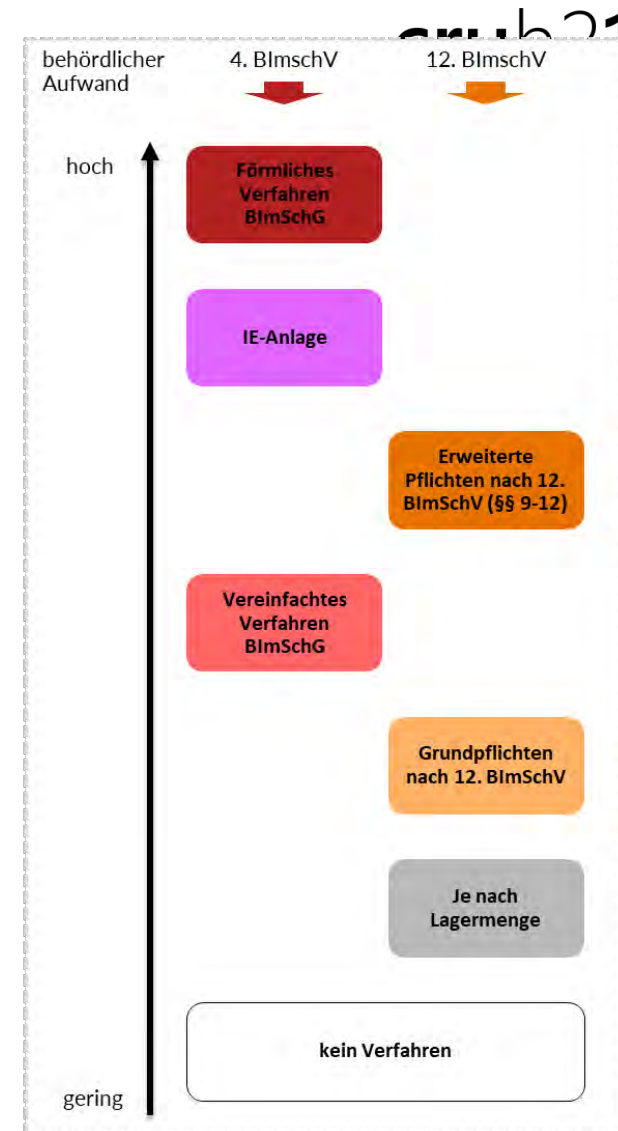
