

AUS MÜLL
WIRD MOBILITÄT



MH2Regio



ABSCHLUSSBERICHT

MH2Regio - Aus Müll wird Mobilität

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Verkehr und
digitale Infrastruktur

Koordiniert durch:



Projekträger:



ABSCHLUSSBERICHT MH2REGIO

Förderantragssteller:

Stadt Frankfurt am Main – Dezernat IX

Kurztitel:

MH2Regio

Förderkennzeichen:

03B510008

Laufzeit:

11/2020 – 12/2021

Projektkoordination

Mainova AG

Bearbeiter:

Los 1 - Gesamtsystemanalyse

Tractebel Engineering GmbH

Los 2 - Rechtliche Analyse

CMS Hasche Sigle Partnerschaft von Rechtsanwälten und Steuerberatern mbB

Los 3 - Umfeldanalyse

d-fine GmbH

Los 4 - Öffentlichkeitsarbeit

Drees & Sommer SE

Projekt-Webseite:

www.mainova.de/mh2regio

Ansprechpartner zum Projekt:

Kristian Junker

Gutleutstraße 231

60327 Frankfurt am Main

k.junker@mainova.de

069 / 213 – 82253

Inhalt

1.	Einleitung	9
1.1.	Vorbemerkung	9
1.2.	Gliederungsstruktur	9
1.3.	Motivation für das Thema	10
1.4.	Ziele der Konzeptstudie	11
2.	Rechtliche Analyse	12
2.1.	Einführung und Überblick über den einschlägigen Rechtsrahmen	12
2.1.1.	EU	12
2.1.2.	Deutschland	16
2.2.	Anwendbarer Rechtsrahmen	20
2.3.	Erzeugung	20
2.3.1.	Elektrolyseanlage	20
2.3.2.	Pufferspeicher und Abfüllanlage	22
2.4.	Transport/Lagerung: Zentrale Speicherung und Verteilung	22
2.4.1.	Transport per LKW	22
2.4.2.	Lagerung (sofern Leitungsanbindung)	22
2.4.3.	Option: Direkte Leitungsanbindung des Distributionsstützpunkts an die Erzeugung am MHKW	23
2.5.	Abgabe/Verbrauch	24
2.5.1.	Tankstellenkonzept	24
2.5.2.	Option: Direkte Anbindung des Elektrolyseurs an die Tankstelle	24
2.6.	Zusammenfassende Darstellung von grenzwertgebenden Parametern	24
2.7.	Steuern, Abgaben und Umlagen	25
3.	Umfeldanalyse	26
3.1.	Marktaktivitäten und –potenziale	26
3.1.1.	Quellensichtung und Aufbau der Datengrundlage	26
3.1.2.	Aufbereitung und Darstellung im Excel-Dokument	27
3.1.3.	Projektsteckbriefe	28
3.1.4.	Integration in die uMap	28
3.2.	Quellen-Senken-Analyse	30
3.2.1.	Information der Partnerunternehmen	30
3.2.2.	Annahmen für die Abschätzung des Wasserstoffbedarfs	32
3.2.3.	Standortgenaue Abschätzung des Wasserstoffbedarfs	39
3.2.4.	Ergebnisse für die Stichtage 2025, 2030, 2035 und 2040	48
3.3.	Verkehrsaufkommen Analyse	51
3.3.1.	Datengrundlage	52
3.3.2.	Modellierung des Wasserstoffbedarfs auf Basis der verkehrlichen Analyse	57
3.3.3.	Ergebnisse für die Stichtage 2025, 2030, 2035 und 2040	63
3.4.	Gesamtheitliche Auswertung	65
3.4.1.	Relevante Kriterien für die Standortauswahl von Wasserstofftankinfrastruktur	65

3.4.2.	Identifizierung von geeigneten Gebieten für Wasserstofftankstellen	66
3.4.3.	Bewertung der identifizierten Gebiete	67
3.4.4.	Standortempfehlung für Wasserstofftankstellen	69
3.4.5.	Weitere relevante Aspekte für den Aufbau von Tankinfrastruktur	71
4.	Gesamtsystemmodellierung	72
4.1.	Grundlagenermittlung	72
4.1.1.	Standortanalysen	72
4.1.2.	Entwicklung von Szenarien	79
4.1.3.	Definition von Eingangsparameter zur Softwaresimulation	82
4.1.4.	Entwicklung von Standardnutzerprofilen	83
4.1.5.	Definition von Störeignissen und Stresstestszenarien	92
4.2.	Softwaremodellierung des Gesamtsystems und technoökonomische Optimierung	98
4.2.1.	Aufbau des Softwaremodells	98
4.2.2.	Auswirkung Stresstestszenarien	103
4.2.3.	Ergebnisse der technischen und wirtschaftliche Optimierung	110
4.2.4.	Betreibermodelle	119
4.2.5.	Kostenermittlung	122
4.2.6.	Wirtschaftlichkeitsberechnung	123
4.2.7.	Förderbedarfsermittlung	124
4.3.	Wasserstoffsystemelemente	128
4.3.1.	Entwicklung standardisierte Wasserstofftankstelle	128
4.3.2.	Entwicklung anwenderspezifischer Tankstellen	136
4.3.3.	Entwicklung Wasserstofferzeugungs- und Abfüllanlage	144
4.3.4.	Entwicklung Zentrale Wasserstoffspeicherung und –verteilung	162
4.4.	Sauerstoffnutzung	171
4.4.1.	Methodik	171
4.4.2.	Berechnungsmodell	171
4.4.3.	Sauerstoffverhältnis	174
4.4.4.	Optionen zur Sauerstoffnutzung	175
4.4.5.	Einfluss der Sauerstoffnutzung auf die Schadstoffproduktion	177
4.4.6.	Quantitative Beschreibung der Sauerstoffnutzung	177
4.4.7.	Schlussfolgerung	178
4.5.	Öffentlich zugängliches Softwaretool	179
4.5.1.	Allgemeine Funktionsweise	179
4.5.2.	Eingabeparameter	179
4.5.3.	Ausgabeparameter	180
4.5.4.	Ergebnisseite	181
5.	Öffentlichkeitsarbeit	182
5.1.	Erklärvideo	182
5.2.	Transportlogistik-Animation	183
5.3.	Veröffentlichungen	184



6.	Zusammenfassung	185
7.	Anhang	186

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Gliederungsstruktur der Projektergebnisse	9
Abbildung 2: uMap Karte zu Marktaktivitäten und -potentialen	29
Abbildung 3: Fortgeschriebener periodischer Investitionszyklus	38
Abbildung 4: Relevante Standorte im Rhein-Main-Gebiet (Standortanzahl: 562).....	41
Abbildung 5: DHL Zustellbasis (Koordinaten: 50.11691, 8.76134)	42
Abbildung 6: Vergleich des Energieverbrauchs in kWh/km für LKW	44
Abbildung 7: Anteil von Brennstoffzellenfahrzeugen an Neuanschaffungen pro Fahrzeugtyp im konservativen und optimistischen Szenario	46
Abbildung 8: Flottenanteile optimistisches Szenario	48
Abbildung 9: Flottenanteile konservatives Szenario.....	48
Abbildung 10: Visualisierung H ₂ -Bedarf 2025 - 2040	51
Abbildung 11: Die Standorte der Zählstellen der BAST im Rhein-Main-Gebiet (eigene Darstellung in QGIS)	53
Abbildung 12: Die Standorte der Zählstellen der BAST (rot) sowie die zusätzlichen Zählstellen (blau) der Autobahn GmbH (eigene Darstellung in QGIS)	54
Abbildung 13: Erfassung der Fahrzeuge nach TLS basierend BAST. In Rot die Schwerlastverkehrsklassen.	55
Abbildung 14: Berechnung der durchschnittlichen täglichen Verkehrsstärke am Beispiel der Strecke Frankfurt Bonames - Niedereschbach.....	59
Abbildung 15: Main-Abschnitt zur Analyse des Binnenschiffsverkehrs.....	61
Abbildung 16: Entwicklung des Wasserstoffbedarfs auf den Hauptverkehrsachsen	63
Abbildung 17: Wasserstoffverbrauch für den Liefer- und Schwerlastverkehr im Raum Frankfurt	64
Abbildung 18: Wasserstoffbedarf für den Schiffsverkehr im Raum Frankfurt	64
Abbildung 19: Erste Identifikation von potenziellen Standorten für Wasserstofftankstellen (Basis: 2030, konservatives Szenario)	66
Abbildung 20: Die Aggregation der einzelnen Gebiete in Cluster	69
Abbildung 21: Übersicht Gesamtsystemmodellierung.....	72
Abbildung 22: Lageplan MHKW Frankfurt Nordweststadt.....	73
Abbildung 23: Standortoption A (links), Standortoption B (rechts).....	74
Abbildung 24: Übersicht der Tankstellenstandorte für das Gesamtsystem	79
Abbildung 25: Vision 2040 – Anbindungskonzept per Pipeline (Szenario 6+)	82
Abbildung 26: Legende Parameterliste	83
Abbildung 27: Methodisches Vorgehen zur Erstellung von Standardnutzerprofilen	84
Abbildung 28: Personennahverkehr: stündliche Nachfrageprofile	87
Abbildung 29: Entsorgungslogistik: stündliche Nachfrageprofile	87
Abbildung 30: Binnenschiffahrt: stündliche Nachfrage.....	88
Abbildung 31: Normiertes Nachfragprofil für Busse (links) und LKW/PKW (rechts)	88
Abbildung 32: Nachfrageprofile einer Referenzwoche für die Tankstelle 1 - 5 (Szenario optimistisch geglättet).....	90
Abbildung 33: Nachfrageentwicklung (Tagesabsatz) an den Tankstellenstandorten	91
Abbildung 34: Kategorien zur Identifizierung von Störereignissen.....	93
Abbildung 35: Matrix zur Risikobewertung	94

Abbildung 36: Verteilung der betrachteten Störereignisse nach Risikobewertung und Auswirkungsdauer	96
Abbildung 37: Zusammenspiel der verwendeten Modelle	99
Abbildung 38: PROSUMER Beispielbild	100
Abbildung 39: Logistikmodell - Beispiel Trailerdispatch	102
Abbildung 40: Hierarchische Gliederung der Risikominderungsmaßnahmen	103
Abbildung 41: Stresstestszenario 2 – Inspektionszeitfenster	105
Abbildung 42: Stresstestszenario 2 – Verlauf Speicherfüllstand.....	106
Abbildung 43: Blockfließdiagramm des Szenario 2a+.....	115
Abbildung 44: Übersichtskarte der Elektrolyse- und Tankstellenkapazitäten im Szenario 7a+	116
Abbildung 45: Vergleich der Bereitstellungskosten Grundmodell und Vision 2040	118
Abbildung 46: Betreibermodell Basisfall	120
Abbildung 47: Betreibermodell Sensitivität 1	120
Abbildung 48: Betreibermodell Sensitivität 2	121
Abbildung 49: Prozessfließdiagramm der standardisierten Wasserstofftankstelle	129
Abbildung 50: Aufstellungsplan Standard Tankstelle	135
Abbildung 51: Betankungsprofil einer Referenzwoche.....	136
Abbildung 52: Schleppkurvenanalyse bei Anfahrt der MHKW-Tankstelle (Abfallsammelfahrzeug)	137
Abbildung 53: Prozessfließdiagramm der anwenderspezifischen Tankstelle	138
Abbildung 54: Aufstellungsentwurf MHKW-Tankstelle	139
Abbildung 55: Prozessfließdiagramm der Binnenschiffahrts-Wasserstofftankstelle	143
Abbildung 56: Aufstellungsplan der Binnenschiffahrts-Wasserstofftankstelle	143
Abbildung 57: Schematische Darstellung der Gesamtanlage MHKW	144
Abbildung 58: Prozessfließdiagramm Elektrolyseanlage	146
Abbildung 59: Prozessfließdiagramm Trailerabfüllanlage	150
Abbildung 60: Übersichtsschaltbild Elektrolyseanlage	155
Abbildung 61: Lage geplanter Standort	157
Abbildung 62: Überblick geplanter Standort am MHKW und bestehende Bebauung	157
Abbildung 63: Zufahrt zur bestehenden Dieseltankstelle	158
Abbildung 64: Schleppkurve Müllfahrzeug 9,9 m lang, 3-achsig	159
Abbildung 65: Aufstellungsplan Elektrolyse- und Trailerabfüllanlage	161
Abbildung 66: Aufstellungsplan Distributionsstützpunkt.....	164
Abbildung 67: Übersichtsschema der konzeptionellen Gesamtsystemarchitektur	166
Abbildung 69: Architektur des Leitsystems für die H ₂ -Speicherverwaltung und Distributionssteuerung	168
Abbildung 71: Feuerungsleistungsdiagramm des MHKW Nordweststadt.....	171
Abbildung 72: Prinzipskizze MHKW Feuerung – Detail Kessel	173
Abbildung 73: Prinzipskizze - 1 MW Elektrolysesystem.....	174
Abbildung 74: Bildschirmausschnitt Softwaretool – Eingabemaske.....	180
Abbildung 75: Bildschirmausschnitt Softwaretool – Ergebnisseite.....	181
Abbildung 76: Öffentlichkeitsarbeit - Kommunikationsziele	182
Abbildung 77: Simpleshow Illustration.....	182
Abbildung 78: Bildschirmausschnitt Erklärvideo Projekthomepage	183
Abbildung 79: Bildschirmausschnitt Animation Transportlogistik	184

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: H ₂ -Kraftstoffverbrauch in kg je 100 km für verschiedene Fahrzeugtypen	44
Tabelle 2: Durchschnittliche jährliche Laufleistung pro Fahrzeugtyp für Nicht-Partner-Standorte und Betankungsverhalten pro Fahrzeugtyp	45
Tabelle 3: Informationen zum Flottenalter pro Fahrzeugtyp zur Modellierung der Flotteninvestitionen ...	47
Tabelle 4: Schiffsdurchfahrten an der Schleuse Kostheim im Jahr 2019 nach Schiffstyp und Typ der Beladung.....	48
Tabelle 5: Detaillierte Betrachtung des konservativen Szenarios	49
Tabelle 6: Detaillierte Betrachtung des optimistischen Szenarios	50
Tabelle 7: H ₂ -Kraftstoffverbrauch in kg je 100 km für verschiedene Fahrzeugtypen	60
Tabelle 8: Schiffsdurchfahrten an der Schleuse Kostheim im Jahr 2019 nach Schiffstyp und Typ der Beladung.....	62
Tabelle 9: Anzahl BZ-Schiffe an der Gesamtflotte	62
Tabelle 10: Identifizierte Gebiete im Raum Frankfurt zur weiteren Untersuchung	67
Tabelle 11: Entwicklung des Wasserstoffbedarfs in Tonnen der identifizierten Gebiete unterschieden nach Partner und Umfeld unter dem konservativen Szenario.....	68
Tabelle 12: Entwicklung des Wasserstoffbedarfs in Tonnen der identifizierten Gebiete unterschieden nach Partner und Umfeld unter dem optimistischen Szenario	68
Tabelle 13: Standortkriterien	77
Tabelle 14: Szenariomatrix MH2Regio "Grundmodell"	80
Tabelle 15: Szenariomatrix MH2Regio "Vision 2040"	81
Tabelle 16: Übersicht Anwendergruppen	85
Tabelle 17: spezifischer Wasserstoffverbrauch je Fahrzeugkategorie.....	86
Tabelle 18: Übersicht Tankstellenstandorte und zugeordnete Anwender	89
Tabelle 19: Szenariomatrix Stresstestszenarien	97
Tabelle 20: Stresstestszenario 1a - Übersicht der Maßnahmen	104
Tabelle 21: Stresstestszenario 1b - Übersicht der Maßnahmen	105
Tabelle 22: Stresstestszenario 2a und 2b Übersicht der Maßnahmen	107
Tabelle 23: Stresstestszenarien 3a – Übersicht der Maßnahmen	108
Tabelle 24: Stresstestszenarien 3b – Übersicht der Maßnahmen	109
Tabelle 25: Wasserstoffgestehung in den Szenarien des Grundmodells	111
Tabelle 26: Wasserstoffgestehung in den geglätteten Szenarien des Grundmodells	112
Tabelle 27: Wasserstoffgestehung in den Modell 2040 Szenarien	112
Tabelle 28: Ranking der Szenarien im Vision 2040 Modell.....	116
Tabelle 29: Qualitative Übersicht der Kostenvor/-nachteile	118
Tabelle 30: Übersicht Investitionskosten Szenario 2a+	122
Tabelle 31: Zusammensetzung des LCOH in der Gesamtsystemlösung	124
Tabelle 32: Definition der KPI Zielwerte	124
Tabelle 33: Differenzen zu KPI Zielwerten	125
Tabelle 34: benötigte Investitionsförderquoten für Ziel-Verkaufspreise	127
Tabelle 35: Theoretische Wasserstoffverbräuche der Fahrzeugflotte	140
Tabelle 36: Realisierbare Tankreichweite (geschätzt)	140
Tabelle 37: Direktbefüllung 20´-MEGC-Trailer	142

Tabelle 38: Auslegungsparameter Elektrolyseanlage	147
Tabelle 39: Anforderungen Wasserqualität für Elektrolyseure	152
Tabelle 40: Auslegungsparameter Distributionsstützpunkt	162
Tabelle 41: Genutzte Brennstoffanalyse	172
Tabelle 42: Übersicht Veröffentlichungen	184

1. Einleitung

1.1. Vorbemerkung

Der vorliegende Abschlussbericht und dessen Inhalte, sowie die Bearbeitung während des Bewilligungszeitraums, wurden von der Mainova AG als Projektkoordinator für die Stadt Frankfurt am Main (Dezernat für Wirtschaft) erstellt. Der Abschlussbericht dient dem Zweck der Veröffentlichung und enthält keine sensiblen Daten.

1.2. Gliederungsstruktur

Das Gesamtprojekt gliedert sich wie folgt:

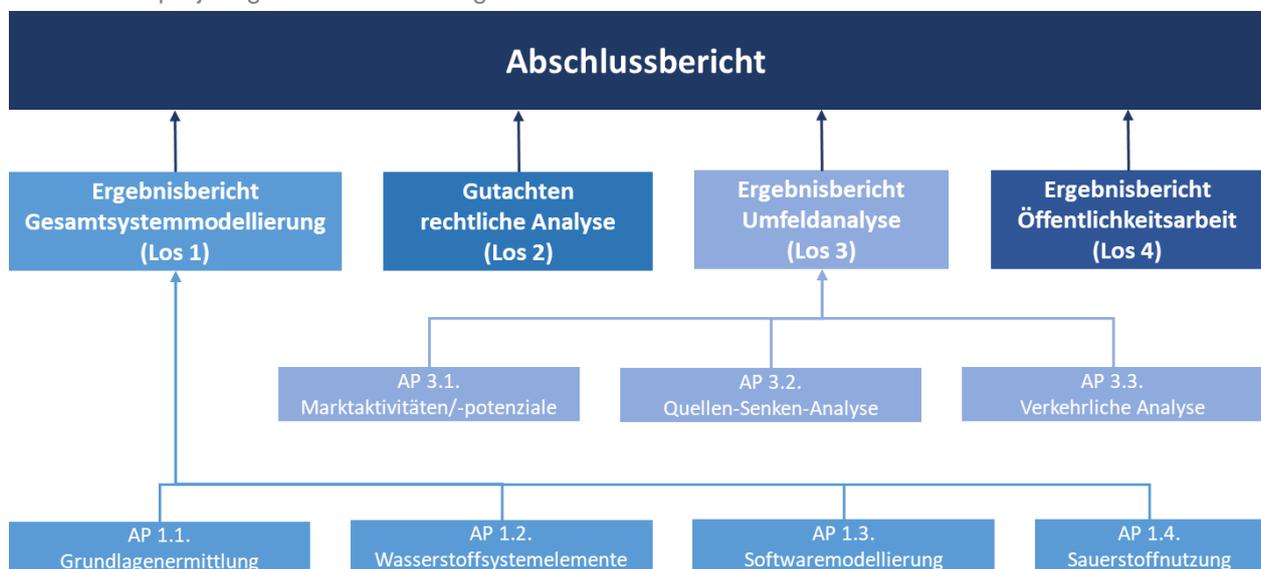


Abbildung 1: Gliederungsstruktur der Projektergebnisse

Im Abschlussbericht wurden die wesentlichen Ergebnisse, Erkenntnisse und Ausarbeitungen aus den einzelnen Losen zusammengeführt. Dabei orientiert sich die Reihenfolge der Ergebnisdarstellung im Abschlussbericht nicht an der Losnummer, sondern anhand der projektrelevanten logischen Reihenfolge. Auch parallel bearbeitete Arbeitspakete wurden im Abschlussbericht in diese logische Reihenfolge gebracht, damit Sie nachvollziehbar dargestellt werden konnten.

Begonnen wurde daher mit der Darstellung des rechtlichen Rahmens (Los 2). Danach wurde mit der Umfeldanalyse zum Rhein-Main-Gebiet (Los 3) ein wichtiger Beitrag für die Auslegung und Dimensionierung des Gesamtsystems geliefert. Die Ergebnisse wurden anschließend im Los 1 – der Gesamtsystemmodellierung weiterverarbeitet und das Gesamtsystem technoökonomisch optimiert, sowie das gewählte System dargestellt. Abschließend wurde der Umgang mit Ergebnisaufbereitung, Kommunikation und Öffentlichkeitsarbeit im Projekt dargelegt.

1.3. Motivation für das Thema

Die Stadt Frankfurt am Main und Ihre Tochtergesellschaften arbeiten seit 10 Jahren an der schrittweisen Transformation zur Klimaneutralität in allen Wirtschaftssektoren. In der Vergangenheit wurden bereits zahlreiche Projekte und Initiativen ins Leben gerufen und konstant weiterentwickelt, um die Klimaschutzziele der Bundesregierung zu erfüllen.

Unter anderem wurde bereits im März 2012 die Erstellung eines „Masterplan 100% Klimaschutz“ von der Stadtverordnetenversammlung beschlossen, um im Jahr 2050 die Stadt Frankfurt am Main vollständig mit erneuerbaren Energien zu versorgen. Im Jahr 2015 wurde vom beauftragten Fraunhofer Institut für Bauphysik (IBP) mit Unterstützung des Fraunhofer Institutes für Solare Energiesysteme (ISE) die Machbarkeitsstudie vorgestellt, welche seither als Grundlage politischer Entscheidungen dient.

Darüber hinaus übernimmt das Energiereferat als kommunale Klimaschutzagentur der Stadt Frankfurt zahlreiche Aufgaben in Sachen Klimaschutz, unterstützt und berät mit Ihrem Expertenrat Bauherren und Architekten, fördert den Dialog für ein regionales Energiekonzept und gibt Tipps und Handlungsempfehlungen zu den Themen Stromsparen, Fassadendämmung bei Baudenkmälern oder Green Building / Green IT.

Ein zentraler Anker bei der Entstehung der Projektidee waren unter anderem die Ergebnisse der Studie zur Umstellung auf CO₂ neutrale Antriebstechnologie der traffiQ GmbH (Nahverkehrsorganisationsgesellschaft der Stadt Frankfurt am Main) Hier wurde empfohlen, dass bis zum Jahr 2030 die Umstellung der Nahverkehrsbusse im ÖPNV sowohl Batterieelektrisch als auch auf Brennstoffzelle erfolgen sollte. Letztere haben bei der verkehrlichen Leistungserbringung den höheren Anteil. Die Erprobung von Brennstoffzellenbussen erfolgt über die Tochtergesellschaft In der City Bus (ICB) und startet voraussichtlich Mitte 2022. Bis zu 22 Fahrzeuge sollen bis 2024 beschafft werden.

Um diese und zukünftig weitere Fahrzeuge mit Wasserstoff zu versorgen ist eine grundlegende Infrastrukturplanung und Einbettung in städtebauliche Planprozesse zwingend erforderlich. Gleichzeitig müssen die Ergebnisse in Einklang mit bestehenden Bestrebungen der Stadt Frankfurt gebracht werden und in einen Gesamtkontext gebracht werden.