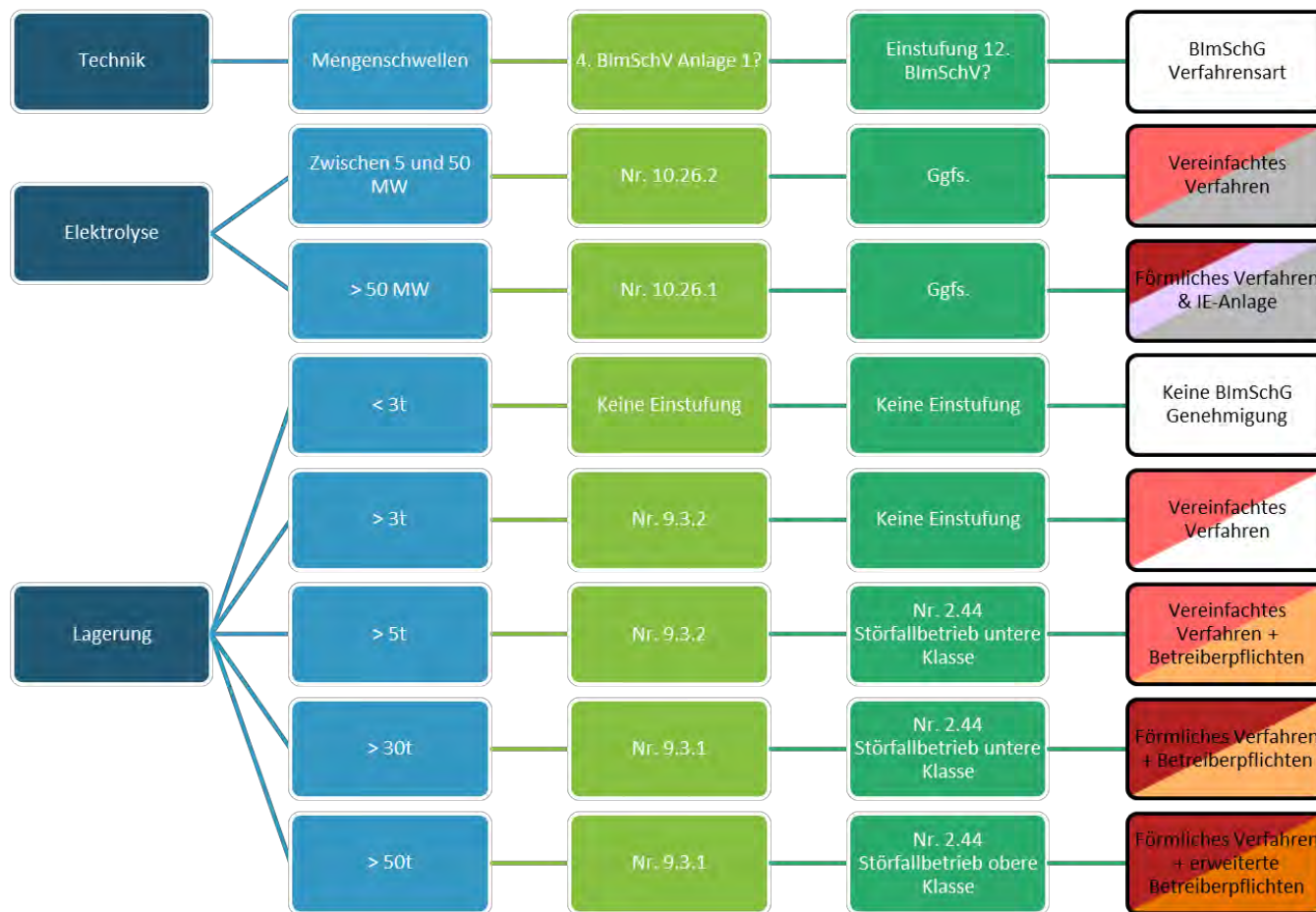
12.4. Foliensatz