1.4. Ziele der Konzeptstudie

Die Machbarkeitsstudie wurde in vier unterschiedliche Schwerpunkte untergliedert und integriert die zentralen Ziele des Projektes in thematische Schwerpunkte. Alle Ziele stehen dabei in Abhängigkeit zueinander oder beeinflussen sich zumindest in Teilen.

Das Projekt MH2Regio hat sich folgende zentrale Ziele gesetzt:

- Entwicklung eines genehmigungsrechtlich vorabgestimmten Konzepts zur gemeinschaftlichen Nutzung einer regionalen Wasserstoffinfrastruktur im Personennah- und Fern-, Schwerlast- und Schifffahrtsverkehr
- Entwurf und Optimierung eines bedarfsgerechten Wasserstoffgesamtsystems (grüner Wasserstoff) durch Standardisierung aller relevanten Systemelemente und Integration potenzieller Wasserstoffanwender
- Entwurf einer bedarfsgerechten Wasserstoffdistributionsinfrastruktur mit zentraler Wasserstoffherzeugung, Wasserstofflage, Störungsmanagement, Back-up Lösungen und einer Szenario basierten Stresstestanalyse
- Technische und wirtschaftliche Bewertung des Gesamtsystems unter festgelegten KPI's

Folgende Nebenziele wurden für das Projekt festgelegt:

- Feststellen des rechtlichen Rahmens
- Vernetzung regionaler Akteure
- Blaupause für andere Regionen

Nichtziele

- Auslegung und Ausführungsplanung einzelner Elemente des Gesamtsystems
- Auslegung der Wasserstofftankstellen für einzelne Partner oder Anwender

2. Rechtliche Analyse

Die rechtliche Analyse bildet den Grundrahmen für die zu entwickelnde Gesamtsystemlösung. Varianten oder Systemzusammenstellungen außerhalb des vorgegebenen rechtlichen Rahmens oder bestimmter rechtlicher Hürden können somit im Vorfeld erkannt und vermieden werden. Lösungsansätze, für die der Rechtsrahmen unspezifisch oder nicht eindeutig ist, können vermieden oder besonders gekennzeichnet werden. Für diese Lösungen müssten Empfehlungen zur Schaffung von Rechtssicherheit erarbeitet oder eine Umsetzung nur unter Vorbehalt empfohlen werden.

Mit der nachfolgenden Untersuchung werden die wesentlichen rechtlichen Rahmenbedingungen für die Verwirklichung des Wasserstoffprojekts MH2Regio dargestellt. Da es sich um ein Pilotprojekt in einer frühen Phase der technischen Projektierung (Umsetzungskonzept) handelt, sei an dieser Stelle erwähnt, dass sich die Ergebnisse auf einen vorläufigen und in vielerlei Hinsicht noch offenen und im Fluss befindlichen Projektstand beziehen, wobei sich rechtliche, technische und wirtschaftliche Bedingungen und Erkenntnisse sowie Projektfortschritte wechselseitig beeinflussen.

Die Beurteilung ist vor diesem Hintergrund ausdrücklich als vorläufig einzustufen und bedarf einhergehend mit dem Projektfortschritt der wiederkehrenden Fortschreibung und Aktualisierung.

Anmerkung:

Dieser Berichtsteil gibt den geltenden Rechtsstand von Februar 2021 wieder. Eventuelle Änderungen wurden nachfolgend nicht berücksichtigt.

2.1. Einführung und Überblick über den einschlägigen Rechtsrahmen

Um das Projekt MH2Regio einzuordnen, wird einleitend ein kurzer, nicht erschöpfender Überblick über europäische und deutsche Rahmenbedingungen gegeben, die für die Einordnung des Projekts in den energiepolitischen Kontext, was Produktion, Transport und Verbrauch des Wasserstoffs betrifft, und seine Durchsetzung am Markt von Bedeutung sind.

Dabei ist darauf hinzuweisen, dass sich das rechtlich-regulatorische Umfeld für Wasserstoff derzeit am Beginn eines grundlegenden Entwicklungsprozesses befindet, sodass kurz- bis mittelfristig Unwägbarkeiten bei der Beurteilung der Rechtslage bestehen bleiben werden, auf die es sich einzustellen gilt.

2.1.1. EU

2.1.1.1. Wasserstoffstrategie der EU-Kommission

Nach der Vorstellung des Green Deal und der Vorlage des Entwurfs für ein Klimaschutzgesetz hat die EU-Kommission im Juli 2020 eine Wasserstoffstrategie der EU vorgelegt. Mit ihrer Wasserstoffstrategie weist die EU-Kommission Wasserstoff eine unterstützende Funktion bei der Dekarbonisierung von Industrie, Verkehr, Stromerzeugung und Gebäuden in ganz Europa zu. Damit wird ein Rahmen für die Strategien bzw. Strategieansätze gesteckt, die mittlerweile in vielen Mitgliedstaaten entwickelt wurden. Mit der Verkündung der Strategie wird klargestellt, dass Wasserstoff einen prominenten Platz in der künftigen EU-Energie- und Klimapolitik einnehmen wird.

3-Phasenkonzept

Die Strategie sieht für den Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft ein Konzept mit drei Phasen vor.

1. In der ersten Phase sollen in der EU für die Erzeugung von erneuerbarem Wasserstoff Elektrolyseure mit einer Elektrolyseleistung von mindestens 6 GW installiert werden. Ziel ist die Erzeugung von bis zu 1 Mio. t erneuerbarem Wasserstoff. Diese Mengen sollen die bestehende klimaschädliche Wasserstofferzeugung in der Industrie teilweise ersetzen. Gleichzeitig wird der erneuerbare Wasserstoff auch für die Versorgung von Wasserstofftankstellen benötigt. Flankierend ist vorgesehen, die Planung einer Fernleitungsstruktur für den Transport von Wasserstoff über größere Entfernungen zu initiieren. Gleichzeitig sollen auch für die Erzeugung von CO₂-armem Wasserstoff die Abscheidung und der Transport von CO₂ in Angriff genommen werden.
2. In der zweiten Phase sollen in der EU für die Erzeugung von erneuerbarem Wasserstoff Elektrolyseure mit einer Elektrolyseleistung von mindestens 40 GW installiert werden. Ziel ist die Erzeugung von bis zu 10 Mio. t erneuerbarem Wasserstoff. Es wird erwartet, dass erneuerbarer Wasserstoff in dieser Phase hinsichtlich der Kosten wettbewerbsfähiger im Verhältnis zu anderen Wasserstoffarten wird. Hierdurch sollen neue Anwendungsbereiche in der Industrie und im Mobilitätssektor eröffnet werden. Des Weiteren sollen regionale Wasserstoffsysteme entstehen, die mit lokal erzeugtem Wasserstoff in räumlicher Nähe bestehende Nachfrage decken. Gleichzeitig soll die Planung eines europaweiten Leitungsnetzes für die Verbindung zwischen den Gebieten mit erneuerbarer Energieerzeugung und den Nachfragezentren aufgenommen werden.
3. Für die dritte Phase wird erwartet, dass ein Viertel des Stroms aus erneuerbaren Energiequellen für die Erzeugung von erneuerbarem Wasserstoff verwendet wird. Dies setzt voraus, dass die Technologien für erneuerbaren Wasserstoff ausgereift sind und europaweit im großen Maßstab eingesetzt werden.

Erzeugung

Die Erreichung der Ziele der Wasserstoffstrategie setzt eine erhebliche Steigerung der Produktion von Wasserstoff gegenüber dem Status quo voraus. Zu diesem Zweck kündigt die Kommission die Schaffung geeigneter politischer Rahmenbedingungen an. Hierzu zählt die Festlegung neuer Schwellen für CO₂-Emissionen zur Förderung von Wasserstofferzeugungsanlagen.

Zertifizierung

Um einen europaweiten Wasserstoffmarkt zu etablieren, kündigt die Kommission gleichzeitig die Einführung europaweiter Kriterien für die Zertifizierung von erneuerbarem und CO₂-armem Wasserstoff an. Bestehende Wettbewerbsnachteile bei der Erzeugung von erneuerbarem Wasserstoff sollen durch CO₂-Differenzverträge ausgeglichen werden, die sich auch in der Nationalen Wasserstoffstrategie der Bundesregierung finden.

Transport

Die Infrastrukturoptionen für den Transport von Wasserstoff sind vielfältig. Neben dem leitungsgebundenen Transport kommen auch LKW oder Schiffe in Betracht. Wasserstoff kann überdies gasförmig, flüssig

oder beispielsweise als Ammoniak transportiert werden. Vor diesem Hintergrund befürwortet die Kommission für die Entwicklung der Wasserstoffinfrastruktur einen in ihrem Phasenkonzept bereits angelegten schrittweisen Ansatz. So können zum Beispiel Teile des bestehenden Gasnetzes für den Transport von Wasserstoff nach und nach umgewidmet werden.

2.1.1.2. Binnenmarktrichtlinie Gas

Die EU-Kommission hat im Rahmen ihrer Wasserstoffstrategie angekündigt, die Gasrichtlinie 2009/73/EG im Hinblick auf eine Integration von Wasserstoff in das Regelwerk der Richtlinie zu novellieren. Erste Vorschläge hierzu sollen im Laufe des Jahres 2021 vorgelegt werden. Wann eine solche geänderte Richtlinie verabschiedet werden könnte, ist ebenso offen wie die daran anschließende rechtsverbindliche Umsetzung in den Mitgliedstaaten. Bis 2025 dürfte dies wohl dauern. In diesem Zeitraum wird die Novellierung des EnWG mit der Aufnahme zu spezifischen Regelungen für Wasserstoff als Übergangsregelung Bestand haben. Je nach dem Regelungsgehalt der Richtlinie wird der deutsche Gesetzgeber dann bei deren Umsetzung das nationale Regelwerk u.a. im EnWG anpassen müssen.

2.1.1.3. Renewable Energy Directive II

Ziele

Die Richtlinie 2018/2001 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen (RED II) muss bis zum 30. Juni 2021 in nationales Recht umgesetzt werden, wobei Wahl der Form und Mittel den Mitgliedstaaten obliegt. Ziel der Richtlinie ist die Verringerung der CO₂-Emissionen in verschiedenen Sektoren, insbesondere auch dem Verkehrssektor. Der Gesamtanteil der erneuerbaren Energien soll bis 2030 mindestens 32 % betragen. Die RED II schafft allerdings kein gesamteuropäisches Fördersystem, sondern benennt Mindeststandards, die bei Ausgestaltung mitgliedstaatlicher Fördersysteme zu beachten sind.

Für den Verkehrssektor postuliert die Richtlinie das sektorspezifische Ziel der Verpflichtung der Kraftstoffanbieter durch die Mitgliedstaaten, dafür zu sorgen, dass der Anteil erneuerbarer Energien am Endenergieverbrauch des Verkehrssektors bis zum Jahr 2030 mindestens 14 % beträgt.

Umsetzung in deutsches Recht

Die zeitnahe Umsetzung der RED II ist für den Einsatz erneuerbarer Gase im Verkehrssektor und für deren Marktfähigkeit im Verkehrssektor wichtig. Zur Umsetzung der betreffenden Artikel der RED II im Verkehrssektor ist in erster Linie eine Änderung des BImSchG sowie der 37. und 38. BImSchV erforderlich. Eine wichtige Stellschraube für die Umsetzung ist die Treibhausgasminderungsquote.

2.1.1.4. Verordnung zu CO₂ Emissionsnormen

Ein Anreizmechanismus für die Nutzung von Wasserstoff als Kraftstoff im Verkehrssektor besteht durch die privilegierte Anrechnung des Inverkehrbringens emissionsfreier und -armer Fahrzeuge bei der sog. "CO₂-Flottenquote" für Autohersteller. Die aktuelle Regelung ergibt sich aus der Verordnung (EG) Nr. 2019/631 zur Festsetzung von CO₂-Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen und für neue leichte Nutzfahrzeuge.

Flottengrenzwerte

Der Flottengrenzwert für die gesamte EU-Flotte eines Herstellers liegt in den Jahren 2021 bis einschließlich 2024 für neu zugelassene PKW bei 95 g CO₂/km und für leichte Nutzfahrzeuge bei 147 g CO₂/km. Ab dem Jahr 2025 soll eine weitere Minderung von 15 % gegenüber dem Zielwert von 2021 erreicht werden, ab dem Jahr 2030 von 37,5 % für PKW und von 31 % für leichte Nutzfahrzeuge, ebenfalls gegenüber dem Zielwert von 2021 (Art. 1 Abs. 2 bis 5 VO (EU) 2019/631).

Anreize

Besondere Bedeutung haben die Anreize zum Inverkehrbringen emissionsfreier und emissionsarmer Fahrzeuge. Bei der Berechnung der durchschnittlichen spezifischen CO₂-Emissionen zählen PKW mit CO₂-Emissionen von weniger als 50 g CO₂/km mehrfach: Der Verkauf von Null- und Niedrigemissionsfahrzeugen wirkt sich daher stärker auf den CO₂-Flottwert des einzelnen Herstellers aus. Im Jahr 2020 zählte ein neuer emissionsfreier- bzw. emissionsarmer PKW wie zwei PKW, in den Jahren 2021 und 2022 werden entsprechende PKW mit 1,67 und 1,33 gewichtet. Die maximal anrechenbare Einsparung liegt bei 7,5 g CO₂/km je Hersteller (Art. 5 VO (EU) 2019/631). Ab dem Jahr 2023 gibt es keine Mehrfachanrechnungsmöglichkeit der Verordnung mehr.

Ab dem Jahr 2025 wird das System modifiziert: Dabei werden auch leichte Nutzfahrzeuge in den Anreizmechanismus einbezogen. Für den Anteil emissionsfreier und emissionsarmer Fahrzeuge wird ein Schwellenwert eingeführt, der einem Anteil von 15 % an den jeweiligen Flotten neuer PKW bzw. neuer leichter Nutzfahrzeuge entspricht (Art. 1 Abs. 6 VO (EU) 2019/631). Der Anteil erhöht sich im Jahr 2030 auf 35 % für PKW und 30 % für leichte Nutzfahrzeuge (Art. 1 Abs. 7 VO (EU) 2019/631). Für jeden Prozentpunkt, um den ein Hersteller den Schwellenwert überschreitet, erhält er eine Erleichterung seines Flottengrenzwertes um 1 %. Diese Vorgaben können dazu führen, dass künftig deutlich mehr wasserstoffbetriebene Fahrzeuge von den Herstellern in Verkehr gebracht werden.

2.1.1.5. Clean Vehicles Directive

Vorreiter bei der Antriebswende soll der ÖPNV mit Bussen werden. Die rechtliche Grundlage hierfür haben Europäisches Parlament und Rat mit einer Änderung der Richtlinie 2009/33/EG zur Förderung sauberer und energieeffizienter Straßenfahrzeuge gelegt - der Clean Vehicles Directive EU/2019/1161.

"Sauber" / "Emissionsfrei"

In der Richtlinie wird zum einen festgelegt, wann ein Fahrzeug sauber und emissionsfrei ist. Außerdem werden den Mitgliedstaaten Vorgaben gemacht, wie groß der Anteil an sauberen und emissionsfreien Fahrzeugen bei der Fahrzeugbeschaffung im öffentlichen Bereich und bei der Vergabe von Aufträgen im ÖPNV ab Mitte 2021 sein muss. Ein Fahrzeug ist sauber, wenn es alternative Kraftstoffe wie Strom, Wasserstoff, Biokraftstoffe, synthetische und paraffinhaltige Kraftstoffe oder Gas (CNG, LNG, LPG, Biomethan) nutzt. Auch Plug-In Hybridbusse sind sauber. Als emissionsfrei gelten Fahrzeuge, wenn sie keinen Verbrennungsmotor haben – oder der Verbrennungsmotor weniger als 1 g CO₂/km bzw. 1 g CO₂/kWh ausstößt. Da dies faktisch ausgeschlossen ist, sind nur Busse mit reinen Elektroantrieben (Batterie-, Trolley-, Brennstoffzellenbus) emissionsfrei im Sinne der Richtlinie.

Mindestquoten

In der Richtlinie sind Mindestquoten für zwei mehrjährige Perioden festgeschrieben worden. Für Deutschland, Österreich und die meisten westeuropäischen Länder gelten folgende Vorgaben:

- a) In der ersten Periode (2. August 2021 bis 31. Dezember 2025) sollen 45 % der neu zu beschaffenden Fahrzeuge saubere Busse sein, mindestens die Hälfte davon soll einen emissionsfreien Antrieb haben.
- b) In der zweiten Periode (1. Januar 2026 bis 31. Dezember 2030) steigt die Quote für saubere Fahrzeuge auf 65 %, erneut soll mindestens die Hälfte davon emissionsfrei angetrieben werden.
- c) Die Quoten der zweiten Periode gelten über das Jahr 2030 hinaus, sofern keine neuen Quoten beschlossen werden. Es gibt jedoch Ausnahmen: Im Busbereich sind regelmäßig nur Stadtbusse erfasst, Reisebusse bleiben außen vor. Für eigenwirtschaftliche Verkehre gelten die Vorgaben nur, wenn das jeweilige Verkehrsunternehmen als Sektorenauftraggeber anzusehen ist. Die in der Richtlinie genannten Quoten beziehen sich auch nicht auf jeden einzelnen Auftrag, sondern auf den Durchschnitt der vergebenen Aufträge im Mitgliedstaat.

Die Umsetzung der Richtlinie in Deutschland ist derzeit noch nicht abgeschlossen.

2.1.1.6. Zertifizierung für grünen Wasserstoff

Last but not least wird noch auf die Bedeutung der Zertifizierung von grünem Wasserstoff hingewiesen. Zertifizierungssysteme für grünen Wasserstoff sind für den Aufbau sowohl nationaler als auch internationaler Handelssysteme unverzichtbar. Mit der GreenHydrogen-Zertifizierung (TÜV SÜD Standard CMS 70, Version 01/2020 "Erzeugung von grünem Wasserstoff") gibt es in Deutschland bereits einen ersten Ansatz. Mit dem CertifHy-Projekt „Entwicklung des 1. EU-weiten Herkunftsnachweissystems (GO-Systems) für grünen Wasserstoff“ gibt es mittlerweile auch auf europäischer Ebene ein erstes Pilotprojekt. Ziel ist die Entwicklung eines europaweiten Systems für Herkunftsnachweise (voraussichtlich bis Ende 2023).

2.1.2. Deutschland

Abgesehen von der noch nicht beendeten Umsetzung der vorgenannten europäischen Rechtsakte in deutsches Recht ist im Hinblick auf die aktuelle Rechtsentwicklung in Deutschland vor allem die ab dem 01.01.2021 geltende Neufassung des EEG 2021 (hierzu unten F.I.1.) sowie die Novellierung des EnWG hervorzuheben, zu der die Bundesregierung am 10. Februar 2021 einen Gesetzentwurf vorgelegt hat. Bei beiden Gesetzes-Novellen spielt die Aufnahme neuer Regelungen für den Wasserstoff eine wichtige Rolle.

2.1.2.1. Nationale Wasserstoffstrategie

Wie auch im vorstehenden Abschnitt zur EU werden zunächst wesentliche Grundsätze der Nationalen Wasserstoffstrategie dargestellt, die den Entwicklungspfad für den Markthochlauf von Wasserstoff beschreiben.

Marktausblick

Leitbild der im Sommer 2020 vorgelegten Strategie der Bundesregierung ist die Zusammenführung von Versorgungssicherheit, Preisgünstigkeit und Umweltverträglichkeit mit innovativem und intelligentem Klimaschutz. Vor diesem Hintergrund wird Wasserstoff eine Schlüsselrolle bei der Durchführung der Energiewende zugeschrieben. Allerdings wird dauerhaft nur der Einsatz von grünem Wasserstoff als zielführend angesehen.

Die Bundesregierung erwartet für 2030 eine Nachfrage nach Wasserstoff zwischen 90 und 110 TWh. Um diesen Bedarf zumindest teilweise decken zu können, sollen bis zu 5 GW Erzeugungskapazität geschaffen werden. Hierzu werden Erzeugungsanlagen auf Land sowie auf See als erforderlich angesehen. Dies entspricht einer Produktion von grünem Wasserstoff von bis zu 14 TWh und einer benötigten erneuerbaren Strommenge von bis zu 20 TWh. Weitere 5 GW Erzeugungskapazität sollen bis 2035, spätestens 2040 installiert werden.

Erzeugung

Um Wasserstoff langfristig am Markt zu etablieren, sind die Erzeugungskapazitäten für erneuerbaren Strom insbesondere aus Windkraft und Fotovoltaik systematisch weiterzuentwickeln. Die Einführung einer CO₂-Bepreisung für fossile Energien im Mobilitätsbereich sowie im Wärmemarkt stellt einen wichtigen Beitrag zur Unterstützung der Erzeugung von grünem Wasserstoff dar. Die hieraus resultierende Kostenbelastung wird durch eine Befreiung des zur Herstellung von grünem Wasserstoff verwendeten Stroms von der EEG-Umlage durch das EEG 2021 kompensiert.

Einsatz in den Verbrauchssektoren

Die Strategie identifiziert den Industriesektor als wesentlichen Treiber für den Markthochlauf von Wasserstoff sowie die Weiterentwicklung der Wasserstofftechnologie. Aber auch im Bereich der Mobilitätsanwendungen wird Wasserstoff ein hohes Potenzial zugeschrieben. Wasserstoffbasierte oder auf Power-to-Gas setzende Mobilität stellt eine geeignete Alternative für die Anwendungen dar, in denen batterieelektrische Mobilität entweder nicht zielführend oder technisch nicht sinnvoll umsetzbar ist. Besonderes Augenmerk wird auf einen bedarfsgerechten Ausbau des Wasserstofftankstellennetzes gelegt. Eher langfristiges Potenzial wird im Luftverkehr und im maritimen Sektor gesehen. Dort wird der Bedarf für klimaneutrale Kraftstoffe zunehmen, die auf der Basis von Wasserstoff oder Power-to-Gas bereitgestellt werden können. Im Luftverkehr sowie im küstennahen und Binnenschiffsverkehr können sowohl Brennstoffzellen als auch batterieelektrische Antriebe eine Option für bestimmte Anwendungsbereiche sein.

2.1.2.2. Energierecht; bisher geltendes EnWG

Im geltenden Recht existiert kein konsistentes und umfassendes Regelungssystem für Wasserstoff. In der Praxis spielte Wasserstoff bislang fast ausschließlich im Rahmen von industriellen Anwendungen eine Rolle. Die wenigen existierenden reinen Wasserstoffleitungen sind industrielle Produktleitungen ohne Verbindung zum öffentlichen Gasleitungsnetz. Da das EnWG nur leitungsgebundene Energieinfrastruktur in Bezug auf das öffentliche Leitungsnetz reguliert, weist das EnWG in der geltenden Fassung keine bzw. nur sehr eingeschränkte Relevanz für das vorliegende Projekt auf.

Mit dem Aufkommen der Diskussion um die Elektrolyse und Power-to-Gas hat der Gesetzgeber die Gasdefinition EnWG dahingehend geändert, dass auch durch Wasserelektrolyse erzeugter Wasserstoff als Gas anzusehen ist. Da viele Definitionen des EnWG aber an den Begriff Erdgas anknüpfen und Wasserstoff nicht darunterfällt, ist Wasserstoff nur ansatzweise und keineswegs konsistent in den Anwendungsbereich des geltenden EnWG integriert. Dies soll sich nun mit der angekündigten Novelle des EnWG ändern.

2.1.2.3. Novellierung EnWG

Mit dem von der Bundesregierung vorgelegten Gesetzentwurf für eine Novellierung des EnWG (EnWG/E) soll der energierechtliche Rahmen für den Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft weiterentwickelt werden. Dies gilt zuvorderst für die Wasserstoffnetze, aber auch für die Frage der Eigenschaft als Energieversorger im Sinne des EnWG.

Definition von Energie

Die Definition von Energie in § 3 Nr. 14 EnWG/E umfasst jetzt neben Gas ausdrücklich auch Wasserstoff. Damit ist zum einen klargestellt, dass der Gesetzgeber zwischen Gas und Wasserstoff (jedenfalls im Hinblick auf reine Wasserstoffnetze) differenziert. Zum anderen bedeutet dies, dass alle Regelungen des EnWG, die auf den Begriff der „Energie“ abstellen, künftig auch auf Wasserstoff Anwendung finden (zumindest im Grundsatz, wenn die betreffende Regelung nicht Einschränkungen enthält, die Wasserstoff ausschließen). Dies kann zum Beispiel relevant werden im Zusammenhang mit der Energiebelieferung, die Energieversorgungsunternehmen gemäß § 5 EnWG anzeigen müssen.

Wasserstoffnetze

§ 3 Nr. 39a EnWG/E enthält nunmehr eine Definition des Wasserstoffnetzes. Danach handelt es sich um ein Netz zur Versorgung von Kunden mit Wasserstoff, das von der Dimensionierung nicht von vornherein nur auf die Versorgung bestimmter, schon bei der Netzerrichtung feststehender oder bestimmbarer Kunden ausgelegt ist, sondern grundsätzlich für die Versorgung jedes Kunden offensteht.

Reine Industrieleitungen, die auf die Versorgung einzelner Produktionsanlagen ausgerichtet sind, oder Verbindungsleitungen z.B. zwischen einer Anlage zur Erzeugung erneuerbarer Energien und einem Elektrolyseur wären danach vom Anwendungsbereich des EnWG von vornherein ausgeschlossen.

Regulierung der Wasserstoffnetze

Nach § 28j EnWG/E haben Betreiber von Wasserstoffleitungen ein einmaliges Wahlrecht, ob ihre Leitungen unreguliert sein bzw. bleiben oder ob sie der neu eingeführten Netzregulierung für Wasserstoffleitungen unterfallen sollen. Entscheidet sich der Netzbetreiber für den unregulierten Bereich, finden die Vorschriften des EnWG, soweit diese für Wasserstoffleitungen gelten, keine Anwendung. Entscheidet sich der Betreiber dagegen für die Regulierung, findet das Prinzip des verhandelten Netzzugangs sowie der kostenregulierten Entgelte (ohne Anwendung der Anreizregulierungsverordnung) Anwendung. So weit, wie oben vorstehend unter b) dargestellt, Verbindungsleitungen schon von der Definition her gar nicht vom Anwendungsbereich des EnWG erfasst würden, wäre auch das Wahlrecht gegenstandslos.

Grundsatz der leitungsgebundenen Energieversorgung

Der vorgelegte Entwurf einer Novellierung des EnWG ändert aber nichts an dem Grundsatz, dass das EnWG ausschließlich auf die leitungsgebundene Versorgung von Kunden mit Energie Anwendung findet. Soweit keine leitungsgebundene Versorgung stattfindet, ist das Energierecht in Gestalt des EnWG mithin nicht einschlägig.

Es wird daher auf diesen Grundsatz hingewiesen, weil vielfach die Meinung besteht, dass das EnWG generell auf Wasserstoff Anwendung finden müsse, da Wasserstoff doch ein Energieträger sei. Dies trifft – auch bei Berücksichtigung der noch nicht in Kraft getretenen Novellierung des EnWG – nur dann zu, wenn Dritte leitungsgebunden mit Wasserstoff versorgt werden sollen. Die Definition in § 3 Nr. 39a EnWG /E stellt überdies für den künftigen Rechtsrahmen auch für Wasserstoff klar, dass die Leitungsgebundenheit, die das EnWG voraussetzt, nur dann gegeben ist, wenn Leitungen genutzt werden, die grundsätzlich für die Versorgung jedes Kunden offenstehen. Leitungen dagegen, die nur auf die Versorgung bestimmter, schon bei der Netzerrichtung feststehender oder bestimmbarer Kunden ausgelegt sind, unterfallen nicht dem EnWG.

2.2. Anwendbarer Rechtsrahmen

Hinsichtlich des anwendbaren Rechtsrahmens ist zunächst zu konstatieren, dass ein spezifisch auf die Wasserstoffwirtschaft bezogener Rechtsrahmen bislang nicht existiert. Zwar gibt es verschiedene normative Rahmenvorgaben, jedoch bis dato noch keine spezifisch auf den Wasserstoffbereich bezogenen Rechtsvorschriften im Hinblick auf konkrete Projekte wie das MH2Regio-Projekt, welche sich auf Erzeugung, Transport und Verbrauch von Wasserstoff beziehen.

Nichtsdestotrotz existieren unterschiedliche Regelungsregime, auf deren Basis das vorliegend projektierte Wasserstoffprojekt genehmigt und umgesetzt werden kann und welche, in Zusammenschau, den vorliegend konkret anwendbaren Rechtsrahmen bilden.

Insbesondere sind zu nennen:

- das Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) und einschlägige Bundesimmissionsschutzverordnungen (BImSchV) hinsichtlich des Genehmigungsverfahrens für die Elektrolyseanlage samt Nebenanlagen;
- die einschlägigen bau-, planungs- und umweltrechtlichen Rechtsvorschriften, die im Zuge des BImSchG-Genehmigungsverfahrens zu prüfen sind;
- sicherheitsrechtliche Gesetze und Verordnungen, die bei der Bewirtschaftung von Wasserstoff über die gesamte Wertschöpfungskette hinweg – Produktion, Lagerung, Transport und Verbrauch – insbesondere unter dem Aspekt des Explosionsschutzes zu beachten sind;
- Das Energiewirtschaftsgesetz (EnWG) in der bislang geltenden Fassung weist hingegen nur einen sehr eingeschränkt anwendbaren Regelungsrahmen auf; es gilt nur sehr eingeschränkt für Wasserstoff und darüber hinaus im Wesentlichen nur für Leitungen als Bestandteil öffentlicher Netze, die im vorliegenden Projekt nach unserem Kenntnisstand derzeit keine tragende Rolle spielen. Allerdings befindet sich eine Neufassung des EnWG im Gesetzgebungsverfahren - Inkrafttreten ggf. bereits im 2. Quartal 2021 –, welches auch wasserstoffbezogene Regelungsbereiche enthalten soll; allerdings dürfte auch dies nichts an der grundsätzlichen Nichtanwendbarkeit des EnWG außerhalb von öffentlichen Leitungsnetzen ändern;

2.3. Erzeugung

2.3.1. Elektrolyseanlage

Die Errichtung und der Betrieb der geplanten Elektrolyseanlage unterliegen der Genehmigungspflicht nach dem Bundesimmissionsschutz (BImSchG). Aller Voraussicht nach ist ein förmliches Genehmigungsverfahren nach § 10 BImSchG einschließlich der hier vorgesehenen Öffentlichkeitsbeteiligung durchzuführen.

Die Voraussetzungen für ein vereinfachtes Genehmigungsverfahren dürften nicht vorliegen, insbesondere weil es sich wohl nicht um eine (reine) Versuchsanlage im Sinne der 4. BImSchV handelt und zudem auf diesem Wege nur eine befristete Genehmigung erreichbar wäre. Insoweit empfiehlt sich aber unter Berücksichtigung der konkreten Ausgestaltung der Anlage eine weitere interne Abstimmung sowie mit den Genehmigungsbehörden.

Wir gehen davon aus, dass es sich bei dem geplanten Elektrolyseur in immissionsschutzrechtlicher Hinsicht nicht um eine bloße Nebenanlage zum MHKW handelt, denn hierfür fehlt es mit Blick auf die Zweckbestimmung der Elektrolyseanlage bereits an der erforderlichen dienenden Funktion des Elektrolyseurs

gegenüber dem MHKW. Dies hat zur Folge, dass für die Elektrolyseanlage ein eigenständiges Genehmigungsverfahren – und nicht lediglich ein Änderungs genehmigungsverfahren in Bezug auf das MHKW – durchzuführen ist.

Das immissionsschutzrechtliche Genehmigungsverfahren ist umfassender Natur. Es schließt nicht nur die spezifischen immissionsschutzrechtlichen Aspekte ein; zum Prüfumfang gehören vielmehr auch sämtliche baurechtlichen Anforderungen – d.h. die BImSchG-Genehmigung schließt auch die baurechtliche Zulassung ein – sowie eine Reihe von umweltschutzbezogenen Anforderungen mit Ausnahme wasserrechtlicher Erlaubnisse (sog. formelle Konzentrationswirkung). Zum vorliegend relevanten Prüfumfang gehören insbesondere:

- Beachtung immissionsschutzrechtlicher Anforderungen im engeren Sinne
- Beachtung der bauplanungsrechtlichen Anforderungen (insbesondere Berücksichtigung der vorhandenen Bebauungspläne und übergeordneter Plangrundlagen) und der weiteren planungsrechtlichen Vorgaben (insbesondere §§ 30 bis 35 BauGB und BauNVO).

Unüberwindbare Hindernisse planungs- und immissionsschutzrechtlicher Art sind dabei nicht erkennbar, auch da die neuen wasserstoffbezogenen Anlagen nicht isoliert errichtet werden, sondern funktional an die vorhandene MHKW-Anlage anknüpfen. Diese beruht, wie angenommen werden kann, auf einer bestandskräftigen BImSchG-Genehmigung und befindet sich in einem rechtskräftigen, als Gewerbegebiet ausgewiesenen Bebauungsplan. Von der Elektrolyseanlage dürften insoweit – namentlich was Abgasemissionen betrifft – kaum erhebliche Zusatzbelastungen ausgehen, die einer Genehmigungsfähigkeit entgegenstehen.

- Beachtung der Vorschriften über die Umweltverträglichkeitsprüfung (zunächst die allgemeine Vorprüfungspflicht nach UVPG).
- Besonderes Augenmerk verdient die ggf. vorzunehmende Einordnung als Störfallbetrieb, für die bestimmte Schwellenwerte relevant sind (ab einer Vorhaltung von 5 Tonnen Wasserstoff erfolgt eine Einordnung als Störfallbetrieb; ab 50 Tonnen als Störfallbetrieb der oberen Klasse). Aus der Einordnung als Störfallbetrieb ergeben sich sowohl planungsrechtlich – etwa in Bezug auf das Abstandsgebot zu Wohngebieten – als auch betriebsbezogen qualifizierte Anforderungen, die bei der weiteren Planung und Dimensionierung der Anlage zu berücksichtigen sind. Zu empfehlen ist angesichts der nahegelegenen Wohnbebauung, eine Einordnung als Störfallbetrieb zu vermeiden, mithin die Anlage nach Möglichkeit deutlich < 5 Tonnen Wasserstoffvorhaltung zu dimensionieren.
- Je nach technischer Ausgestaltung und Dimensionierung des Elektrolyseurs kann es sich bei diesem weiterhin um eine überwachungsbedürftige Anlage im Sinne der Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV) handeln, woraus sich besondere Prüfpflichten und ggf. auch eine spezielle Erlaubnispflicht nach § 18 BetrSichV ergeben können.
- Aufgrund der gefahrstoffrechtlichen Einordnung von Wasserstoff als extrem entzündliches Gas (gemäß europäischer CLP-Verordnung) ergeben sich für den Betreiber der geplanten Elektrolyseanlage zudem diverse Pflichten aus der Gefahrstoffverordnung (GefStoffV) sowie auch insoweit aus der BetrSichV. Insbesondere bedarf es insoweit einer vorab zu erstellenden, präventiven Gefährdungsbeurteilung nach § 6 GefStoffV.

2.3.2. Pufferspeicher und Abfüllanlage

In Bezug auf den geplanten Pufferspeicher und die Abfüllanlage dürfte es sich um Nebeneinrichtungen zum Elektrolyseur handeln, da diese Einrichtungen dem Betrieb der Elektrolyseanlage an dem betroffenen Standort i.S.v. § 1 Abs. 2 der 4. BImSchV dienen. Diese Beurteilung sollte – generell wie sämtliche wertungsbezogenen Einordnungen – frühzeitig mit den Genehmigungsbehörden abgestimmt werden.

Dem folgend sind auch die weiteren regulatorischen Anforderungen (beispielsweise UVP-Vorprüfungspflicht, Einordnung als Störfallbetrieb usw.) im Kontext der eigentlichen Elektrolyseanlage zu prüfen und zu genehmigen sowie die genannten Anforderungen auch insoweit zu beachten. Sollte wider Erwarten für Pufferspeicher- und Abfüllanlage ein separates Genehmigungsverfahren durchgeführt werden müssen, sind die diesbezüglichen Grenzwerte, wie im Hauptteil näher beschrieben, zu beachten.

Sowohl Pufferspeicher als auch Abfüllanlage dürften zudem jeweils als überwachungsbedürftige Anlagen i.S.d. BetrSichV zu qualifizieren sein, so dass hierfür insbesondere die besonderen Prüfpflichten der §§ 15 bis 17 BetrSichV einschlägig wären. Für die Abfüllanlage dürfte zudem – übersteigt die Füllkapazität der ortsbeweglichen Druckgeräte 10 kg pro Stunde – eine separate Erlaubnispflicht nach § 18 BetrSichV bestehen, die jedoch im Rahmen des BImSchG-Genehmigungsverfahrens mit geprüft werden würde.

2.4. Transport/Lagerung: Zentrale Speicherung und Verteilung

2.4.1. Transport per LKW

Für den per LKW vorgesehenen Transport des erzeugten Wasserstoffs vom Elektrolyseur zum Distributionsstützpunkt gelten zum einen die europäischen und nationalen Anforderungen an die Beförderung von gefährlichen Gütern (insbesondere europäisches ADR-Abkommen, Gefahrgutbeförderungsgesetz – GGBefG, Gefahrgutverordnung Straße, Eisenbahn und Binnenschifffahrt – GGVSEB) sowie die Anforderungen an die Verwendung bestimmter zertifizierter Behältnisse (insbesondere EU-Richtlinie für ortsbewegliche Druckgeräte – TPED, Ortsbewegliche-Druckgeräte-Verordnung – ODV), zum anderen die Vorgaben nach der Straßenverkehrszulassungsverordnung.

2.4.2. Lagerung (sofern Leitungsanbindung)

Sollte im Fall einer Leitungsanbindung des Elektrolyseurs an den Distributionsstützpunkt die Lagerung des Wasserstoffs in einem fest installierten Speichertank am Distributionsstützpunkt vorgesehen sein, läge eine BImSchG-Genehmigungspflicht für den Speichertank ab einer Lagerkapazität von 3 Tonnen Wasserstoff vor. Das vereinfachte Genehmigungsverfahren nach § 19 BImSchG wäre bis zu einer Lagermenge von weniger als 30 Tonnen Wasserstoff durchzuführen, ab einer Speichermenge von 30 Tonnen Wasserstoff wäre ein förmliches Genehmigungsverfahren nach § 10 BImSchG erforderlich.

Die zu beachtenden UVP-Schwellen wären ebenfalls ab einer Wasserstoff-Lagerkapazität von 3 Tonnen überschritten (3 Tonnen bis weniger als 30 Tonnen: Pflicht zur standortbezogenen Vorprüfung; ab 30 Tonnen bis weniger als 200.000 Tonnen: Pflicht zur allgemeinen Vorprüfung; ab einer Wasserstoff-Lagerkapazität von 200.000 Tonnen oder mehr: unbedingte UVP-Pflicht).

Hinsichtlich der Einordnung des Speichertanks als Störfallbetrieb gelten die bereits oben für den Elektrolyseur genannten Schwellenwerte.

Der geplante Speichertank dürfte zudem eine überwachungsbedürftige Anlage i.S.d. BetrSichV darstellen, so dass hierfür insbesondere die besonderen Prüfpflichten der §§ 15 bis 17 BetrSichV (u.a. Prüfungen vor Inbetriebnahme und wiederkehrende Prüfungen) einschlägig wären.

Der für den Elektrolyseur einschlägige gefahrstoffrechtliche Rechtsrahmen (insbesondere nach der GefStoffV) ist auf den Speichertank übertragbar.

2.4.3. Option: Direkte Leitungsanbindung des Distributionsstützpunkts an die Erzeugung am MHKW

Es wird davon ausgegangen, dass nach geltendem Recht für eine optionale Leitung zwischen Elektrolyseur und Distributionsstützpunkt keine Planfeststellung nach § 43 EnWG erforderlich wäre, da es sich bei der Leitung um eine nicht vom Anwendungsbereich des EnWG erfasste Direktleitung handeln würde. Auch nach dem Entwurf der EnWG-Novelle dürfte es sich bei der Leitung nicht um ein Wasserstoffnetz i.S.v. § 3 Nr. 39a EnWG handeln, da die Leitung zur Versorgung bestimmter, nicht aber aller Kunden, konzipiert ist.

In Abhängigkeit von Länge und Durchmesser kann sich für die Errichtung und den Betrieb der Leitung zum Transport von Wasserstoff eine Pflicht zur Durchführung einer Umweltverträglichkeitsprüfung nach dem Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG) ergeben. Dann bedarf die Leitung einer Planfeststellung mit Öffentlichkeitsbeteiligung nach § 65 UVPG.

Gem. § 65 Abs. 1 UVPG bedürfen Vorhaben, die in der Anlage 1 zum UVPG unter den Nr. 19.3 bis 19.9 aufgeführt sind, einer Planfeststellung, sofern dafür nach den §§ 6-14 UVPG eine Verpflichtung zur Durchführung einer UVP besteht.

Da im vorliegenden Fall eine Leitungsanbindung des Distributionsstützpunktes nur für den Fall einer kurzen Distanz bis 5 km vorgesehen ist, dürfte lediglich eine standortbezogene Vorprüfungspflicht bestehen. Sofern im Ergebnis der Vorprüfung die UVP-Pflicht festgestellt werden sollte, bedarf die Leitung einer Planfeststellung mit Öffentlichkeitsbeteiligung nach § 65 Abs. 1 UVPG. Wenn im Ergebnis der Vorprüfung keine UVP-Pflicht besteht, ist eine Plangenehmigung nach § 65 Abs. 2 UVPG einzuholen.

Die Planfeststellung und die Plangenehmigung haben Konzentrationswirkung und schließen alle weiteren öffentlich-rechtlichen Zulassungen ein. Ausgenommen von der Konzentrationswirkung sind wasserrechtliche Erlaubnisse (z.B. für ggf. erforderliche Wasserhaltungen), die aber gemäß § 19 Abs. 1 WHG zusammen mit der Planfeststellung erteilt werden.

Sofern mangels Erreichens der Prüfwerte (hier: Durchmesser) keine Vorprüfungspflicht besteht, liegt nach § 65 Abs. 2 Satz 2 UVPG ein Fall unwesentlicher Bedeutung vor und die Plangenehmigungspflicht entfällt. Sofern die Transportleitung schon keine Rohrleitungsanlage im Sinne der Nr. 19.3 bis 19.8 darstellen sollte (z.B., weil sie den Bereich des Werksgeländes nicht überschreitet), besteht ebenfalls keine Genehmigungspflicht nach § 65 Abs. 2 UVPG. In diesem Fall müssen sämtliche, ggf. erforderlichen Einzelgenehmigungen gesondert eingeholt werden.

Besteht keine Vorprüfungspflicht nach UVPG und wird die Rohrleitung mit einem Überdruck von mehr als 1 Bar betrieben, muss die Leitung nach § 4a RohrFltgV angezeigt werden. Mit der Errichtung darf erst nach Ablauf der achtwöchigen Frist, bei einer Beanstandung erst nach Behebung des Mangels begonnen werden. Über den Wortlaut des § 4a RohrFltgV hinaus, hat die zuständige Behörde im Anzeigeverfahren

auch die Vorgaben der Eingriffsregelung nach §§ 14 ff. BNatSchG zu prüfen. Ist die Leitung nicht anzeigepflichtig, ist ein isoliertes Eingriffszulassungsverfahren durchzuführen.

2.5. Abgabe/Verbrauch

2.5.1. Tankstellenkonzept

Für die Errichtung und den Betrieb einer sogenannten Liefertankstelle (ohne Produktion vor Ort) kann aufgrund der H₂ Lagermenge eine Genehmigung nach dem BImSchG erforderlich werden. Ab einer Lagermenge von 3 Tonnen Wasserstoff muss zumindest ein vereinfachtes BImSchG Verfahren durchgeführt werden. Sollen mehr als 30 Tonnen Wasserstoff gelagert werden, wäre sogar ein förmliches Genehmigungsverfahren nach § 10 BImSchG (Vollgenehmigungsverfahren) durchzuführen, das u.a. eine Öffentlichkeitsbeteiligung umfasst. Je nach Lagermenge ist eine Umweltverträglichkeitsprüfung (ab 200.000 Tonnen) bzw. eine allgemeine (ab 30 Tonnen) oder standortbezogene (ab 3 Tonnen) Vorprüfung durchzuführen.

Die BImSchG-Genehmigung hat Konzentrationswirkung und schließt die ggf. weiteren erforderlichen Genehmigungen ein, insbesondere die Genehmigung nach § 18 BetrSichV und eine ggf. erforderliche Baugenehmigung. Ansonsten sind diese isoliert einzuholen.

2.5.2. Option: Direkte Anbindung des Elektrolyseurs an die Tankstelle

Je nach Erzeugungspositionierung wird die Leitung nicht länger als 50 m werden, Durchmesser wird in Abhängigkeit vom Druckniveau und Bedarfsauslegung der Tankstelle dimensioniert, mit hoher Wahrscheinlichkeit aber nicht größer als 300 mm. Damit bedarf sie weder einer Planfeststellung noch Plangenehmigung nach § 65 UVPG. Sofern die Leitung mit einem Überdruck von mehr als 1 Bar betrieben wird, muss die Leitung nach § 4a RohrFItgV angezeigt werden. In dem Anzeigeverfahren hat die zuständige Behörde auch die Vorgaben der Eingriffsregelung nach §§ 14 ff. BNatSchG zu prüfen. Ansonsten sind eine isolierte Eingriffszulassung nach § 17 BNatSchG sowie ggf. weitere Einzelgenehmigungen erforderlich.

2.6. Zusammenfassende Darstellung von grenzwertgebenden Parametern

Im Folgenden sollen noch einmal die wesentlichen grenzwertbezogenen Parameter zusammengefasst werden als wesentliche Weichenstellungen für das Projekt:

- Einordnung als Störfallbetrieb: ab Vorhaltung von 5 Tonnen Wasserstoff auf dem Betriebsgelände
- BImSchG-Genehmigungspflicht für den separaten Speichertank am Distributionsstützpunkt: ab einer Lagerkapazität von 3 Tonnen Wasserstoff (Hinweis: Grenzwert voraussichtlich nur maßgeblich für den ggf. am Distributionsstützpunkt installierten Speichertank bei der Option "Direkte Leitungsanbindung des Elektrolyseurs an den Distributionsstützpunkt", siehe oben 2.4.3)
- UVP-Vorprüfungspflicht für den separaten Speichertank am Distributionsstützpunkt: ab einer Wasserstoff-Lagerkapazität von 3 Tonnen (Hinweis: Grenzwert voraussichtlich nur maßgeblich

für den ggf. am Distributionsstützpunkt installierten Speichertank bei der Option "Direkte Leitungsanbindung des Elektrolyseurs an den Distributionsstützpunkt", siehe oben 2.4.3)

2.7. Steuern, Abgaben und Umlagen

Eine Begrenzung der EEG-Umlage nach § 64a EEG 2021 ist im vorliegenden Fall grundsätzlich möglich. Auch eine Befreiung von der EEG-Umlage nach § 69b EEG 2021 erscheint denkbar. Weil die Vorschrift aber noch der Konkretisierung durch eine Verordnung bedarf (voraussichtlich Mitte 2021) und vorher nicht anwendbar ist, kann dies derzeit noch nicht belastbar geprüft werden.

Auch eine Befreiung von der EEG-Umlage nach der bestehenden Regelung in § 61a EEG ist vorliegend grundsätzlich denkbar. Das Ergebnis hängt von der konkreten Ausgestaltung des Projektes ab (Eigenverbrauchskonstellation) und lässt sich aus unserer Sicht derzeit nicht abschließend beurteilen. Auch eine Bewertung im Verhältnis zu der neu eingeführten Befreiungsmöglichkeit nach § 69a EEG 2021 ist mangels Vorliegens der zur Ausfüllung dieser Norm erforderlichen Verordnung, die Rechtsklarheit schaffen soll, nicht möglich.