Die Präsentationsfolien der Abschlusspräsentation sind in Anhang_12.4_Foliensatz abgelegt

12.5. Karten

Hochauflösende Versionen der Karten wird im separaten Anhang_12.5_Karten zur Verfügung gestellt.

12.6. Sonstige Anhänge



Anhang I. Übersichtsschema Genehmigungsrecht

Eine detaillierte Aufschlüsselung der genehmigungsrechtlichen Rahmenbedingungen wird im separaten Anhang 250828_Anhang_12.2.1_Genehmigungsleitfaden zur Verfügung gestellt.

Anhang II. Blaupause

Anforderungskatalog für äquivalente Industriestandorte in Hessen

Basierend auf die Bewertungsmatrix kann ein strukturierter Anforderungskatalog für eine Blaupause äquivalenter Industriestandorte erstellt werden. Dieser Katalog dient als Leitfaden für die Auswahl, Bewertung und Entwicklung geeigneter Flächen für Wasserstoff-Elektrolyseure.

KATEGORIE	ANFORDERUNGSKRITERIUM	ERLÄUTERUNG
GRUNDSTÜCK	Flächennutzung & Nachbarnutzung	Gewerbliche/industrielle Umgebung, keine Wohnnutzung oder sensible Einrichtungen
	Zugänglichkeit	Gute Erreichbarkeit übergeordnete Straßen, für Bau & Betrieb wichtig
BEBAUUNG	Eigentumsverhältnisse	Öffentliches Eigentum oder eindeutig verfügbare Privatflächen
	Bestehende Bebauung	Möglichst unbebaute Fläche oder geringe Rückbaukosten
	Planungen laut Rahmenkonzept / Eigentümer	Keine Nutzungskonflikte mit geplanten Vorhaben
	Grundstücksverfügbarkeit	Zeitnah verfügbar unter Berücksichtigung geplanter Entwicklungen
BODEN & UMWELT	Lärm- und Immissionsschutz	Keine Nähe zu schutzbedürftigen Einrichtungen
	Altlasten / Bodenverunreinigungen	Keine oder leicht handhabbare Altlasten
	Kampfmittel	Kein Verdacht oder dokumentierte Belastung
	Schutzgebiete / Artenschutz / Baumschutz	Keine Eingriffe in Schutzräume
	Hochwassergefährdung	Nicht in Hochwassergebieten oder Überflutungsflächen
	Archäologische Befunde	Keine relevanten archäologischen Funde
BAURECHT & GENEHMIGUNG	Darstellung im FNP	Gewerbe-/Industriegebietsausweisung erforderlich
	Vorgaben im B-Plan	Nutzung als Industrieanlage zulässig, keine restriktiven Auflagen
	Denkmalschutz	Keine denkmalgeschützten Objekte betroffen
	Genehmigungsfähigkeit	Keine planungsrechtlichen oder bauordnungsrechtlichen Hürden
WIRTSCHAFTLICHKEIT & ABWICKLUNG	Bodenrichtwert / Grundstückspreis	Moderate Kosten im Rahmen der Projektwirtschaftlichkeit
INFRASTRUKTUR	Stromversorgung	Anschlussmöglichkeit an Hochspannungsnetz, idealerweise EE-nah

	Wasserversorgung	Kontinuierliche, hochwertige Versorgung (z.B. aus kommunalem Netz)
	Abwasserentsorgung	Technisch gesicherte Ableitung / Behandlung vorhanden
	H ₂ -Infrastruktur	Bestehende/plangeführte H ₂ -Leitungen oder -Anschlüsse
	Abwärmenutzung	Optionen für industrielle/kommunale Wärmenutzung prüfen
	Flächengröße & Zuschnitt	Ausreichend groß und eben zur Aufnahme aller Anlagenkomponenten

Anforderung an die Bauleitplanung:

Im Rahmen der planungsrechtlichen Einordnung von Wasserstoff-Elektrolyseuren ist die Zulässigkeit maßgeblich von der jeweiligen Gebietskategorie gemäß der Baunutzungsverordnung (BauNVO) abhängig. Grundsätzlich sind Elektrolyseure als gewerbliche oder industrielle Anlagen in Gewerbegebieten (§ 8 BauNVO) sowie Industriegebieten (§ 9 BauNVO) genehmigungsfähig. In Sondergebieten (§ 11 BauNVO) kann ihre Zulässigkeit durch entsprechende Festsetzungen im Bebauungsplan explizit ermöglicht werden, etwa im Rahmen von Sondergebieten für Energieerzeugung oder Wasserstofftechnologie. Im Außenbereich (§ 35 BauGB) ist eine Genehmigung nur unter bestimmten Voraussetzungen möglich, beispielsweise wenn die Anlage im Zusammenhang mit erneuerbaren Energien steht und als privilegiertes Vorhaben eingestuft werden kann. Für die Genehmigungsfähigkeit ist entscheidend, dass die „Art der baulichen Nutzung“ im Bebauungsplan eine gewerbliche, industrielle oder energieerzeugende Nutzung vorsieht. Zudem kann eine Genehmigung nach dem Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) erforderlich sein, insbesondere bei größeren Anlagen mit relevanten Emissionen. Die planerische Ausweisung geeigneter Flächen sowie eine frühzeitige Abstimmung mit den Genehmigungsbehörden sind daher zentrale Voraussetzungen für die erfolgreiche Realisierung von Elektrolyseurprojekten.

	ERZEUGUNG	LAGERUNG	FEUERUNG
4. BIMSCHV VEREINFACHT	5 MW, < 50 t/d	3 t	1 MW
4. BIMSCHV FÖRMLICH	> 50 t/d	30 t	50 MW
IE-ANLAGE	> 50 t/d	-	50 MW
12. BIMSCHV UNTERE KLASSE	Summe Betriebsbereich: 5t		
12. BIMSCHV OBERE KLASSE	Summe Betriebsbereich: 50t		
UVP-VORPRÜFUNG, STANDORTBEZOGEN	5 MW	3 t	< 50 MW
UVP-VORPRÜFUNG, ALLGEMEIN	50 MW	300 t	50 MW
UVP-PFLICHTIG	-	200.000 t	> 200 MW
EMISSIONSGENEHMIGUNG (TEHG)	5 t/d	n.A.	