Im Grundsatz kann eine Entlastung von der Stromsteuer für den bei der Elektrolyse verbrauchten Strom gemäß § 9a StromStG in Betracht kommen. Nicht abschließend geklärt ist aber die Frage, ob vorliegend die Anspruchsvoraussetzung eines Unternehmens des produzierenden Gewerbes gegeben wäre. Wir empfehlen, diese Frage mit den Zollbehörden abzuklären.

Netzentgelte sowie weitere Netzentgeltbestandteile (KWK-Umlage, Offshore-Netzumlage, AbLaV-Umlage, StromNEV-Umlage, Konzessionsabgaben) fallen nach unserer Kenntnis der Projektplanung nicht an, da die Nutzung des öffentlichen Stromnetzes nicht geplant ist. Eventuelle Befreiungstatbestände spielen deshalb vorliegend keine Rolle.

3. Umfeldanalyse

Die Umfeldanalyse sollte die für die Nutzung von Wasserstoff relevanten Marktfelder (Projekte, Akteure, Potentiale, Zielkunden in Logistik und ÖPNV) sowie das Schwerlastverkehrsaufkommen im Rhein-Main-Gebiet erforschen. Hiermit soll die gesamtheitliche Konzeption der Infrastruktur in Los 1, insbesondere die optimale Standortbestimmung von potenziellen öffentlichen Wasserstofftankstellen für den Schwerlastverkehr, unterstützt werden.

Die räumliche Untersuchung begrenzt sich in der Fläche zwischen Wiesbaden, Rüsselsheim, Darmstadt, Hanau und Bad Homburg. Die Ergebnisse der einzelnen Arbeitsschritte wurden in eine uMap integriert und auf verschiedenen ein- und ausblendbaren Layer gelegt. Die Marktaktivitäten und -potenziale sind von den übrigen Projektergebnissen in der Visualisierung getrennt worden.

3.1. Marktaktivitäten und -potenziale

3.1.1. Quellensichtung und Aufbau der Datengrundlage

Für den Aufbau einer Datengrundlage wurden im ersten Schritt ausgewählte Quellen vollständig systematisch gesichtet. Diese Quellen lassen sich unterteilen in Pressequellen und Webseiten der öffentlichen Projekt- bzw. Förderträger. Als wichtige Pressequelle ist an dieser Stelle die H2BZ-Initiative des Landes Hessen aufzuführen, die seit Ende 2016 über Aktuelles bezüglich Wasserstoffaktivitäten im Land Hessen berichtet. Wichtige Webseiten der öffentlichen Projekt- und Förderträger beinhalten beispielsweise die NOW GmbH, die Innovationsförderung Hessen sowie den Projektträger Jülich (PtJ). Zusätzlich wurden themenspezifische Quellen wie *powertogas.info* und *cleanpowernet.de* ausgewertet. Ergänzt wurde die oben beschriebene Quellensichtung durch eine Webrecherche unter Verwendung der Suchbegriffe „Wasserstoff“, „Brennstoffzelle“ in Verbindung mit der regionalen Abgrenzung „Hessen“, „Rhein-Main-Gebiet“ und „Frankfurt“. Eine europa- bzw. weltweite Übersicht der Wasserstofftankstellen ist auf den Webseiten *h2.live* und *h2stations.org* zu finden.

In einem ersten Schritt wurden grundlegende Informationen zu Wasserstoffaktivitäten mit einem Bezug zur Rhein-Main-Region aus den genannten Quellen in eine tabellarische Übersicht aufgenommen. Anschließend wurden detailliertere Informationen zu den aufgelisteten Projekt- und Marktaktivitäten durch gezielte Webrecherche generiert. Ausführliche Projektbeschreibungen sind vor allem auf den Webseiten der Projekt- bzw. Förderträger und der Projektbeteiligten zu finden.

Während der gesamten Recherche wurde die räumliche Abgrenzung zunächst weiter gefasst als vorab definiert, um sicherzustellen, dass keine relevanten Projekte mit Bezug zur Rhein-Main-Region ausgeschlossen werden. Projekte und Marktaktivitäten mit Projektbeteiligten aus der Region, deren Standort außerhalb dieser Fläche lag, wurden, falls sinnvoll, an dem Standort des Projektbeteiligten in der Region verortet.

Die Daten wurden in folgender Datei hinterlegt:

[MH2Regio_AP3.1_Wasserstoffaktivitäten.xlsx](#)

3.1.2. Aufbereitung und Darstellung im Excel-Dokument

Im Excel-Sheet „1-Marktaktivitäten und Projekte“ wurden zu jeder Aktivität aus der Quellensichtung alle verfügbaren und relevanten Informationen in den Spalten aufgelistet und eingeordnet. Dies beinhaltete allgemeine Informationen wie z.B. Initiatoren, Partner, Zeitraum, Ort sowie eine Projektbeschreibung als auch Informationen über das Projektvolumen, die Finanzierung und gegebenenfalls Förderdetails. Zusätzlich wurden Abhängigkeiten zwischen einzelnen Projekten in der Tabelle abgebildet. Zudem wurden die Aktivitäten mit den Kategorien Status, Aktivitätstyp und dem Technology-Readiness-Level (TRL) klassifiziert. Des Weiteren wurde jede Aktivität entlang der Wertschöpfungskette in den Punkten Erzeugung, Logistik und Verbrauch eingeordnet. Durch diese Kategorisierungen konnte im Excel-Sheet und auch in den Projektsteckbriefen eine übersichtliche Darstellung und Einordnung generiert werden.

Die Informationen wurden in die folgenden Gruppen, d.h. gruppierte Spalten, unterteilt, welche durch Ein- und Ausblenden die Informationstiefe festlegen und somit eine Übersicht ermöglichen:

» **Gruppe 1: Allgemeine Informationen**

- › ID
- › Name
- › Kurztitel
- › Initiatoren
- › Partner
- › Kurzbeschreibung
- › Ausführliche Beschreibung
- › Beschreibung Projektsteckbrief
- › Technische Daten

» **Gruppe 2: Projektklassifikation**

- › Status (Ausprägungen: in Planung, laufend, abgeschlossen, in Betrieb, abgebrochen)
- › Aktivitätstyp (Ausprägungen: Projekt oder Marktaktivität)
- › TRL (Ausprägungen: Grundlagenforschung, Demonstrator, Machbarkeitsstudie, Konzeptionierung, Umsetzungsphase)
- › Erzeugung
- › Logistik
- › Verbrauch

» **Gruppe 3: Ort**

- › Region
- › Adresse
- › Breitengrad
- › Längengrad

» **Gruppe 4: Finanzierung**

- › Projektvolumen
- › Anteil Förderung
- › Förderprogramm
- › Förderträger
- › Finanzierungsdetails

» **Gruppe 5: Abhängigkeiten zwischen Projekten**

- › Abhängiges Projekt
- › Art der Abhängigkeit

» **Gruppe 6: Weitere Informationen**

- › Projektwebseite
- › Weitere Quellen

Die Bestimmung der Ausprägung einzelner Informationsspalten wird im Ergebnisbericht Umfeldanalyse näher beschrieben.

In einem separaten Excel-Sheet „**2-Tankstellen**“ wurden alle öffentlichen und privaten Pkw- und Lkw-Wasserstofftankstellen im Rhein-Main-Gebiet aufgelistet. Neben dem Standort und Betriebsstatus wurden hier auch Informationen zu Betreibern und technische Daten zum Tankvorgang (Fahrzeugtypen, Wasserstoffdruck) sowie ggf. Finanzierungs- oder Projektdetails aufgenommen.

Zudem wurden die Erzeuger von Wasserstoff im Rhein-Main-Gebiet im Excel-Sheet „**3-Erzeuger**“ aufgelistet. Anlagen, die nicht öffentlich zugänglich oder außer Betrieb waren, wurden in der uMap mit einem grauen Symbol gekennzeichnet.

Die analysierten Quellen zur Identifikation von Marktaktivitäten, Projekten und Tankstellen im Rhein-Main-Gebiet wurden im Sheet „**4-Quellen**“ aufgelistet.

3.1.3. Projektsteckbriefe

Die automatische Erstellung von Steckbriefen zu den Projekt- und Marktaktivitäten in MS Word bzw. MS PowerPoint erfolgte auf Basis der Design-Vorgaben des Projektes (Abschnitt 3.4. Öffentlichkeitsarbeit). Hierzu wurden die Marktaktivitäten und Projekte jeweils als einseitige DIN-A4-Seite unter Zuhilfenahme von grafischen Elementen aufbereitet. Die Projektsteckbriefe werden so generiert, dass diese als Einzelseiten oder als Gesamtdokument genutzt werden können.

Die gesamten Projektsteckbriefe wurden in folgender Datei hinterlegt:

[MH2Regio_AP3.1_Projektsteckbriefe.pdf](#)

3.1.4. Integration in die uMap

Zur Erstellung einer Übersichtskarte der regionalen Marktaktivitäten und Projekte sowie der Wasserstofftankstellen, welche im Excel-Dokument aufgelistet sind, wurde das Kartentool uMap verwendet (vgl. <https://umap.openstreetmap.de/de/>). Bei uMap handelt es sich um ein Open-Source-Projekt, das durch FOSSGIS e.V. gefördert wird. Unter der Verwendung von OpenStreetMap-Ebenen ermöglicht uMap die Erstellung eigener Karten bzw. Positionierung von Markern durch Angabe von Geokoordinaten. Zusätzlich lassen sich Informationen zu einzelnen Markern durch Anklicken in der Karte, beispielsweise in einer Pop-Up-Ansicht oder Seitenansicht, in tabellarischer Form visualisieren. Eine neue Karte mit eigenen Markern kann über den einfachen Import der Geokoordinaten erstellt werden. Die erstellte Karte wird von uMap gespeichert und ist unter Verwendung einer URL frei einsehbar. Bei der Erstellung der Karte kann zusätzlich ein Bearbeitungslink abgerufen werden, der zur weiteren Bearbeitung der Karte erforderlich ist. Auf

diese Weise kann zwischen dem Zugriff im Ansichtsmodus und Bearbeitungsmodus unterschieden werden. Im Bearbeitungsmodus einer uMap können neue Ebenen oder Marker hinzugefügt werden und auch Grundeinstellungen der Karte, Ebenen und Marker spezifiziert und geändert werden. Der Bearbeitungslink darf nicht veröffentlicht werden, da über diesen die Bearbeitung bzw. Manipulation der Karteninhalte möglich wird.

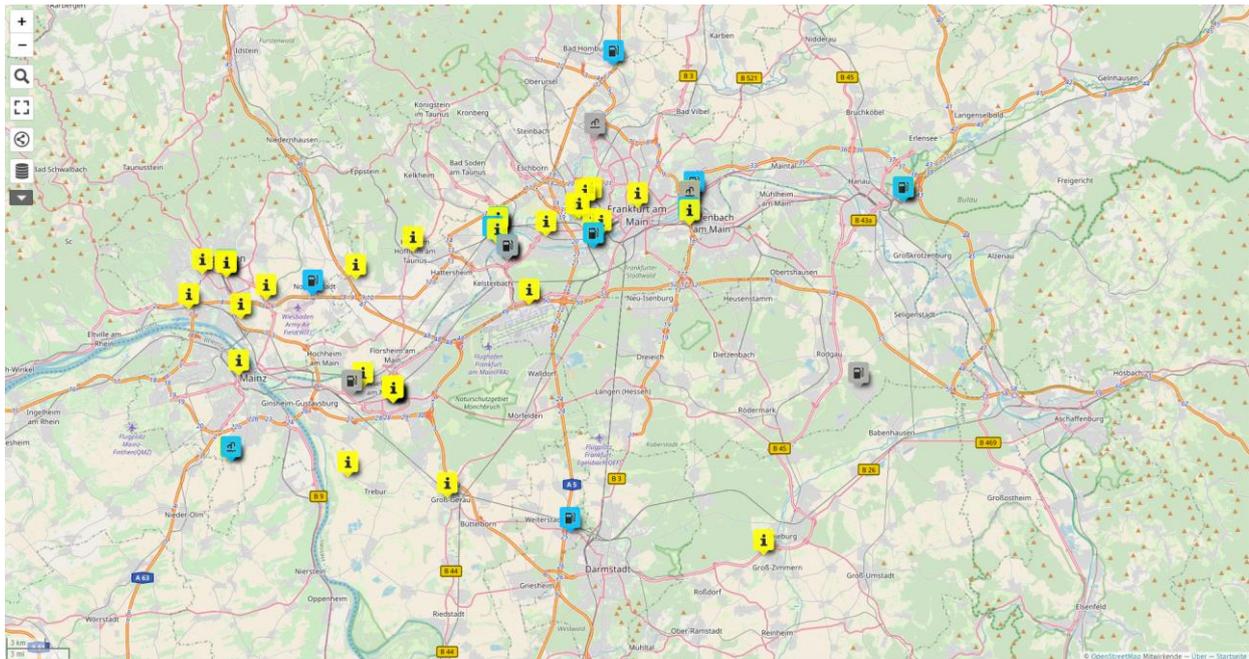


Abbildung 2: uMap Karte zu Marktaktivitäten und -potentialen

Für die Darstellung der Projektergebnisse zu den Marktaktivitäten und Projekten wurden drei getrennte Ebenen angelegt:

- » Die Ebene „**Marktaktivitäten und Projekte**“ zeigt die entsprechende Information als gelbes „i“ auf der Karte. Durch Anklicken des jeweiligen Symbols werden Detailinformationen eingeblendet.
- » Die Ebene „**Wasserstofftankstellen**“ zeigt den Ort von Wasserstofftankstellen in Betrieb (dargestellt durch ein blaues Tankstellensymbol) sowie von ehemaligen Tankstellen, die dauerhaft außer Betrieb sind (dargestellt als graues Tankstellensymbol).
- » Die Ebene „**Wasserstoffherzeuger**“ zeigt den Standort von Anlagen an, in denen Wasserstoff erzeugt wird (dargestellt durch ein blaues Windradsymbol). Anlagen, die nicht öffentlich zugänglich oder außer Betrieb sind, werden mit einem grauen Symbol dargestellt.

Die Ebenen können einzeln oder gemeinsam angezeigt werden. Die Standorte können mittels Hineinzoomen im Detail analysiert werden. Das maximale Herauszoomen ist begrenzt, sodass der Fokus auf dem Rhein-Main-Gebiet bleibt.

Die uMap Karte zur Marktaktivitäten und –potential Analyse ist unter folgenden Link einzusehen:

https://umap.openstreetmap.de/en/map/projekte-und-marktaktivitaten-wasserstoff_10718

3.2. Quellen-Senken-Analyse

3.2.1. Information der Partnerunternehmen

Ein wesentlicher Bestandteil in der Erarbeitung des Wasserstoffkonzeptes im Projekt MH2Regio war die Analyse des zu erwartenden Wasserstoffbedarfs für die Nutzung im Personen-, Güter- und Schifffahrtsverkehr. Hierzu wurden durch einen Fragebogen relevante Parameter bei den assoziierten Partnerunternehmen abgefragt. Ergänzend hierzu wurden einzelne Gespräche mit den Partnerunternehmen geführt.

Die im Fragebogen und in den Partnergesprächen zur Verfügung gestellten Daten wurden im weiteren Verlauf zur standortgenauen Wasserstoffbedarfsabschätzung an den Standorten der Partnerunternehmen im Rhein-Main-Gebiet verwendet und sind zudem entscheidend, um darüber hinaus auch das Potential zum Einsatz von Wasserstoff an Standorten anderer Unternehmen in den gleichen Geschäftsfeldern ableiten zu können. Zur Anonymisierung wurden die Partnerunternehmen in diesem Dokument als Anwender 1-9 verschlüsselt.

Der Aufbau des Fragebogens ist unter folgender Datei einzusehen:

[MH2Regio_AP3.2_Fragenkatalog.pdf](#)

In den ergänzend zu den Fragebögen durchgeführten Einzelgesprächen mit den Partnerunternehmen konnten weitere wertvolle Informationen über die Voraussetzungen für eine Integration von Brennstoffzellenfahrzeugen in den alltäglichen Betrieb, aber auch betriebliche und technische Anforderungen an eine Tankinfrastruktur, gesammelt werden. Zudem konnten auch spezifische Chancen und Limitierungen in den jeweiligen Geschäftsfeldern diskutiert werden, welche als grundlegende Informationen in die Einschätzung der Hochlaufkurven für die jeweiligen Branchen eingingen. Im Folgenden wurden die wichtigsten Erkenntnisse aus den Gesprächen mit den assoziierten Partnern kurz zusammengefasst:

Busse

- » In Ausschreibungen findet derzeit typischerweise ein Preis- anstatt Qualitätswettbewerb statt, zudem ist es in der zeitlichen Begrenzung und aufgrund der Unsicherheit nicht immer möglich, den Infrastrukturaufbau mit zu berücksichtigen. Darüber hinaus ist die Abschreibung von Infrastruktur in der Regel länger als der Vergabezeitraum. Somit muss der Wettbewerber entweder ein betriebswirtschaftliches Risiko eingehen oder erfährt durch die Bepreisung der Infrastrukturkosten einen Wettbewerbsnachteil. Mögliche Lösungen wären ein Outsourcing der Infrastruktur bzw. Fuelling-/Charging-as-a-Service oder längere Laufzeiten von Ausschreibungen bzw. die Verpflichtung zur Übernahme der Infrastruktur. Die Gesamtstrategie für den Aufbau von Infrastruktur bzw. die Kraftstoffversorgung sollte daher in zukünftigen Ausschreibungen berücksichtigt werden.
- » Eine Flexibilität der Depots bzw. Standorte muss vorhanden sein, da je nach Vergabe verschiedene Depotstandorte gesucht werden.
- » Prinzipiell können Fahrplaneläufe auch der Tankinfrastruktur bzw. der Betankung angepasst werden, solange dadurch keine Wettbewerbsnachteile entstehen.
- » Tankstellen müssen auf den Betriebshöfen oder in der Nähe der Betriebshöfe vorhanden sein, um Umwege zu verringern; ein externer Betreiber der Tankstelle wäre optimal.

LKW und Nutzfahrzeuge/Spezialfahrzeuge

- » Im Zustell-/Auslieferungsbereich werden batteriebetriebene Fahrzeuge aufgrund geringer täglicher Fahrleistung und hoher Standzeiten geplant, auf der Langstrecke ist der Einsatz von Brennstoffzellenfahrzeugen ein mögliches Umsetzungsziel.
- » Die Marktsituation für Brennstoffzellen-Lkws ist zurzeit nicht zufriedenstellend, die Reichweite von 400km bedingt ein enges Tankstellennetz – aktuell in Gesprächen mit Herstellern.
- » Für Spezialfahrzeuge werden hohe Leistungen benötigt, daher sind batteriebetriebene Elektrofahrzeuge aufgrund der geringen Reichweite nur eine Übergangslösung und der Fokus liegt auf Brennstoffzellenfahrzeugen mit dem Ziel, eine ähnliche Reichweite sowie Fahrverhalten zu erreichen.
- » Lade- bzw. Betankungszeit ist immer dann ein Problem, wenn sie länger als die gesetzlich vorgeschriebenen Lenkzeitpausen dauern – daher ist Brennstoffzellenantrieb aufgrund der zu Dieselfahrzeugen ähnlichen Betankungszeit vor allem für längere Strecken im Personenfernverkehr vorteilhaft.

Binnenschifffahrt

- » Bedingt durch den Saisonbetrieb ist eine hohe Flexibilität beim Schiffseinsatz eine Grundvoraussetzung, zudem muss die Platzverfügbarkeit für die Innenausstattung aufgrund möglicher größerer Tanks trotzdem sichergestellt sein.
- » Im Schifffahrtsbereich gibt es bisher nur vereinzelt Projekte mit Brennstoffzellenantrieb, im Güterverkehr wird reiner Elektroantrieb aufgrund fehlender Reichweite nicht weiterverfolgt, daher ist der Brennstoffzellenantrieb notwendig.
- » Prinzipiell gibt es für die Umstellung der Schiffe auf erneuerbare Antriebe die beiden Optionen Neubau oder Umrüstung. Aufgrund der langen Lebensdauern von Schiffen (bis zu 50 Jahre) und der hohen Kosten eines Neubaus muss eine langfristige Versorgungssicherheit vorhanden sein.

Die von den Partnerunternehmen ausgefüllten Fragebögen wurden quantitativ sowie qualitativ in Verbindung mit den zusätzlichen Angaben der Partner in den Einzelgesprächen ausgewertet. Bei der quantitativen Auswertung wurde zunächst untersucht, welche Fragen von den Partnern beantwortet wurden und an welchen Stellen typischerweise Lücken auftraten. Aufgrund der unterschiedlichen Branchen und Geschäftsmodelle der Partner wurde neben den Ausprägungen „Beantwortet“, „Nicht Beantwortet“ und „Keine Kenntnis“ noch die Ausprägung „Nicht relevant“ hinzugenommen, um ein differenziertes Gesamtbild zu erhalten.

Die quantitative Auswertung stellte heraus, dass einige Partner bisher nur wenig Kenntnis über die technischen Anforderungen von potenziellen Brennstoffzellenfahrzeugen in ihrem Geschäftsbereich an Wasserstofftankstellen haben. Dies wurde außerdem auch im Rahmen der Partnergespräche in Form von fehlender Marktverfügbarkeit und Standardisierung der Fahrzeuge und Betankung erwähnt.

Im zweiten Schritt wurden die Inhalte der Antworten der Partner ausgewertet. Hierzu wurden die Informationen in einer Standort-Flotten-Matrix gesammelt, welche die Zuordnung der jeweiligen Anzahl an Fahrzeugtypen inkl. spezifischer Fahrzeuginformationen (z.B. Verbrauch, Laufleistung, durchschnittliche Lebensdauer, aktuelles Flottenalter) zu den Standorten der Partner darstellt. Diese Informationen dienen im weiteren Verlauf zur standortgenauen Wasserstoffbedarfsabschätzung an den Partnerstandorten und lieferten zudem wichtige branchenspezifische Informationen, die im Folgenden auch für die Bedarfsabschätzung von Nicht-Partner-Standorten verwendet wurden, z.B. bzgl. der Hochlaufkurve von Wasserstoff als alternativer Energieträger für spezifische Fahrzeugtypen und Einsatzbereiche.

3.2.2. Annahmen für die Abschätzung des Wasserstoffbedarfs

In diesem Abschnitt werden alle Annahmen, welche der Abschätzung des Wasserstoffbedarfs zugrunde gelegt wurden, zusammengestellt und näher beschrieben.

3.2.2.1. Berücksichtigte Fahrzeugtypen

Brennstoffzellensysteme in Verbindung mit grünem Wasserstoff werden zukünftig für eine effiziente Dekarbonisierung des Verkehrssektors notwendig sein. Dies betrifft vorrangig Anwendungen mit hohen energetischen Anforderungen und die Einsatzbereiche, bei denen der batterieelektrische Antrieb nicht geeignet ist, wie beispielsweise den Güterverkehr, Züge des SPNVs, Busse des ÖPNVs und Pkw/Busse im Langstreckenbetrieb.

Auf Basis der in der festgelegten Fokussierung der Analyse auf Logistik- und Speditionsunternehmen sowie ÖPNV/ÖPFV-Busunternehmen wurden unter Hinzunahme der Informationen aus den Partnergesprächen die folgenden Fahrzeugtypen identifiziert, die den Ausgangspunkt für die hier betrachtete Wasserstoffbedarfsanalyse darstellten:

1. *ÖPNV-Busunternehmen:*
 - › *Solobus,*
 - › *Gelenkbus.*

2. *ÖPFV-Busunternehmen:*
 - › *(Hochdecker- / Doppeldecker-) Reisebus.*

3. *Logistik- und Speditionsunternehmen:*
 - › *Lieferfahrzeug (typischerweise bis 3,5t Nutzlast),*
 - › *Lkws (ab 3,5t Nutzlast),*
 - › *Zugmaschinen (Nutzlast vergleichbar mit Lkw mit Anhänger).*

Zusätzlich zu den oben genannten Fahrzeugtypen wurden im Bereich der Spezialfahrzeuge noch weitere Fahrzeugtypen betrachtet, die insbesondere für die Partnerunternehmen von Relevanz sind:

- › *Müll- bzw. Abfallsammelfahrzeug,*
- › *Lkw mit Kipper und Kran,*
- › *Betonmischfahrzeug,*
- › *Gepäck- bzw. Frachtschlepper.*

Neben dem Straßenverkehr wurde zusätzlich die Binnenschifffahrt in der Wasserstoffbedarfsanalyse berücksichtigt, da auch in der Schifffahrt alternative Energieträger, darunter – aufgrund der hohen energetischen Leistung – vor allem Wasserstoff, eine wichtige Rolle einnehmen.

3.2.2.2. Berücksichtigte Standorttypen

Die Bedarfsanalyse hatte neben der erforderlichen Menge an Wasserstoff auch die räumliche Bedarfsverteilung im Fokus. Eine Schätzung der jeweiligen Lokalisation der zukünftigen Bedarfe war insbesondere wichtig, damit schon heute potenzielle Standorte für Wasserstofftankstellen identifiziert werden können, die unter verschiedenen Hochlaufszszenarien sinnvoll ausgewählt wurden.

Mit der Fokussierung auf Logistik- und Speditionsunternehmen sowie ÖPNV/ÖPFV-Busunternehmen wurden die folgenden Standorttypen festgelegt, die im weiteren Verlauf den Ausgangspunkt für die räumlich detaillierte Wasserstoffbedarfsanalyse bildete.

- *ÖPNV-Busunternehmen*

Standortkategorie	Beschreibung
Busdepot	<i>Betriebshöfe der ÖPNV-Busverkehrsunternehmen, Fahrzeuge werden außerhalb der Betriebszeiten hier deponiert.</i>

- *ÖPFV-Busunternehmen*

Standortkategorie	Beschreibung
Busbahnhof	<i>Zentrale Haltestellen von ÖPFV-Busunternehmen in Städten, die je nach Strecke für einen zentralen Halt verwendet werden.</i>

- *Logistik- und Speditionsunternehmen*

Standortkategorie	Beschreibung
Auslieferzentrum	<i>Logistikstandorte mit lokalem Bezug zur Auslieferung von Gütern zu Endkunden in einem um den Standort räumlich begrenzten Gebiet.</i>
Verteilzentrum	<i>Zentrale Hauptumschlagsbasis zur Verfrachtung, Sortierung und Sammlung von Waren, Verteilung an Auslieferzentren oder andere Verteilzentren.</i>
Wareneingang und -ausgang	<i>Produktions- und Industriestandorte mit größerer Logistik zur Warenanlieferung oder -auslieferung.</i>

- *Binnenschifffahrt*

Standortkategorie	Beschreibung
Binnenhafen	<i>Hafen im Inneren einer Landmasse an einer Binnenwasserstraße oder einem Binnensee; Anlegestelle und Umschlagsplatz von Binnenschiffen in der Fahrgast- und Güterbinnenschifffahrt.</i>

Die so identifizierten Standorte potenzieller Wasserstoffbedarfsstellen wurden für die Standortanalyse verwendet und um die Standorte der Partnerunternehmen ergänzt.

3.2.2.3. Annahmen für die Modellierung des Hochlaufs an Wasserstoffbedarf auf Basis der Partnerunternehmen

Im Folgenden werden Angaben der Partnerunternehmen aufgeführt, welche als grundlegende Annahmen in die Abschätzung des Wasserstoffbedarfs, insbesondere in die Hochlaufkurven und Bedingungen an die Betankung, eingehen.

- **ÖPNV-Busverkehrsunternehmen:**
 - › Ab 2023 ist in der Vergabe bzw. den Ausschreibungen ein Anteil von 30% an Zero-Emission-Fahrzeugen vorgeschrieben.
 - › Brennstoffzellenbusse werden batteriebetriebene Elektrobusse ergänzen, aber nicht verdrängen. Je nach Umlauf- und Streckenprofil haben beide Antriebsarten spezifische Vor- und Nachteile, sodass davon ausgegangen wird, dass es zu gemischten Flotten kommt.
 - › Bedingt durch die Marktverfügbarkeit und die Ladeinfrastruktur wird der Anteil von batteriebetriebenen Elektrobussen an den Zero-Emission-Fahrzeugen über die nächsten 5 Jahre höher sein als der Anteil von Brennstoffzellenbussen.
 - › Die Betankung der Busse findet vollständig in den Busdepots oder in unmittelbarer Umgebung statt.

- **ÖPFV-Busverkehrsunternehmen:**
 - › Der Anteil von batteriebetriebenen Elektrobussen oder Brennstoffzellenbussen wird sich kurzfristig nur in einem sehr geringen Umfang bewegen, da batteriebetriebene Elektrobusse auf der Langstrecke wg. Ladezeiten und geringer Reichweite keine echte Alternative darstellen und Brennstoffzellenbusse nicht verfügbar sein werden.
 - › Mittelfristig werden Brennstoffzellenbusse einen höheren Anteil der Fernbusse ausmachen als batteriebetriebene Elektrobusse.
 - › Langfristig sind Brennstoffzellenbusse und – aus Wirtschaftlichkeitsgründen – auch vereinzelt Elektrobusse, eine Notwendigkeit für emissionsarmes Fahren.
 - › Die Betankung von Fernbussen findet typischerweise am Abfahrtsbahnhof, am Zielort oder auf der Strecke statt.

- **Logistik- und Speditionsunternehmen:**
 - › Auf der Langstrecke und bei Schwerlastfahrzeugen, stellt der Wasserstoffantrieb eine realistische Alternative dar und bildet die Grundlage für die angestrebte Emissionsfreiheit der Fahrzeugflotte. Es wird davon ausgegangen, dass mittel- bis langfristig vorzugsweise Brennstoffzellenfahrzeuge auf der Langstrecke bzw. im Schwerlastverkehr eingesetzt bzw. angeschafft werden. Kurzfristig führen die geringe Marktverfügbarkeit der Fahrzeuge und die infrastrukturbedingte Versorgungsunsicherheit mit Kraftstoff nur zu vereinzelt Anschaffungen.
 - › Die Betankungen von Lkws auf der Langstrecke findet typischerweise am Abfahrtsort, auf der Strecke oder am Zielort statt.
 - › Im Zustell-/Auslieferungsbereich werden kurz- bis mittelfristig batteriebetriebene Fahrzeuge aufgrund geringer täglicher Fahrleistung, hoher Standzeiten, Versorgungssicherheit mit Strom und aus Wirtschaftlichkeitsgründen bevorzugt. Der Einsatz von wasserstoffbetriebenen Lieferfahrzeugen wird nur in geringem Umfang gesehen. Es wird davon ausgegangen, dass die Fahrzeugflotte für den Zustell-/Auslieferungsbereich auch langfristig im Wesentlichen auf batteriebetriebenen Elektroantrieb basiert.

- › Die Betankung von Lieferfahrzeugen findet typischerweise am Auslieferzentrum oder in unmittelbarer Nähe statt.
 - › Für Spezialfahrzeuge, welche eine hohe Leistung, auch aufgrund von zusätzlichen Funktionen, benötigen, ist ein reiner Batteriebetrieb zum derzeitigen Stand der Technik nicht möglich, daher wird auf Brennstoffzellenantrieb gesetzt. Kurz- bis mittelfristig werden diese Fahrzeuge aufgrund ihrer geringeren Absatzmenge nicht verfügbar sein. Mittel- bis langfristig stellt der Wasserstoffantrieb für diese Fahrzeuggruppe eine Notwendigkeit dar.
 - › Die Betankung von Spezialfahrzeugen findet typischerweise am oder in unmittelbarer Nähe zum Betriebshof statt.
- **Personenbinnenschifffahrt:**
 - › Die Anschaffung von wasserstoffbetriebenen Schiffen ist langfristig eine Notwendigkeit für einen emissionsfreien Betrieb. Kurzfristig ist die Marktverfügbarkeit und Wirtschaftlichkeit dieser Antriebsformen kaum gegeben. Mittelfristig wird es zum Austausch einzelner Dieselschiffe gegen Wasserstoff-Schiffe kommen.
 - › Die Betankung findet vollständig vor Ort statt.

Die Informationen der Partnergespräche wurden zur Bestimmung der Hochlaufkurve für wasserstoffbetriebene Fahrzeuge berücksichtigt. Die Hochlaufkurve wurde dabei als Anteil der wasserstoffbetriebenen Fahrzeuge an den Neuanschaffungen modelliert.

3.2.2.4. Kraftstoffverbrauch pro Fahrzeug

Zur Analyse des Verbrauchs von Fahrzeugen mit Brennstoffzellenantrieb wurde eine Auswertung verschiedener Studien und Herstellerangaben durchgeführt. Aufgrund der bisher nur sehr geringen oder nicht vorhandenen Marktverfügbarkeit und somit nur wenigen Verbrauchsdaten von Brennstoffzellenfahrzeugen im realen Betrieb, wurden zur Plausibilisierung der Annahmen ebenfalls Kraftstoffverbräuche weiterer Antriebsarten in die Auswertung aufgenommen, insbesondere Diesel- und batterieelektrische Antriebe. Insgesamt wurden ca. 25 Quellen ausgewertet. Zudem wurden auch die Verbrauchsangaben der Partner als zusätzliche Datenquelle betrachtet.

Lagen für einen Fahrzeugtyp mit Brennstoffzellenantrieb keine Daten zum Kraftstoffverbrauch vor, wurde dieser Wert auf Basis der Daten zum Kraftstoffverbrauch des gleichen Fahrzeugtyps mit Dieselantrieb approximiert. Dazu wurde der Kraftstoffverbrauch dieses Fahrzeugtyps mit Dieselantrieb verwendet und mit einem Korrekturterm multipliziert. Der Korrekturterm wurde aus dem Verhältnis von Kraftstoffverbrauch eines Brennstoffzellenantriebs dividiert durch Kraftstoffverbrauch eines Dieselantriebs für einen vergleichbaren Fahrzeugtyp hergeleitet (bspw. Solo- und Reisebusse als Basis der Schätzung für Gelenkbusse).

Die Analyse wurde zunächst pro Fahrzeugtyp durchgeführt. Dazu wurden pro Antriebsart/Kraftstoff die Werte „Minimaler Verbrauch“, „Maximaler Verbrauch“, „Median“, sowie das 25%- und 75%-Quantil ermittelt. Zur Validierung der Kraftstoffverbräuche je Fahrzeugtyp erfolgte eine zweigeteilte Vorgehensweise:

- » Prüfung der Verhältnisse zwischen den Verbrauchswerten unterschiedlicher Antriebsarten eines Fahrzeugtyps über die unterschiedlichen Antriebsarten hinweg (Beispiel: Batterieelektrische Antriebe haben einen geringeren Kraftstoffverbrauch als Dieselantriebe).
- » Validierung der Verhältnisse zwischen den Fahrzeugtypen (Beispiel: Lieferfahrzeuge haben einen geringeren Kraftstoffverbrauch als Lkw).

Durch diese Vorgehensweise konnten die Angaben aus den verschiedenen Quellen validiert und deren Konsistenz untereinander sichergestellt werden. Potenzielle Effizienzsteigerungen im Kraftstoffverbrauch von Brennstoffzellenfahrzeugen in Zukunft wurden aufgrund der Unsicherheit nicht berücksichtigt.

Auf Basis der Kraftstoffanalyse wurde ein Wasserstoffverbrauch in kg pro 100 km für jeden Fahrzeugtyp festgelegt (typischerweise Median), der für die weitere Bedarfsanalyse Verwendung fand.

Der Wasserstoffverbrauch von Binnengüterschiffen wurde aufgrund der fehlenden Vergleichbarkeit separat betrachtet, für die Personenbinnenschifffahrt konnten Partnerangaben verwendet werden.

3.2.2.5. Laufleistung und Betankungsverhalten pro Fahrzeugtyp

Zur Berechnung des gesamten Wasserstoffbedarfs der Fahrzeuge sind neben dem spezifischen Kraftstoffverbrauch pro 100 km die jährliche Laufleistung sowie das Tankverhalten entscheidend. Die Laufleistung und das Betankungsverhalten unterscheiden sich typischerweise je nach Fahrzeugtyp. Lieferfahrzeuge haben bspw. geringe Umläufe pro Tag und werden in der Nähe ihres Depots eingesetzt. ÖPNV-Busse haben mittlere Laufleistungen pro Tag und werden auf den Betriebshöfen oder in der unmittelbaren Umgebung betankt. Fernbusse, LKWs und Zugmaschinen fahren hingegen eher Langstrecken über mehrere hundert Kilometer und kehren oftmals nicht am selben Tag an ihren Ausgangsort zurück. Diese Fahrzeugtypen tanken daher am Abfahrtsort, am Zielort oder unterwegs.

Aufgrund eines ähnlichen Fahrzeugeinsatzes für die jeweiligen Fahrzeugtypen in Bezug auf die gefahrene Strecke, wurde eine Laufleistung pro Fahrzeugtyp angenommen. Hierbei wurde insbesondere auf die Partnerangaben zurückgegriffen. Für die Partnerunternehmen wurde mit den jeweils angegebenen Laufleistungen gerechnet. Für die Nicht-Partnerunternehmen wurden gemittelte Partnerangaben übertragen oder bei fehlender Verfügbarkeit von Informationen auf externe Quellen (v.a. KBA) zurückgegriffen.

Das Betankungsverhalten der Fahrzeuge, d.h. der Anteil der Betankung der Fahrzeuge am Depot/Standort, hängt wiederum von der täglich gefahrenen Strecke ab und wurde daher auch pro Fahrzeugtyp angenommen. Wie zuvor beschrieben wurde auf Basis der Partnerangaben davon ausgegangen, dass Lieferfahrzeuge, ÖPNV-Busse und Spezialfahrzeuge vollständig in der Region bzw. am Standort tanken. Bei Fernbussen, LKWs und Zugmaschinen wurde davon ausgegangen, dass neben der Betankung am Abfahrtsort auch eine Betankung unterwegs bzw. am Zielort in Betracht kommt. Daher wird ein Betankungsfaktor angesetzt, der abschätzt, welcher Anteil des Kraftstoffbedarfs in der Region betankt wird (1 bzw. 1/3).

3.2.2.6. Szenarien und Auswahl der Zeitperiode und Stützjahre

Um die zukünftige Entwicklung des Wasserstoffbedarfs an Logistik- und Speditionsunternehmen sowie ÖPNV/ÖPFV-Busunternehmen im Rhein-Main-Gebiet zu analysieren und auf dieser Grundlage im Rahmen des Gesamtprojekts eine ganzheitliche Konzeption der Infrastruktur zu entwickeln, ist es von zentraler Bedeutung die Entwicklung für den Wasserstoffbedarf über die nächsten 10-20 Jahre hinweg abzuschätzen. Hierzu wurden für die Berechnung des standortgenauen Wasserstoffbedarfs die Periode von 2025-2040 mit den vier Stützjahren 2025, 2030, 2035 und 2040 betrachtet und jeweils der Wasserstoffbedarf pro Jahr in Kilogramm bzw. Tonnen ermittelt. An dieser Stelle wird aufgrund der zugrundeliegenden Unsicherheitsfaktoren, u.a. in den Hochlaufkurven von Brennstoffzellenfahrzeugen, bewusst das Jahr 2040 als Grenze verwendet – anstelle des in anderen Studien und politischen Zielsetzungen häufig betrachteten

Zeitraums bis 2050. Dies ist auch dadurch begründet, dass das Projekt kurz- bis mittelfristig die Etablierung einer Wasserstoffinfrastruktur im Rhein-Main-Gebiet initiieren möchte.

Die erwähnte Unsicherheit in der Entwicklung der Brennstoffzellentechnologie und somit auch von Wasserstoff als Kraftstoff für Fahrzeuge bedingt die Betrachtung verschiedener Szenarien. Diese wurden über den Anteil der Brennstoffzellenfahrzeuge an den Neuanschaffungen für die betrachteten Perioden 2021-2025, 2026-2030, 2031-2035 und 2036-2040 pro Fahrzeugtyp definiert. Hierzu wurden ein konservatives und ein optimistisches Szenario betrachtet. Die Szenarien sind vor allem durch die Marktverfügbarkeit der Fahrzeuge, die Betankungsinfrastruktur und den Wettbewerb mit batteriebetriebenen Fahrzeugen getrieben. Die Betrachtung verschiedener Szenarien ist ebenfalls von essenzieller Bedeutung für die Konzeption der Infrastruktur, da diese so ausgestaltet werden kann, dass auch ein geringerer Wasserstoffbedarf möglichst vollständig gedeckt werden kann und zusätzliche Kapazitäten oder Kapazitätserweiterungen für einen optimistischen Hochlauf eingeplant werden.

3.2.2.7. Berechnung des Flottenanteils von BZ-Fahrzeugen unter Berücksichtigung der jährlichen Anschaffungsquote sowie der Altersstruktur des Flottenmixes

Um den Wasserstoffverbrauch von Flotten an verschiedenen Stützjahren zu berechnen, wurde zunächst der Anteil von Brennstoffzellenfahrzeugen an der gesamten Flotte zu den jeweiligen Stützjahren bestimmt. Dieser ist zum einen abhängig von dem in den Szenarien angenommenen und somit in der Modellierung vorgegebenen Anteilen von Brennstoffzellenfahrzeugen an den Neuanschaffungen und zum anderen von dem grundsätzlichen Anteil der Neuanschaffungen in den einzelnen Jahren.

Für den Hochlauf des Anteils von Brennstoffzellenfahrzeugen an der jeweiligen Fahrzeugflotte spielte daher in der kurzfristigen Betrachtung auch das Investitionsverhalten des jeweiligen Unternehmens bzw. die derzeitige Altersstruktur der Flotte eine Rolle. Als Indikator für die Altersstruktur diente an dieser Stelle vereinfacht das Durchschnittsalter der Flotte. Grundsätzlich wurde davon ausgegangen, dass jedes Fahrzeug bis zum Ende seiner Lebensdauer eingesetzt wird. Damit hat eine „ausgewogene“ Fahrzeugflotte ein Durchschnittsalter der halben Lebensdauer und die Anzahl der jährlich durch Neuanschaffungen zu ersetzenden Fahrzeuge entspricht dem Quotient aus Fahrzeuganzahl und Lebensdauer der Fahrzeuge.

Es folgte die Annahme, dass bei einer Flotte, deren derzeitiges Durchschnittsalter geringer als die Hälfte der Fahrzeuglebensdauer ist, in den ersten Jahren tendenziell weniger Fahrzeuge ersetzt werden und somit auch absolut betrachtet weniger Neuanschaffungen an Brennstoffzellenfahrzeugen zu erwarten sind. Obwohl der Anteil von Brennstoffzellenfahrzeugen an den Neuanschaffungen durch die Szenarien fest vorgegeben wurden, ergibt sich in diesem Fall ein geringerer Hochlauf des Anteils von Brennstoffzellenfahrzeugen an der Fahrzeugflotte im Vergleich zur ausgewogenen Fahrzeugflotte. Im Falle einer tendenziell älteren Fahrzeugflotte entsteht ein schnellerer Austausch der Fahrzeugflotte.

Dieser Investitionszyklus der Unternehmen lässt sich durch eine periodische Funktion modellieren, welche vereinfacht die Abweichungen der jährlichen Neuanschaffungen, von denen einer „ausgewogenen“ Flotte angibt. Für die Wasserstoffbedarfsberechnung wurde angenommen, dass sich der Investitionszyklus der Flottenbetreiber in den nächsten Jahren fortsetzt. Aufgrund der Unsicherheitsfaktoren in der Flottenentwicklung, welche z.B. durch frühzeitigen Ausfall von Fahrzeugen oder frühzeitige Ausmusterung bzw. Verkauf von Fahrzeugen bestimmter Antriebsarten aufgrund von verschärften Emissionsregelungen entstehen, wurde eine mit der Zeit auftretende Dämpfung angenommen, sodass sich das Investitionsverhalten langfristig hin zu dem einer „ausgewogenen“ Flotte annähert.

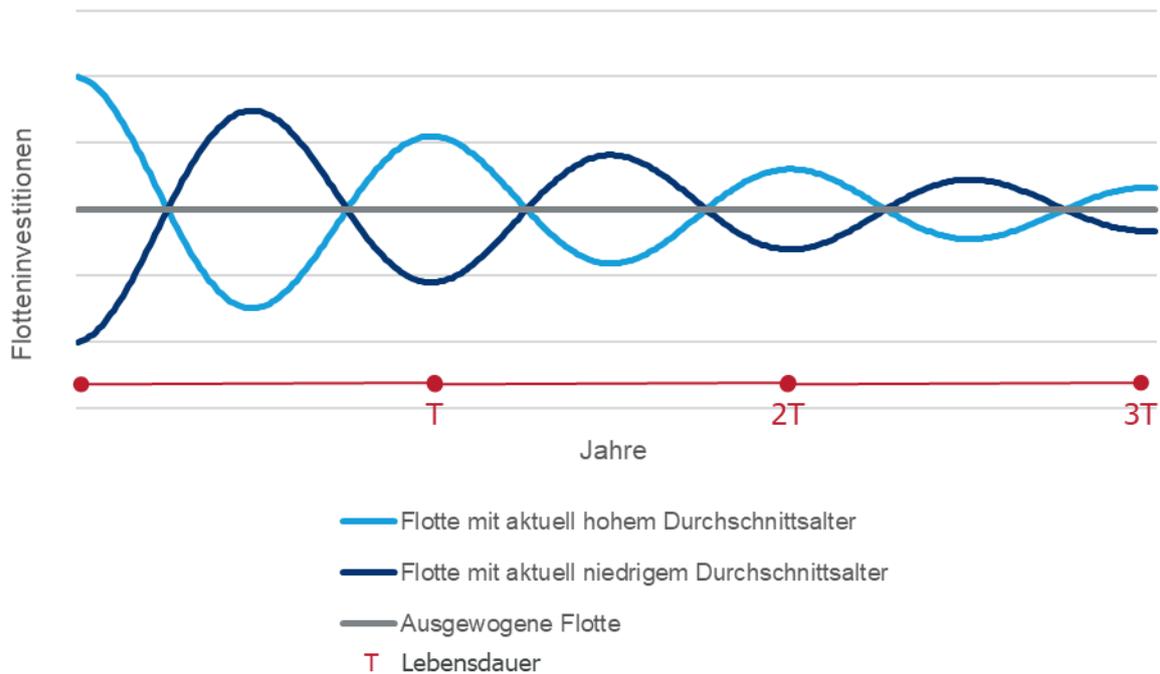


Abbildung 3: Fortgeschriebener periodischer Investitionszyklus

Insgesamt wurde angenommen, dass sich die Flottengröße im Laufe der Jahre nicht ändert. Damit beziehen sich alle Bedarfsschätzungen für die betrachteten Jahre auf die aktuelle Flotte und Veränderungen in den Geschäftsmodellen, steigende Personenmobilität oder verstärktes Frachtaufkommen wurden nicht berücksichtigt. Für die Berechnung des Wasserstoffbedarfs wurden bestimmte Anteile an Wasserstofffahrzeugen pro Fahrzeugtyp herangezogen.

3.2.2.8. Berechnungsmethodik für den standortgenauen Wasserstoffbedarf

In die abschließende Berechnung des Wasserstoffbedarfs einer Flotte an einem Standort gingen die zuvor eingeführten Parameter ein. Die Berechnungen wurden jeweils für jeden Standort, für jedes Stützjahr und für die beiden zugrundeliegenden Szenarien durchgeführt. Dabei wurde über die Fahrzeugtypen eines Standorts aggregiert.

Zur besseren Lesbarkeit wird die Methodik für die Berechnung des Wasserstoffbedarfs im Folgenden an einem Standort für ein Stützjahr und unter einem Szenario beschrieben.

Angenommen, am Standort existieren k Fahrzeugtypen und n_1, \dots, n_k sei die Anzahl an Fahrzeugen je Fahrzeugtyp.

1. Berechnung des Wasserstoffverbrauchs V_i eines Fahrzeugs pro Fahrzeugtyp ($i = 1, \dots, k$). Sei

- › Jährliche Laufleistung [km/Jahr] (L_i),
- › Wasserstoffverbrauch [kg/100km] (v_i),
- › Anteil der Betankung am Standort [%] (s_i),

dann ist der Wasserstoffverbrauch eines Fahrzeugs von Typ i gegeben als

$$V_i = L_i * \left(\frac{v_i}{100}\right) * s_i \quad [\text{kg/Jahr}]$$

für alle $i = 1, \dots, k$.

2. Berechnung des Wasserstoffverbrauchs der gesamten Flotte als

- › Wasserstoffbedarf eines Fahrzeugs [kg/Jahr] (V_i),
- › Anzahl Fahrzeuge vom Typ i (n_i),
- › Anteil an Wasserstofffahrzeugen [%] (H_i),

$$V = \sum_{i=1}^k n_i * V_i * H_i.$$

Wie oben beschrieben, wurde zur Verringerung der Komplexität die Herleitung für einen bestimmten Standort, ein ausgewähltes Stützjahr und ein gegebenes Szenario in der Formel nicht gekennzeichnet. Tatsächlich hängt beispielsweise der Anteil der Wasserstofffahrzeuge für Fahrzeugtyp i ab von dem betrachteten Stützjahr und dem ausgewählten Szenario, die Anzahl der Fahrzeuge vom Typ i wiederum vom betrachteten Standort.

In der standortgenauen Berechnung des geschätzten Wasserstoffbedarfs wurde die obige Berechnung pro Standort jeweils achtmal durchgeführt, d.h. für alle 4 Stützjahre unter den beiden Szenarien. Dabei hing ausschließlich der Anteil von Brennstoffzellenfahrzeugen an den Neuanschaffungen von den betrachteten Szenarien ab.

3.2.3. Standortgenaue Abschätzung des Wasserstoffbedarfs

Auf Basis der zuvor getätigten Annahmen und des eingeführten methodischen Vorgehens lässt sich der Wasserstoffbedarf für den ÖPNV-Verkehr und Schwerlastverkehr nun abschätzen.

3.2.3.1. Ermittlung der Standorte der Logistik- und Speditionsunternehmen sowie Busverkehrsdienstleister im Rhein-Main-Gebiet

Für die Partnerunternehmen wird auf die im Rahmen des Fragebogens angegebenen Standorte zurückgegriffen. Für diese Unternehmen sind die Standortangaben präzise.

Da die Partnerunternehmen nur einen geringen Teil der Logistik- und Speditionsunternehmen sowie Busverkehrsdienstleister im Rhein-Main-Gebiet ausmachen, erfolgte eine weitere, detaillierte Standortsuche. Hierzu wurde eine Liste von Standorten mittels Luftbildaufnahmen in Google Maps erstellt und zusätzlich mit der Mitgliederdatenbank des Speditions- und Logistikverbands Hessen/Rheinland-Pfalz abgeglichen. Letztere ist öffentlich über die Webseite des Verbands verfügbar. Alle Daten wurden innerhalb einer Excel-Datei verarbeitet und abgelegt.

Im Rahmen der Luftbildanalyse wurden relevante Standorte identifiziert, kategorisiert und anhand von Kennzahlen beschrieben (z.B. Anzahl der Sattelkraftfahrzeuge). Diese Auswertung sollte möglichst alle relevanten Standorte im Rhein-Main-Gebiet umfassen, die Rückschlüsse auf den Wasserstoffbedarf im Logistiksektor sowie für den ÖPNV zulassen. In einer strukturierten Rastersuche wurde das gesamte Rhein-Main-Gebiet visuell abgelaufen. Dabei wurden relevante Geopunkte markiert. Hierbei diente die 2D-Ansicht der Satellitenkarte als Quelle. Sie unterscheidet sich in Teilen von der Globusansicht und liefert im Allgemeinen aktuellere Bilder. Die Relevanz eines Standorts wurde aus den folgenden Kriterien abgeleitet, wobei zumindest ein Kriterium hinreichend erfüllt sein musste:

- › Aktivität/Präsenz von Transportfahrzeugen, Lieferfahrzeugen oder Bussen,
- › direkter Logistikbezug des Standorts (z.B. Verteilzentren, Paketzentrum, ÖPNV-Betriebshof),
- › Logistikbezug eines ansässigen Unternehmens (z.B. markanter Wareneingang oder -ausgang mit erkennbarem Aufkommen von Transportfahrzeugen).

Insgesamt wurden über 500 Standorte identifiziert. Zur Benennung der Standorte und zur Betrachtung der ansässigen Unternehmen, wurden die in Google Maps angegebenen Standortinformationen verwendet, insbesondere Unternehmensname und Geokoordinaten.

Die Auswertung wurde schließlich mit der Mitgliederdatenbank des Speditions- und Logistikverbands Hessen/Rheinland-Pfalz abgeglichen. Der Abgleich zeigte, dass von den 215 relevanten Standorten dieser Datenbank 23 Standorte nicht in der Luftbildanalyse identifiziert wurden. Diese 23 Standorte wurden nachgetragen. Es zeigte sich, dass dies allesamt Standorte mit niedriger Relevanz waren, d.h. mit einer sehr geringen Anzahl von Fahrzeugen bzw. sehr kleiner Fläche. Dies unterstützte die Annahme, dass die identifizierten Standorte der Luftbildanalyse als vollständig in Bezug auf interessante Standorte für dieses Projekt angenommen wurden.

Die Luftbildanalyse der Standorte beinhaltete auch die Kategorisierung des Standorts. Ebenso wie die Standortsuche selbst basierte diese Analyse auf der 2D-Ansicht. Jeder Standort wurde einer der folgenden Kategorien zugeordnet:

- › *Verteilzentrum*: Zentren zur Umverteilung von Gütern; Warenlager/-zwischenlager
- › *Auslieferzentrum*: Umverteilung von Gütern zur lokalen Auslieferung; Standorte mit einem lokalen Bezug
- › *Hafenauslieferzentrum*: Auslieferzentren mit einem Hafenanchluss
- › *Wareneingang/-ausgang*: Industriestandorte bzw. Produktionsstandorte mit Logistik zur Warenanlieferung oder Warenauslieferung
- › *Busdepot*: *Betriebshof des ÖPNVs*
- › *Binnenhafen*: *Schiffsanleger für Binnenschiffe*

Zusätzlich wurden bei der Analyse folgende Standorte erfasst, die im Rahmen dieser Studie aber nicht weiter ausgewertet wurden:

- › *Parkplatz*: Parkplätze von Transportfahrzeugen an z.B. Autobahnen oder Industriestandorten
- › *Rechenzentrum*: Große Rechenzentren im Rhein-Main-Gebiet

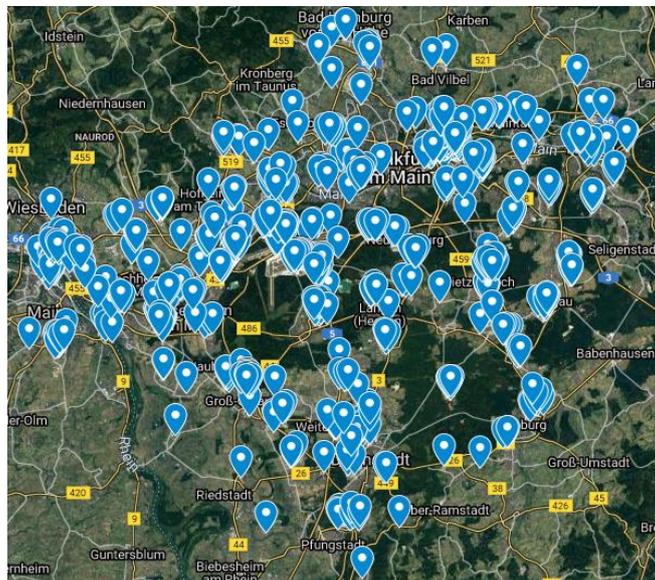


Abbildung 4: Relevante Standorte im Rhein-Main-Gebiet (Standortanzahl: 562)

3.2.3.2. Abschätzung der Fahrzeuganzahl pro Standort

Die Anzahl der Fahrzeuge pro Standort wurde für Partner- und Nicht-Partner-Standorte unterschiedlich berechnet. Für die insgesamt 17 Standorte der Partnerunternehmen lagen aus Fragebogen und Partnergesprächen exakte Angaben der Fahrzeuganzahl pro Fahrzeugtyp am jeweiligen Standort vor. Im Falle der Nicht-Partner-Standorte wurde eine Schätzung der Fahrzeuganzahl auf Basis der beobachteten Fahrzeuganzahl und Standorteinrichtungen wie folgt vorgenommen.

Ebenso wie die Standortsuche basierte diese Luftbildanalyse auf der 2D-Ansicht. Ergänzend wurde an dieser Stelle auch die 3D-Ansicht verwendet, um ansonsten nicht erkennbare Informationen (z.B. Anzahl der Rampen und Tore) zu erfassen.

Über die Luftbildanalyse (2D-Ansicht) wurde zunächst die Anzahl der erkennbaren Fahrzeuge ausgewertet. Hierzu wurden die abgebildeten Transportfahrzeuge bzw. Busse identifiziert und gezählt. Dabei wurde zwischen den folgenden Kategorien unterschieden:

- › Zugmaschine bzw. Sattelkraftfahrzeug,
- › Lastkraftwagen,
- › Lieferfahrzeug,
- › Spezialfahrzeuge (Betonmischfahrzeuge, Müllwagen),
- › Solobus,
- › Gelenkbus.

Um die Aussagekraft der Daten zu erhöhen, wurden die Fahrzeuge, mit Ausnahme von Standorten der Kategorien Parkplatz und Busdepot, mittels einer Zählmethodik erfasst. Bei Parkplätzen und Busdepots wurden die identifizierten Fahrzeuge voll gewertet.

Zusätzlich wurden für jeden Standort die LKW-Rampen gezählt, an denen Lkw und Anhänger andocken können, sowie die Anzahl an Lieferfahrzeugtoren erhoben, welche insbesondere für Auslieferungszentren von Bedeutung sind. Bei Auslieferungszentren ließ sich klar zwischen Rampen und Lieferfahrzeugtoren unterscheiden (siehe Abb. unten). Die Erfassung dieser standortspezifischen Informationen fand primär in der 3D-Ansicht statt. Das Prinzip wird anhand des folgenden Beispiels verdeutlicht:

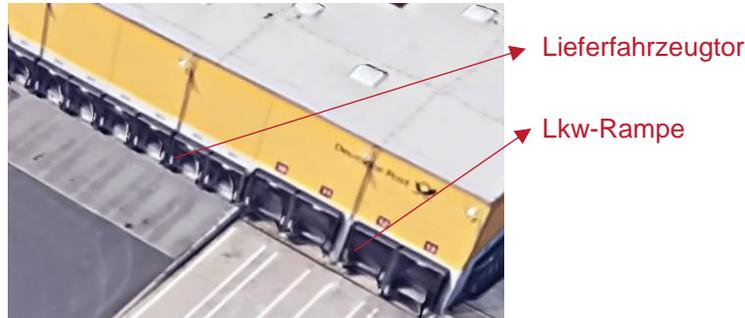


Abbildung 5: DHL Zustellbasis (Koordinaten: 50.11691, 8.76134)

Bei den Standorten der Kategorie Busdepot wurden anstelle der Rampen, die Anzahl an Stellplätzen für Solobusse bzw. Gelenkbusse gezählt. In Fällen, bei denen die Stellplätze nicht einsehbar waren (z.B. wegen Überdachungen), wurde die Anzahl der Stellplätze auf Basis der Gebäudestruktur und der Gebäudelfläche geschätzt.

Abschließend wurden die erfassten Daten ausgewertet und die entsprechende Fahrzeuganzahl nach einer festgelegten Methodik bestimmt. Dabei wurden die beobachteten Fahrzeuge zu den vorhandenen Rampen ins Verhältnis gesetzt: War ein Standort mit erkennbaren Fahrzeugen sehr ausgelastet, so wurde diese Fahrzeuganzahl weiter betrachtet. Falls hingegen im Verhältnis zur Rampen-/Tor-/Parkplatzanzahl nur sehr wenige Fahrzeuge vorhanden waren, so wurde der Mittelwert zwischen der beobachteten Fahrzeuganzahl und dem durch die Standorteinrichtungen berechnetem Potential verwendet.

1. Busdepots:

Zur Bestimmung der Anzahl der Solo- und Gelenkbusse an einem Busdepot wurden die beobachtete Fahrzeuganzahl pro Fahrzeugtyp N sowie die Anzahl der Busparkplätze B , ein Busparkplatzfaktor f_p und das Verhältnis von Solo- zu Gelenkbussen v_{Solo}/v_{Gelenk} verwendet. Der Busparkplatzfaktor spiegelt wieder, dass nicht alle Parkplätze in der aktiven Nutzung berücksichtigt werden müssen.

- › Solobusse:

$$\hat{N} = \frac{N + \max(N, B * f_p * v_{Solo})}{2}$$

- › Gelenkbusse:

$$\hat{N} = \frac{N + \max(N, B * f_p * v_{Gelenk})}{2}$$

2. Logistikunternehmen ((Hafen-)Auslieferzentren, (Hafen-)Verteilzentren und Warenein- und -ausgang):

Zur Bestimmung der Anzahl der Zugmaschinen und Lkws an Logistikstandorten wurde die beobachtete Fahrzeuganzahl pro Fahrzeugtyp N sowie die Anzahl der Rampen R , ein Rampenfaktor f_R und das Verhältnis von Zugmaschinen zu Lkws $v_{Zugmaschine}/v_{Lkw}$ verwendet. Der Rampenfaktor spiegelt wieder, dass nicht alle Rampen aktiv genutzt werden müssen.

- › Zugmaschinen:

$$\hat{N} = \frac{N + \max(N, R * f_R * v_{Zugmaschine})}{2}$$

- › Lkws:

$$\hat{N} = \frac{N + \max(N, R * f_R * v_{Lkw})}{2}$$

- › Auslieferfahrzeuge: Anstatt der Anzahl der Rampen wurden für Lieferfahrzeuge die Anzahl der Liefertore T und ein Liefertorfaktor f_T verwendet:

$$\hat{N} = \frac{N + \max(N, T * f_T)}{2}$$

- › Müllfahrzeuge und Betonmischfahrzeuge: Hier wird jeweils die beobachtete Fahrzeuganzahl pro Fahrzeugtyp N verwendet.

$$\hat{N} = N$$

3. Binnenschifffahrt (Binnenhafen)

Zur Bestimmung der Anzahl von Binnengüterschiffen wurde die beobachtete Anzahl an Schiffen N , die Anzahl der Anlagestellen A am jeweiligen Binnenhafen sowie ein Anlegestellenfaktor f_A verwendet. Der Anlegestellenfaktor spiegelt wieder, dass nicht alle Anlegestellen aktiv genutzt werden müssen.

$$\hat{N} = \frac{N + \max(N, T * f_A)}{2}$$

3.2.3.3. Kraftstoffverbrauch pro Fahrzeugtyp

Die folgende Abbildung zeigt exemplarisch die Ergebnisse für LKW. Um eine bessere Vergleichbarkeit zwischen den unterschiedlichen Antriebstechnologien zu ermöglichen, wurde der Kraftstoffverbrauch jeweils in die Einheit Kilowattstunden pro Kilometer (kWh/km) umgerechnet.

Es wurde der Kraftstoffverbrauch über sieben unterschiedliche Antriebsarten/Energieträger visualisiert. Für LKW ist festzustellen, dass der Kraftstoffverbrauch bei Dieselantrieb gemessen am Median etwa 50 % höher als bei Brennstoffzellenantrieb ist. Ein vergleichbares Bild zwischen Diesel- und Brennstoffzellenantrieb zeigt sich auch für die übrigen Fahrzeugklassen. Auch hier ist der Kraftstoffverbrauch der Dieselantriebe gemessen am Median höher als bei Brennstoffzellenantrieb. Die mit Blick auf den Kraftstoffverbrauch effizienteste Antriebsart stellt fahrzeugtypübergreifend der batterieelektrische Antrieb dar. Hier ist jedoch zu berücksichtigen, dass sich dieser Antrieb für einige Fahrzeugklassen aus diversen Gründen (z.B. Reichweite, Nutzlast) nicht eignet.

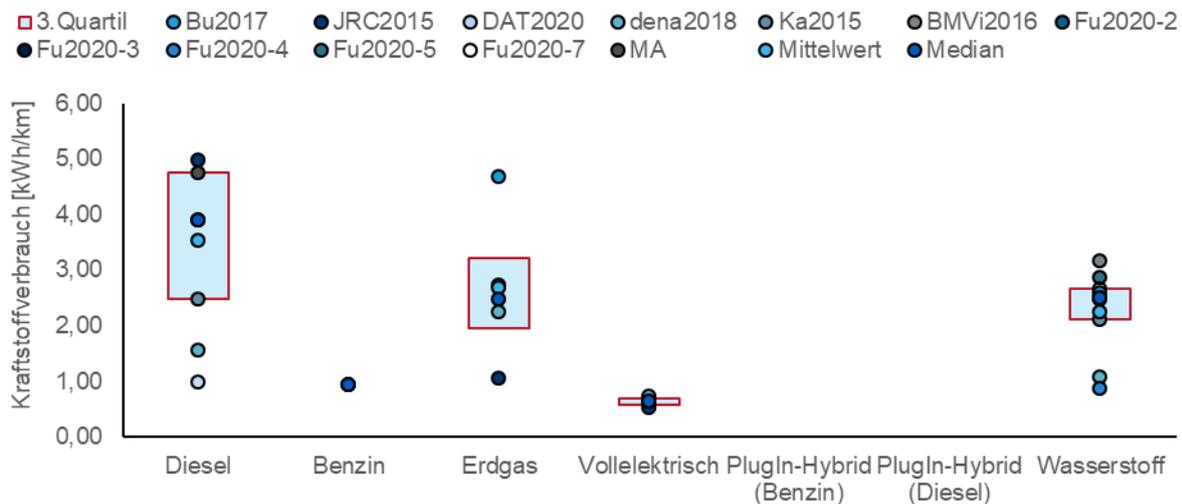


Abbildung 6: Vergleich des Energieverbrauchs in kWh/km für LKW

Ergänzend zur grafischen Darstellung der Ergebnisse für LKW fasst die nachfolgende Tabelle den spezifischen Wasserstoffverbrauch nach Fahrzeugtyp zusammen. Da für die Fahrzeugtypen „Gelenkbus“, „Reisebus“ und „LKW mit Kipper und Kran“ keine Datenpunkte vorlagen, wurde der H₂-Kraftstoffverbrauch auf Basis des Dieserverbrauchs approximiert. Der Fahrzeugtyp „LKW mit Kipper und Kran“ ist lediglich für die Abschätzung des Wasserstoffbedarfs von einem Partnerunternehmen relevant.

Tabelle 1: H₂-Kraftstoffverbrauch in kg je 100 km für verschiedene Fahrzeugtypen

Fahrzeugtyp	Datenpunkte [#]	H ₂ -Kraftstoffverbrauch in kg/100km		
		Quantil 25 %	Median	Quantil 75 %
Zugmaschine	3	7,00	8,01	8,29
LKW	9	6,35	7,50	8,02
Lieferfahrzeuge	2	1,22	1,25	1,27
Gelenkbus	0	-	11,51	-
Solobus	4	8,58	8,80	9,02
Reisebus	0	-	7,37	-
Müllfahrzeuge	2	6,10	6,45	6,79
LKW mit Kipper und Kran	0	-	11,78	-
Betonmischfahrzeug			11,78	

Für die weitere Bedarfsanalyse werden die Median-Werte herangezogen und als Verbrauchswerte für die Partner- und Nicht-Partner-Standorte verwendet.

3.2.3.4. Laufleistung und Betankungsverhalten pro Fahrzeugtyp

Für die jährlichen Laufleistungen der Fahrzeugtypen an den Nicht-Partner-Standorten sowie für das jeweilige Betankungsverhalten pro Fahrzeugtyp wurden auf Basis der Partnerinformationen und weiteren Recherchen (insbesondere KBA) die folgenden Werte angenommen:

Tabelle 2: Durchschnittliche jährliche Laufleistung pro Fahrzeugtyp für Nicht-Partner-Standorte und Betankungsverhalten pro Fahrzeugtyp

Fahrzeugklasse	Fahrzeugtyp	Durchschnittliche Laufleistung pro Jahr [km/a]	Anteil der Betankung am Standort
Transportfahrzeuge	Zugmaschine	195.282	33%
	Lkw	61.384	33%
	Lieferfahrzeug	9.150	100%
Busse (ÖPNV)	Gelenkbus	63.000	100%
	Solobus	63.000	100%
Spezialfahrzeuge	Betonmischfahrzeug	20.000	100%
	Müllfahrzeuge	15.000	100%
Binnenschiff-fahrt	Güter- und Fahrgastschiffe	250.000	100%

Für die Partnerunternehmen wurde mit den jeweils angegebenen Laufleistungen pro Fahrzeugtyp gerechnet. Ebenfalls wurde für die Partnerunternehmen davon ausgegangen, dass die Betankung am Standort oder in unmittelbarer Nähe stattfindet. Ausnahmen hiervon bilden Fernbusse und Zugmaschinen bzw. Lkws an Verteilzentren, für die ein Betankungsanteil von 33% angenommen wird, da diese auch typischerweise an anderen Stationen der Langstrecke tanken können.

3.2.3.5. Szenarien für den Anteil der BZ-Fahrzeuge an Neuanschaffungen

Auf Basis der Partnerinformationen sowie regulatorischen Vorgaben zu Flottenemissionswerten im ÖPNV wurden zwei Szenarien über den Anteil der Brennstoffzellenfahrzeuge an den Neuanschaffungen pro Fahrzeugtyp definiert, ein konservatives sowie ein optimistisches. Die Szenarien sind vor allem durch die Marktverfügbarkeit der Fahrzeuge und Betankungsinfrastruktur getrieben.

Den gewählten Anteilen von Wasserstofffahrzeugen an den Neuanschaffungen liegen folgende Annahmen zugrunde:

1. Im Bereich Transportlogistik für Lkw und Zugmaschinen:

- › Kurzfristig: Nur vereinzelte Fahrzeuge verfügbar, daher 2% bzw. 5%;
- › Mittelfristig: Alternative für den Einsatz auf der Langstrecke abhängig von der Wirtschaftlichkeit;
- › Langfristig: Notwendig zur Erreichung der Emissionsfreiheit, u.U. im Wettbewerb mit anderen Antrieben, daher 48% (konservativ) und 80% (optimistisch).

2. Für Lieferfahrzeuge:

- › Batteriebetriebene Fahrzeuge bleiben mittel- und langfristig die wirtschaftlichste Alternative. Daher langfristig gar kein Anteil bzw. Anteil bis 30% erreichbar.

3. Für Busse im ÖPNV:

- › Ab 2023 ist in der Vergabe bzw. den Ausschreibungen ein Anteil von 30% an Zero-Emissions-Fahrzeugen vorgeschrieben. Aufgrund des Wettbewerbs mit Elektroantrieb und derzeit geringerer Marktverfügbarkeit kurzfristiger Anteil nur 10-15%. Langfristig bleibt der Wettbewerb mit batteriebetriebenen Bussen bestehen. Daher langfristiger Anteil an den Neuanschaffungen 40-50%.

4. Für Busse im ÖPFV:

- › Analog zu Lkw. Derzeit geringe Marktverfügbarkeit, langfristig Notwendigkeit für Emissionsfreiheit, ggf. vereinzelt Wettbewerb zu batteriebetriebenen Bussen.

5. Für Güter- und Fahrgastschiffe in der Binnenschifffahrt:

- › Die Anschaffung von wasserstoffbetriebenen Schiffen ist langfristig eine Notwendigkeit für einen emissionsfreien Betrieb. Kurzfristig ist die Marktverfügbarkeit und Wirtschaftlichkeit dieser Antriebsformen kaum gegeben. Mittelfristig wird es zum Austausch einzelner Diesel-Schiffe gegen Wasserstoff-Schiffe kommen.

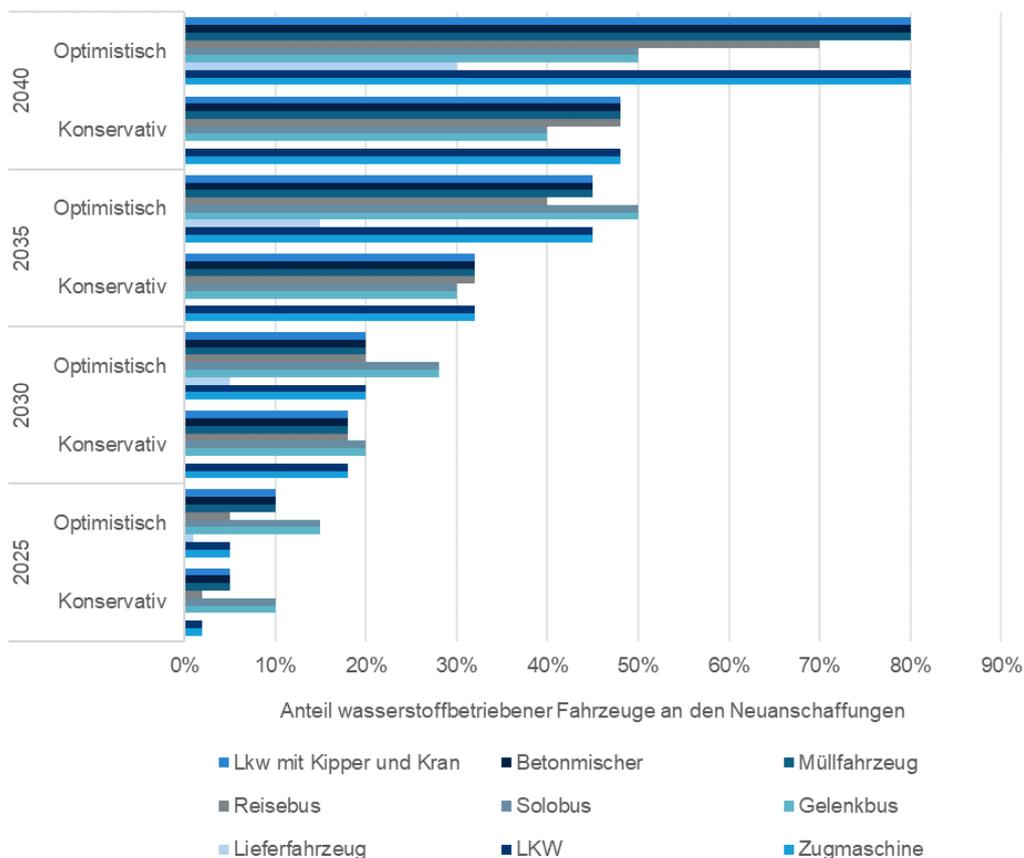


Abbildung 7: Anteil von Brennstoffzellenfahrzeugen an Neuanschaffungen pro Fahrzeugtyp im konservativen und optimistischen Szenario

Um in der Binnenschifffahrt nicht nur den altersbedingten Neukauf von Schiffen, sondern auch die Umrüstungen zu berücksichtigen, wurde an dieser Stelle in den Szenarien direkt der Anteil an der Gesamtflotte vorgegeben.

3.2.3.6. Entwicklung des Flottenanteils von Brennstoffzellenfahrzeugen

Auf Basis der Informationen über das Flottenalter wurden zusammen mit den in den Szenarien angenommenen Anteilen an wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen an den Neuanschaffungen die Flottenanteile für die wasserstoffbetriebenen Fahrzeuge berechnet. Hierzu wurden folgende Werte für Lebensdauer und Flottenalter auf Basis von Recherchen (insbesondere KBA) und den Partnerinformationen angenommen:

Tabelle 3: Informationen zum Flottenalter pro Fahrzeugtyp zur Modellierung der Flotteninvestitionen

Fahrzeug-klasse	Fahrzeugtyp	Durchschnittliche Lebensdauer [a]	Durchschnittliches Alter [a]
Transportfahrzeuge	Zugmaschine	17.5	14.95
	Lkw	10.0	8.10
	Lieferfahrzeug	12.0	7.00
Busse (ÖPNV)	Gelenkbus	12.0	8.50
	Solobus	12.0	8.50
Busse (ÖPFV)	Reisebus	5.0	2.50
Spezialfahrzeuge	Müllfahrzeug	10.0	5.00
	Kipper mit Kran	10.0	5.00
	Betonmischfahrzeug	10.0	5.00

Für die Partnerunternehmen wurde mit den partnerspezifischen Angaben zur durchschnittlichen Lebensdauer und zum durchschnittlichen Alter gerechnet.

3.2.3.7. Binnenschifffahrt: Zusätzliche Datenquellen für die Abschätzung des standortbezogenen Wasserstoffbedarfs

Zusätzlich zu der in Abschnitt 3.3.2.1. beschriebenen Ermittlung der Standorte wurde für die Binnenschifffahrt eine weitere externe Datenquellen berücksichtigt.

Hierbei handelte es sich um Daten des Durchgangsverkehrs der Schiffe an der Schleuse Kostheim, welche sich in der Nähe der Mündung des Rheins in den Main in Gustavsburg befindet. Dies ist eine der wenigen Schleusen auf dem Main, an der Statistiken des Durchfahrtverkehrs der Schiffe erhoben werden. Für das Jahr 2019 liegt hier die Anzahl der Durchfahrten pro Schiffstyp und Typ der Beladung in monatlicher Auflösung sowie die in diesem Jahr transportierte Gütermenge vor:

Tabelle 4: Schiffsdurchfahrten an der Schleuse Kostheim im Jahr 2019 nach Schiffstyp und Typ der Beladung

Jahr	2019			
	Fahrzeugart	beladen	leer	gesamt
Gütermotorschiff (GMS)		5.926	2.135	8.061
Tankmotorschiff (TMS)		2.579	2.238	4.817
Schubleichter (GSL)		1.013	418	1.431
Fahrgastkabinenschiff (FGKS)		1.122	126	1.248
Summe		10.640	4.917	15.557

Insgesamt wurde im Jahr 2019 im Durchfahrtsverkehr an der Schleuse Kostheim eine Gütermenge von 13.176.020 Tonnen transportiert. In der weiteren Berechnung wird angenommen, dass bis zu zwei Drittel, der die Schleuse Kostheim passierenden Schiffe ebenfalls die Binnenhäfen im Raum Frankfurt passieren. Zudem wird die Anzahl der Schiffe halbiert, um Doppelzählungen für Berg- und Talfahrt zu entfernen. Anhand von Tankgrößen und Verbrauchswerten aus der Studie „Strombasierte Kraftstoffe für Brennstoffzellen in der Binnenschifffahrt“¹ der NOW GmbH im Auftrag des BMVI wird dann durch jährliche Laufleistung und Wasserstoffverbrauch der Jahreswasserstoffbedarf berechnet.

Die Ergebnisse der Wasserstoffbedarfsrechnung sind in folgender Datei hinterlegt:

[MH2Regio_AP3.2_Wasserstoffbedarfsrechnung.xlsx](#)

3.2.4. Ergebnisse für die Stichtage 2025, 2030, 2035 und 2040

3.2.4.1. H₂-Hochlaufkurve pro Fahrzeugtyp und Szenario (Flottenanteile)

Unter Berücksichtigung des durchschnittlichen Flottenalters, der durchschnittlichen Lebensdauer und der Szenario spezifischen Anteile von Wasserstofffahrzeugen an den Neuanschaffungen, ergeben sich folgende Hochlaufkurven für die Anteile von Wasserstofffahrzeugen an der Gesamtflotte pro Fahrzeugtyp:

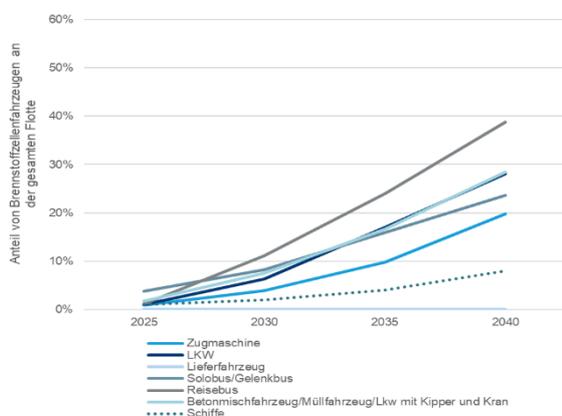


Abbildung 9: Flottenanteile konservatives Szenario

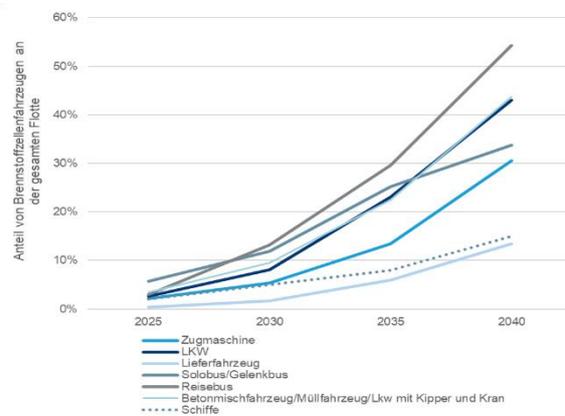


Abbildung 8: Flottenanteile optimistisches Szenario

¹ https://www.lbst.de/ressources/docs2019/LBST-DNVGL-IfS_2019_ShipFuel_Hintergrundbericht_NOW.pdf

Aus den berechneten Hochlaufkurven lässt sich erkennen:

- › Reisebusse erreichen aufgrund ihrer geringen Lebensdauer von nur 5 Jahren und dem damit verbundenen ständigen Austausch einen zügigen Hochlauf: Ihr Anteil liegt 2040 bei 40% bis 55%.
- › Der Einsatz von wasserstoffbetriebenen Bussen im ÖPNV steht im vollen Wettbewerb mit batteriebetriebenen Elektrobussen. Der Hochlauf wird hier sogar abgebremst und erreicht bis 2040 ein Niveau von ca. 25% (konservativ) bis ca. 35% (optimistisch).
- › Der Anteil von wasserstoffbetriebenen Lkws und Spezialfahrzeugen wächst überproportional. Ihr Anteil erreicht bis 2040 ca. 30% bis 45%.
- › Für Lieferfahrzeuge ist aufgrund des hauptsächlichen Einsatzes von batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen nur ein Anteil von bis zu 10% (optimistisches Szenario) realistisch.
- › Schiffe verzeichnen aufgrund ihrer hohen Lebensdauer und dem damit verbundenen langsamen Austausch der Flotte einen sehr langsamen Hochlauf und erreichen bis 2040 nur einen Anteil von bis zu 3% (optimistisches Szenario).

Für die Partnerunternehmen ergeben sich spezifische Hochlaufkurven, die die partnerspezifischen Angaben zum Flottenalter und zur durchschnittlichen Lebensdauer berücksichtigen. Für Schiffe wird der Hochlauf durch den Austausch einzelner Schiffe modelliert.

3.2.4.2. Wasserstoffbedarf in absoluten Zahlen

Die Wasserstoffbedarfsanalyse für das Rhein-Main-Gebiet zeigt kurz- und mittelfristig einen ausgewogenen Bedarf in den Bereichen Mobilität, Transportlogistik und Spezialanwendungen. Der jährliche Wasserstoffbedarf erreicht 2025 einen Wert zwischen 502 t und 1086 t (konservatives bzw. optimistisches Szenario). Dabei weisen die Partnerunternehmen insgesamt einen Bedarf von 154 t bis 357 t auf. Der restliche Bedarf entfällt auf das Umfeld.

Langfristig könnte der Wasserstoffbedarf im Bereich der Transportlogistik dominieren. Für das Jahr 2040 wird insgesamt ein Bedarf von 9026 t bis 13078 t (konservatives bzw. optimistisches Szenario) berechnet. Davon weisen die Partnerunternehmen einen Bedarf von 3823 t bis 4878 t aus.

Tabelle 5: Detaillierte Betrachtung des konservativen Szenarios

Wasserstoffverbrauch in Tonnen			2025	2030	2035	2040	
Partner	Mobilität	ÖPNV (Busse)	75	228	413	631	
		ÖPFV (Busse)	13	120	259	419	
	Logistik	Transportlogistik	32	297	613	968	
		Sonstige	Spezialanwendungen	34	950	1415	1799
			Binnenschifffahrt	0	7	7	7
<i>Partner</i>		<i>Insgesamt:</i>	<i>154</i>	<i>1602</i>	<i>2706</i>	<i>3823</i>	
Umfeld	Mobilität	ÖPNV (Busse)	96	207	401	594	
	Logistik	Transportlogistik	163	801	2031	3895	
	Sonstige	Binnenschifffahrt	89	179	357	714	
<i>Umfeld</i>		<i>Insgesamt:</i>	<i>348</i>	<i>1187</i>	<i>2788</i>	<i>5203</i>	
		Summen:	502	2789	5495	9026	

Tabelle 6: Detaillierte Betrachtung des optimistischen Szenarios

Wasserstoffverbrauch in Tonnen			2025	2030	2035	2040
Partner	Mobilität	ÖPNV (Busse)	113	325	644	893
		ÖPFV (Busse)	32	142	319	585
	Logistik	Transportlogistik	80	346	835	1553
	Sonstige	Spezialanwendungen	126	1166	1791	1819
		Binnenschifffahrt	7	7	27	27
<i>Partner</i>		<i>Insgesamt:</i>	<i>357</i>	<i>1986</i>	<i>3616</i>	<i>4878</i>
Umfeld	Mobilität	ÖPNV (Busse)	143	298	631	847
	Logistik	Transportlogistik	407	1085	2790	6015
	Sonstige	Binnenschifffahrt	179	446	714	1339
<i>Umfeld</i>		<i>Insgesamt:</i>	<i>729</i>	<i>1829</i>	<i>4135</i>	<i>8200</i>
		Summen:	1086	3815	7751	13078

3.2.4.3. Standortgenaue Visualisierung des Wasserstoffbedarfs in der Heatmap

Neben dem prognostizierten Wasserstoffbedarf über die nächsten Jahre wurde abschließend der Bedarf den einzelnen Standorten zugeordnet, sodass eine räumlich aufgelöste Heatmap entstand, die den jeweiligen Bedarf den einzelnen Standorten im Rhein-Main-Gebiet zuordnet. Dies ist neben der Abschätzung des absoluten Bedarfs der zweite Baustein zum Aufbau einer bedarfsgerechten Tankstelleninfrastruktur. Aus den Heatmaps der Jahre 2025, 2030, 2035 und 2040 (jeweils für das konservative und optimistische Szenario) lassen sich Rückschlüsse ziehen und effiziente Standorte für die Tankstelleninfrastruktur ableiten. Insbesondere geeignet sind solche Standorte, die bereits kurzfristig den lokalen Bedarf an Wasserstoff decken können, mittelfristig durch weitere zusätzliche Standorte sinnvoll erweitert werden können und langfristig zu größeren Standorten ausgebaut werden können.

Zur Unterscheidung zwischen den Partnerunternehmen (bei denen die Kooperation im Bereich Wasserstoff angestrebt ist) und den weiteren Unternehmen im Umfeld, wurden die Informationen als Heatmap in getrennten Ebenen dargestellt. Die Integration erfolgte innerhalb der uMap, die auch schon zur Visualisierung der Markt- und Projektaktivitäten Anwendung gefunden hat.

» *Partnerunternehmen* – In dieser Ebene wurden nur die von den Partnerunternehmen genannten Standorte angezeigt, alle Informationen und Annahmen zur Berechnung des potentiellen Wasserstoffbedarfs an diesen Standorten berufen sich auf spezifische Angaben der Partner.

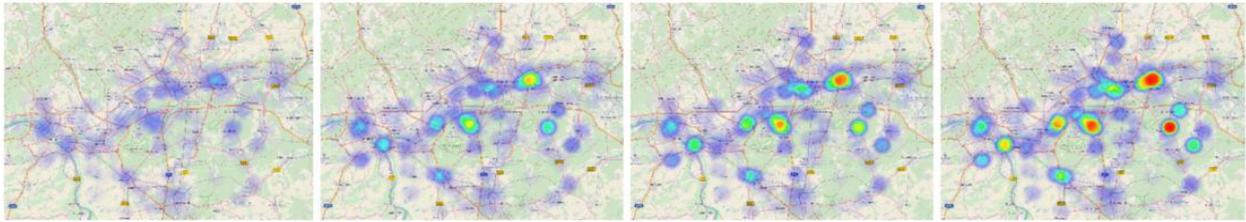
- › *Partner Konservativ 2025 / 2030 / 2035 / 2040*
- › *Partner Optimistisch 2025 / 2030 / 2035 / 2040*

» *Weitere Logistik- und Speditionsunternehmen im Rhein-Main-Gebiet* – In dieser Ebene wurden alle identifizierten Standorte von Logistik- und Speditionsunternehmen sowie von Busverkehrsdienstleistern, d.h. die jeweiligen Busdepots, im Rhein-Main-Gebiet angezeigt.

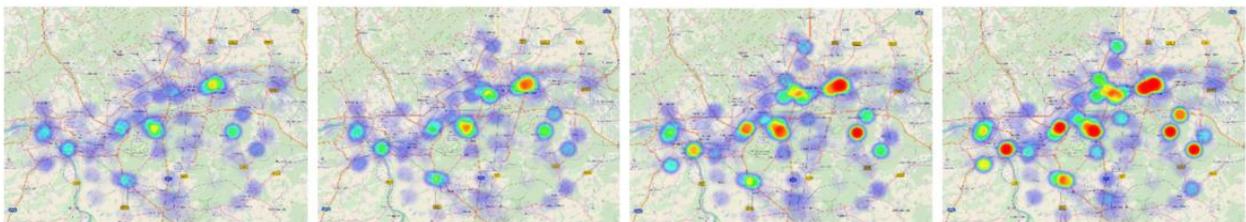
- › *Umfeld Konservativ 2025 / 2030 / 2035 / 2040*

› Umfeld Optimistisch 2025 / 2030 / 2035 / 2040

Konservatives Szenario



Optimistisches Szenario



2025

2030

2035

2040

Abbildung 10: Visualisierung H₂-Bedarf 2025 - 2040

Die Heatmaps wurden in der uMap interaktiv umgesetzt. Durch die Möglichkeit des Ein- oder Ausblendens von Ebenen kann der Benutzer das betrachtete Szenario und Jahr eigenständig auswählen. Das Hinein- und Herauszoomen ermöglicht eine detailliertere Analyse von Standorten.

Die uMap zur Wasserstoffbedarfsanalyse und Verkehrsaufkommen Analyse ist unter folgendem Link zu finden:

https://umap.openstreetmap.de/en/map/bedarfsanalyse-wasserstoff_10950

3.3. Analyse des Verkehrsaufkommen

In diesem Abschnitt wurde das Schwerlastverkehrsaufkommen auf den Hauptverkehrsachsen im Raum Frankfurt untersucht und der durch den Schwerlastverkehr entstehende Wasserstoffbedarf der jeweiligen Streckenabschnitte berechnet und zugeordnet. So ließen sich Streckenabschnitte identifizieren, die sich durch eine besonders hohe Nutzung durch BZ-Fahrzeuge auszeichnen und damit als potentielle Standorte für eine Wasserstofftankinfrastruktur eignen.

Der Fokus der Betrachtung lag auf den Bundesstraßen und Autobahnen im Raum Frankfurt. Zur besseren Beurteilung des Verkehrsaufkommens wurde zusätzlich in der Analyse nach den Richtungen der Verkehrsströme unterschieden, sodass signifikante Unterschiede in den Zu- und Abflussrichtungen erkannt werden können und wo diese vorliegen. Die Ergebnisse wurden als Wasserstoffbedarf in Tonnen pro Jahr und Streckenabschnitt berechnet. Hierbei wurde der in 3.3.2 modellierte Hochlauf für den Einsatz von Wasserstoff für die verschiedenen Fahrzeugtypen berücksichtigt und für die Stützjahre 2025, 2030, 2035 und 2040 sowie für das konservative und optimistische Szenario bestimmt. Die Ergebnisse wurden abschließend in einer farblich abgestuften Heatmap visualisiert und bewertet.

Die Berechnungen zur Verkehrsaufkommen Analyse sind in folgender Datei zu finden:

[MH2Regio_AP3.3_Verkehrsaufkommen_Analyse.xlsx](#)

3.3.1. Datengrundlage

Die Analyse des Verkehrsaufkommens basierte auf verkehrlichen Daten. Im Folgenden wird eine kurze Übersicht über die genutzten Datenquellen gegeben sowie der zur weiteren Analyse verwendete Datensatz beschrieben.

3.3.1.1. Verfügbare Verkehrsdaten

Zur Erhebung des Verkehrsaufkommens können je nach Anwendungszweck und Verfügbarkeit verschiedene Daten verwendet werden, wie z.B. Verkehrszählungen, Fahrzeughalterbefragungen oder auch Tachostände, welche im Rahmen von Hauptuntersuchungen erfasst werden.

Für den vorliegenden Anwendungsfall der Analyse des Schwerlastverkehrsaufkommens auf den Autobahnen und Bundesstraßen im Raum Frankfurt eignete sich insbesondere die Verwendung von Daten aus Straßenverkehrszählungen, d.h. aus einer automatisierten Erfassung der Anzahl der Kraftfahrzeuge je Zeiteinheit, Fahrzeugtyp und Streckenabschnitt. Damit ließ sich das Verkehrsaufkommen streckenabschnittsgenau analysieren.

In Deutschland sind auf Autobahnen und außerörtlichen Bundesstraßen automatische Zählstellen installiert, die permanent alle Fahrzeuge zählen und je nach eingesetztem Gerätetyp bis zu neun Fahrzeugtypen unterscheiden können, sogenannte Klassifizierung gemäß TLS 8+1. Die Daten werden von den Bundesländern erhoben und quartalsweise an die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) weitergeleitet. Aus den an den Zählstellen stündlich erfassten Daten werden von der BASt dann Jahresfahrleistungen sowie durchschnittliche tägliche Verkehrsstärken (DTV), d.h. die durchschnittliche Anzahl der Fahrzeuge in 24 Stunden, berechnet. Das Zählstellennetz in Deutschland umfasst insgesamt 1.914 automatische Zählstellen, davon befinden sich 1.124 auf Autobahnen und 790 auf Bundesstraßen. In der folgenden Abbildung wurden die Standorte der Zählstellen im Rhein-Main-Gebiet dargestellt. Diese Daten stehen auf der Webseite² der BASt zum Abruf zur Verfügung.

² https://www.bast.de/BASt_2017/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/v2-verkehrszaehlung/Aktuell/zaehl_aktuell_node.html

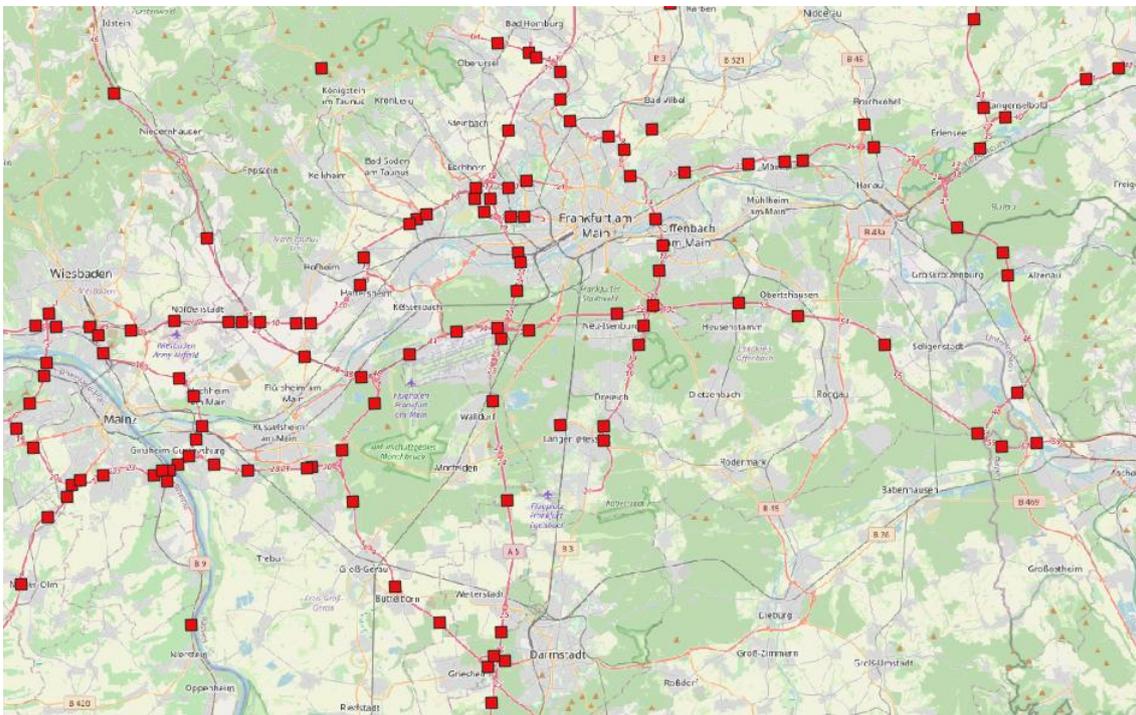


Abbildung 11: Die Standorte der Zählstellen der BASt im Rhein-Main-Gebiet (eigene Darstellung in QGIS)

Im Rahmen der Datenrecherche wurde zusätzlich zusammen mit der Projektleitung das Verkehrsdezernat der Stadt Frankfurt kontaktiert und Daten zum Schwerlastverkehrsaufkommen angefragt. Die Stadt Frankfurt bezieht Daten über den Schwerlastverkehr im Stadtgebiet ebenfalls über automatische Zählstellen von der Autobahn GmbH (ehemals Hessen Mobil). Eine erste Analyse der Messpunkte zeigte, dass die Daten der Stadt Frankfurt zusätzlich zu den Messpunkten der BASt gelten und weitere Messpunkte, insbesondere die Zubringerabschnitte zwischen dem Stadtgebiet und den umschließenden Autobahnen, enthalten (vgl. Abbildung).

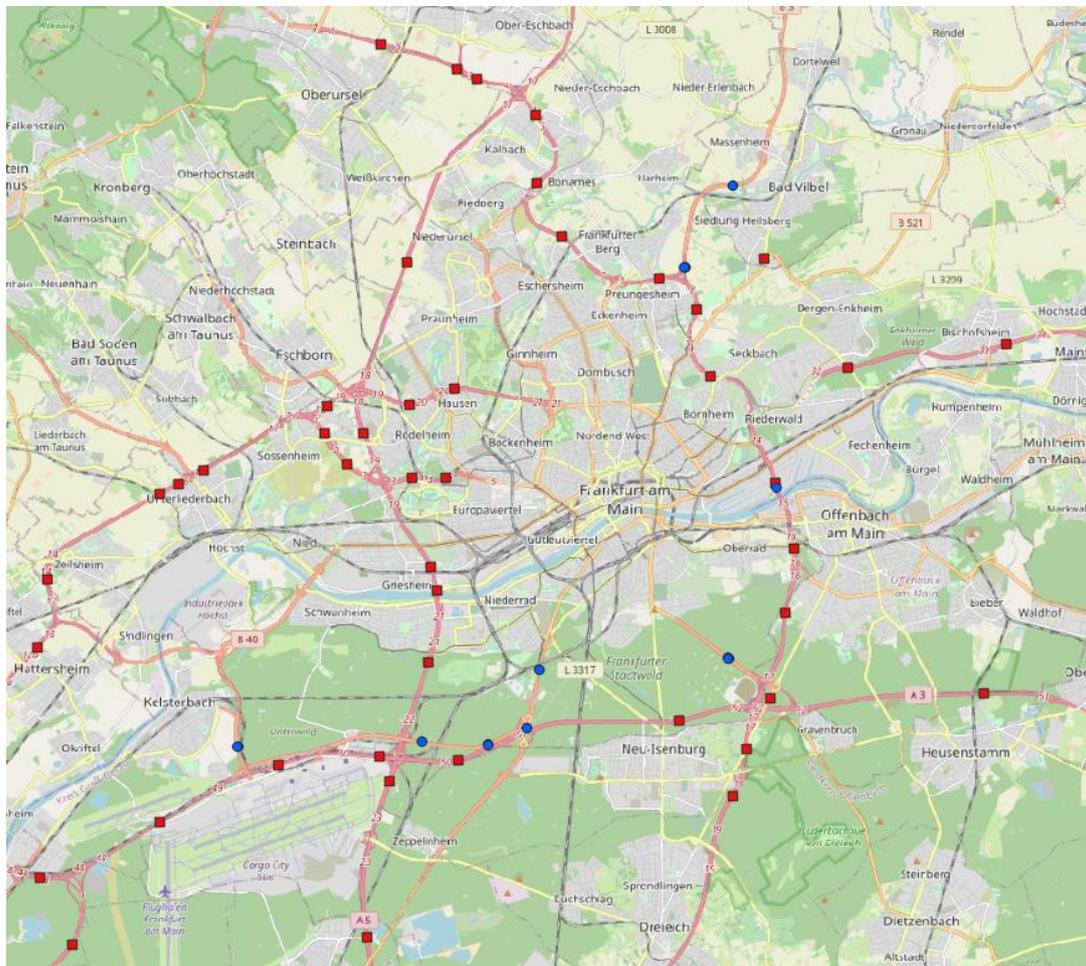


Abbildung 12: Die Standorte der Zählstellen der BASt (rot) sowie die zusätzlichen Zählstellen (blau) der Autobahn GmbH (eigene Darstellung in QGIS)

Diese zusätzlichen Daten stammten von der Autobahn GmbH. Die enthaltenen Zählstellen deckten die Streckenabschnitte der B43 und B44 beim Flughafen sowie die Zufahrten nach Frankfurt auf der B3 aus dem Süden sowie aus dem Norden ab. Jede Zählstelle erfasst die Daten in beide Straßenrichtungen und die Zählstellen auf der B3 erfassen zusätzlich Daten auf den Zu- und Abfahrten. Es können zwei verschiedene Fahrzeugtypen klassifiziert werden, d.h. die Klassifizierung erfolgt gemäß Erfassungsart TLS 2.

3.3.1.2. Beschreibung des BASt-Datensatzes

Auf der Webseite der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) sind die Verkehrsdaten für die Jahre 2003 bis 2018 verfügbar. Im Rahmen des Projektes wurde festgelegt, den aktuellsten Datensatz aus 2018 für die Analyse des Schwerlastverkehrs zu verwenden. In diesem Datensatz wurden alle Sensoren bzw. Zählstellen der BASt in ganz Deutschland mit weiteren technischen und geografischen Informationen sowie dem jeweiligen Verkehrsaufkommen aufgelistet. Die Verkehrsdaten können nach Bundesland, Straßenklasse, Straßennummer, Kfz-Verkehr, Schwerverkehr und so weiter gefiltert werden. Die Datensätze können direkt von der Webseite im CSV-Format exportiert werden.

Der Datensatz enthält 97 Attribute, in denen alle Informationen zu den jeweiligen Zählstellen aufgelistet sind. Eine genaue Dokumentation der Attribute steht auf der Webseite der BAST als PDF³ ebenfalls zur Verfügung. Jede Zählstelle erfasst die Daten unabhängig in beide Straßenrichtungen. Dabei wurden die Zählstellen gemäß TLS (Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen) in vier verschiedenen Erfassungsarten klassifiziert (1, 2, 5+1 und 8+1). Die Klassifikation der Zählstelle gibt an, wie viele Fahrzeugtypen bei der Zählung unterschieden werden können. Die folgende Abbildung zeigt die unterschiedlichen Fahrzeugtypen gemäß der TLS-Klassifizierung.

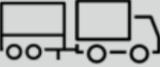
1	2	5+1	8+1	Piktogramm
Kfz	Pkw-ähnlich	Nicht klassifizierbare Kfz	Nicht klassifizierbare Kfz	
		Pkw-Gruppe	Motorräder	
			Pkw o. Anhänger	
			Lieferwagen o. Anhänger	
	Lkw-ähnlich	Pkw mit Anhänger	Pkw mit Anhänger	
		Lkw > 3,5t o. Anhänger	Lkw > 3,5t o. Anhänger	
		Lkw > 3.5t m. Anhänger / Sattelkraftfahrzeuge	Lkw > 3.5t m. Anhänger	
			Sattelkraftfahrzeuge	
		Busse	Busse	

Abbildung 13: Erfassung der Fahrzeuge nach TLS basierend BAST. In Rot die Schwerlastverkehrsklassen.

Im Rahmen des Projektes war insbesondere der Lieferverkehr (Lieferwagen o. Anhänger) in der Pkw-Gruppe bzw. der Pkw-ähnlichen Kfz sowie die LKW o. und m. Anhänger, die Sattelkraftfahrzeuge und die Busse in den Lkw-ähnlichen Kfz interessant.

In dem Datensatz wurde des Weiteren nach dem sogenannten Schwerverkehr (SV) unterschieden, insbesondere die durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke des Schwerlastverkehrs (DTV_SV). Der Schwerlastverkehr umfasst nach Definition die Fahrzeugtypen Lkw (> 3,5t) ohne und mit Anhänger, Sattelkraftfahrzeuge sowie Busse und kann daher nur in den Erfassungsarten 5+1 und 8+1 trennscharf angegeben werden. Zählstellen, die gemäß TLS 1 oder 2 erfassen, enthalten demnach keine gesonderten Informationen zum Schwerlastverkehr, sondern nur die durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke aller Kfz (DTV_Kfz).

³ https://www.bast.de/BAST_2017/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/v2-verkehrszaehlung/pdf-dateien/abkuerzungen.pdf?__blob=publicationFile&v=7

3.3.1.3. Beschreibung der zusätzlichen Daten der Autobahn GmbH

Der Datensatz der Autobahn GmbH enthielt die erfassten Daten für das Jahr 2018. Die Zählstellen entsprachen der Erfassungsart TLS 2 und konnten somit, wie oben beschrieben, nur zwei verschiedene Fahrzeugtypen voneinander unterscheiden. Der Datensatz beinhaltete den Namen der jeweiligen Zählstelle, das Erfassungsdatum, die Anzahl der an dem Datum erfassten KFZ sowie die Anzahl der erfassten Fahrzeuge des SV. Die Daten für die beiden Straßenrichtungen wurden getrennt voneinander aufgelistet, so dass der Name der jeweiligen Zählstelle aus dem Standort sowie der jeweiligen Himmelsrichtung (N bzw. S) besteht. Durch Aggregation der Daten, konnte für jede Zählstelle ein Durchschnittswert der täglichen Verkehrsstärke (DTV) für alle KFZ sowie für den SV berechnet werden. Weitere Informationen zu weiteren Streckenabschnitten der Bundesstraßen konnten durch die Autobahn GmbH nicht bereitgestellt werden.

3.3.1.4. Datenaufbereitung

Da das Gebiet der verkehrlichen Analyse auf die Hauptverkehrsachsen im Raum Frankfurt begrenzt war, wurde in einem ersten Schritt eine geografische Filterung nach den Zählstellen in diesem Gebiet vorgenommen. Dazu wurde jedem Datensatz das Attribut „Flag Frankfurt“ hinzugefügt, welchem der Wert 1 zugewiesen wurde, falls die Zählstelle im betrachteten Raum Frankfurt lag, und 0, falls sie außerhalb lag. Der Raum Frankfurt wird begrenzt von den Autobahnen A3 im Süden, A5 im Westen und A661 im Osten. Die Zufahrt der A66 sowie die Strecke der A3 bis zum Flughafen wurden als wichtige Verkehrsachsen zusätzlich berücksichtigt. Um verkehrliche Zu- und Abflüsse an den Autobahnkreuzen und -dreiecken ebenfalls in der Analyse abzubilden, wurde sichergestellt, dass jeweils mindestens die nächstgelegene Zählstelle in jede Richtung berücksichtigt war.

Anschließend wurde für jede Zählstelle jeweils die nächste Zählstelle im Sinne des Verkehrsflusses auf direkter Linie der beiden Richtungen identifiziert. Die Nummer der nächstgelegenen Zählstellen wurden dem Datensatz als Attribute „Nachfolger Richtung 1“ und „Nachfolger Richtung 2“ hinzugefügt. Für die Identifikation diente das Attribut „Geo_Sequenz“, das die Reihenfolge der Zählstellen je Straße angibt. Die Nachfolger der Zählstellen am Ende eines Autobahndreiecks oder auf Bundesstraßen ohne direkten Nachfolger wurden manuell zugeordnet. Zur Identifikation und Analyse diente wiederum eine Visualisierung der Standorte der Zählstellen mit dem Open-Source-Programm QGIS.

Zusätzlich wurde die Länge der Strecke zwischen den Zählstellen und ihren jeweiligen Nachfolgern ermittelt. Dies diente der späteren Berechnung der Fahrleistung aus der Anzahl der Fahrzeuge und der Länge der gefahrenen Strecke bis zur nächsten Zählstelle. Da sich im Datensatz keine weiteren Informationen zu den Distanzen zwischen den Zählstellen befanden, wurden die Distanzen manuell in QGIS ermittelt.

Im Datensatz existierten wenige Zählstellen, zu denen die relevanten Attribute nicht gefüllt waren, also weder Angaben zum täglichen durchschnittlichen Kfz-Aufkommen noch zum SV-Aufkommen vorhanden waren. Diese Zählstellen wurden als fehlerhafte Datensätze angesehen, aus der Auswertung herausgenommen und im Folgenden nicht weiter betrachtet.

3.3.2. Modellierung des Wasserstoffbedarfs auf Basis der verkehrlichen Analyse

In diesem Abschnitt wurden alle Annahmen, welche der Abschätzung des Wasserstoffbedarfs des Schwerlastverkehrs zugrunde gelegt wurden, zusammengestellt und näher beschrieben. Die Grundlagen einiger der Annahmen, wie z.B. der prognostizierte Wasserstoffverbrauch oder die Hochlaufkurve pro Fahrzeugtyp, wurde bereits in AP 4.2. erarbeitet, sodass hier die Ergebnisse direkt verwendet wurden, um Konsistenz sicherzustellen.

3.3.2.1. Berücksichtigte Fahrzeugtypen

Wie bereits in der Beschreibung des Datensatzes erwähnt, können Verkehrszählstellen je nach Ausstattung Fahrzeugtypen unterschiedlich gut erfassen und unterscheiden. Da die meisten der im Rhein-Main-Gebiet installierten Zählstellen mit der Erfassungsart TLS 8+1 ausgestattet sind, d.h. 9 unterschiedliche Fahrzeugtypen erfassen können, konnte in der weiteren Analyse ebenfalls diese granulare Datenbasis verwendet werden. Mit Fokus auf den Schwerlastverkehr ergaben sich somit folgende Fahrzeugtypen, die in der verkehrlichen Analyse berücksichtigt wurden:

- » **Lieferfahrzeug** (Fahrzeugklasse „Lieferwagen o. Anhänger“ nach TLS 8+1, keine gesonderte Unterscheidung nach TLS 5+1 gegeben),
- » **Lkw** (Fahrzeugklasse „LKW > 3.5t o. und m. Anhänger“ nach TLS 8+1 bzw. „LKW > 3,5 o. Anhänger nach TLS 5+1“),
- » **Zugmaschine** (Fahrzeugklasse „Sattelkraftfahrzeuge“ nach TLS 8+1 bzw. „Lkw > 3.5t m Anhänger/Sattelkraftfahrzeuge“ nach TLS 5+1), und
- » **Bus/Reisebus** (Fahrzeugklasse „Busse“ nach TLS 5+1 und 8+1).

Hierbei ist zu beachten, dass Lieferfahrzeuge im Sinne der Erfassung der BASt nicht zum Schwerlastverkehr zählt. In der Analyse wurden diese allerdings – wie bereits zuvor schon in AP 4.2. – als Fahrzeugtyp im Logistiksektor berücksichtigt. In der Fahrzeugklasse „Busse“ fand keine weitere Differenzierung nach Bussen im ÖPNV (Solo-/Gelenkbusse) oder im Fernverkehr (Reisebusse) statt.

3.3.2.2. Berechnung der Verkehrsstärke je Fahrzeugtyp und Richtung

Zunächst wurde die Verkehrsleistung pro Streckenabschnitt, Richtung und Fahrzeugtyp auf Basis der durchschnittlichen täglichen Verkehrsstärke (DTV) bestimmt.

Bei Zählstellen gemäß der Erfassungsarten TLS 8+1 und 5+1 waren die prozentualen Anteile der jeweiligen Fahrzeugtypen in dem Datensatz hinterlegt (Fahrzeugtyp_MobisSo_Q). Für Zählstellen der Erfassungsart TLS 1 und 2 waren diese spezifischen Daten pro Fahrzeugtyp nicht verfügbar. Für diese Zählstellen wurden die fahrzeugspezifischen Anteile auf Basis der benachbarten Zählstellen approximiert.

Die Mehrheit der in der Auswertung betrachteten Zählstellen besaßen die Erfassungsart TLS 8+1. Um die durchschnittlichen täglichen Verkehrsstärken (DTV) für die jeweiligen Fahrzeugtypen zu erhalten, wurde der prozentuale Anteil des Fahrzeugtyps (Feld: *Fahrzeugtyp_MobisSo_Q*) mit der DTV aller Kfz in beide Richtungen (DTV_Kfz_MobisSo_Q) multipliziert. Zur Aufteilung des Verkehrs in beide Richtungen wurden die Daten zum Schwerlastverkehr (SV) herangezogen. In dem Datensatz war der Anteil der Fahrzeuge, die zum SV gehören, in Richtung 1 und Richtung 2 angegeben. Damit ließ sich der prozentuale Anteil der SV in Richtung 1 und Richtung 2 bestimmen. Multipliziert man anschließend die DTV des Fahrzeugtyps

mit dem prozentualen Anteil des SV beider Richtungen, so erhält man die durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke des betrachteten Fahrzeugtyps in Richtung 1 und 2.

Mit den dazugehörigen Attributen im Datensatz erhält man folgende Formel:

$$DTV_Fahrzeugtyp_MobisSo_Ri\ k = \frac{DTV_Kfz_MobisSo_Ri\ k}{DTV_Kfz_MobisSo_Q} \times DTV_Kfz_MobisSo_Ri\ k \times Fahrzeugtyp_MobisSo_Q, \quad k \in \{1,2\}$$

Da die Lieferwagen nicht zum SV gehören, wurde für diesen Fahrzeugtyp der Anteil der gesamten Kraftfahrzeuge in Richtung 1 bzw. 2 multipliziert mit der DTV der Lieferfahrzeuge. Damit ergab sich die Formel:

$$DTV_Lfw_MobisSo_Ri\ k = DTV_Kfz_MobisSo_Ri\ k \times pLfw_MobisSo_Q, \quad k \in \{1,2\}.$$

3.3.2.3. Korrekturen für Zählstellen mit Erfassungsart TLS1 und TLS2

Bei Zählstellen der Erfassungsart TLS 1 wurde nicht zwischen SV und Nicht-SV unterschieden, sodass nur gesamt Kfz-Verkehrsstärken vorlagen. Für diese Art von Sensoren wurde zunächst der Anteil des SV approximiert. Dies erfolgte durch Mitteln des SV-Anteils an der DTV an den nächstgelegenen Zählstellen jeweils in Richtung 1 und Richtung 2. Somit wurde der Wert $DTV_SV_MobisSo_Q$ approximiert. Dies betraf eine von 88 Zählstellen.

Bei Zählstellen der Erfassungsart TLS 2 waren die Daten des SV in Richtung 1 sowie Richtung 2 enthalten. Die prozentualen Anteile der jeweiligen Fahrzeugtypen waren hingegen nicht angegeben. Der Anteil der DTV der jeweiligen Fahrzeugtypen an der DTV aller Kfz wurde wiederum anhand der nächstgelegenen Zählstellen Erfassungsart TLS 8+1 bzw. 5+1 approximiert. Das Vorgehen war für Zählstellen der Erfassungsart TLS 2 sowie Zählstellen der Erfassungsart TLS 1 mit bereits approximierten SV-Daten identisch. Dies betraf 7 von 88 Zählstellen.

Es wurden drei verschiedene Fälle zur Approximation unterschieden:

- » **Beide Nachfolger** (Richtung 1 und Richtung 2) sind Zählstellen mit Erfassungsart TLS 8+1 bzw. 5+1. In diesem Fall wird über die Anteile der jeweiligen Fahrzeugtypen gemittelt, um den Anteil für die Zählstelle ohne Daten der Anteile zu approximieren. Die zugehörige Formel lautet:

$$Fahrzeugtyp_MobisSo_Q = \frac{Fahrzeugtyp_MobisSo_Q_{Nachfolger\ Ri\ 1} + Fahrzeugtyp_MobisSo_Q_{Nachfolger\ Ri\ 2}}{2}$$

- » **Ein Nachfolger** (Richtung 1 oder Richtung 2) ist eine Zählstelle mit Erfassungsart TLS 8+1 bzw. 5+1. In diesem Fall werden die Anteile der jeweiligen Fahrzeugtypen von der nachfolgenden Zählstelle mit Erfassungsart TLS 8+1 bzw. 5+1 übernommen und fortgeschrieben.
- » **Kein Nachfolger** ist eine Zählstelle mit Erfassungsart TLS 8+1 bzw. 5+1. In diesem Fall werden die Daten, der am nächsten auf der Straße liegenden Zählstellen verwendet, welche nach Erfassungsart TLS 8+1 bzw. 5+1 arbeiten. Das bedeutet, man verwendet die nächstgelegene Zählstelle nach Erfassungsart 5+1 oder 8+1. Sollte in beide Richtungen eine entsprechende Zählstelle vorhanden sein, so werden die Daten analog zu oben gemittelt und ansonsten fortgeschrieben.

In allen Fällen erhielt man einen approximierten prozentualen Anteil des jeweiligen Fahrzeugtyps. Anschließend ermittelte man anhand der gegebenen Daten zum SV bzw. für alle Kfz mittels obiger Gleichungen die DTV jedes der Fahrzeugtypen in Richtung 1 und Richtung 2.

3.3.2.4. Berechnung der Verkehrsleistung pro Streckenabschnitt und Fahrzeugtyp

Das Ziel der Analyse war die verkehrliche Leistung durch BZ-Fahrzeuge je Streckenabschnitt zu bestimmen, um so Rückschlüsse auf geeignete Standorte für Wasserstofftankstellen zu gewinnen.

Daher wurde im nächsten Schritt die Verkehrsleistung pro Streckenabschnitt und Fahrzeugtyp bestimmt. Die Verkehrsleistung der beiden Richtungen pro Streckenabschnitt wurde dabei addiert, da die Daten der Analyse keinen relevanten Effekt des Richtungsanteils zeigten, d.h. die Richtungsanteile im SV sind typischerweise in einer Verteilung von 48% zu 52% und nur in Einzelfällen im größeren Bereich von 40% zu 60% (betraf 3 von 88 Zählstationen).

Zur Bestimmung der Verkehrsleistung je Fahrzeugtyp und Streckenabschnitt wurden die Daten der beiden begrenzenden Zählstellen herangezogen. Die DTVs in Richtung 1 waren dann gegeben durch die erste Zählstelle und die DTVs in Richtung 2 des Streckenabschnitts durch die DTVs der zweiten Zählstelle. Mittels Multiplikation der durchschnittlichen täglichen Verkehrsstärken je Fahrzeugtyp (Anzahl Fahrzeuge) mit der Streckenlänge (in km) ergab sich die Verkehrsleistung je Fahrzeugtyp in km auf dem betrachteten Streckenabschnitt.

Dies wird im folgenden Beispiel des Streckenabschnitts Frankfurt Bonames – Niedereschbach illustriert. In diesem Fall entspricht die Richtung 1 der Richtung N-Bad Homburg und die Richtung 2 der Richtung S-Darmstadt.



Abbildung 14: Berechnung der durchschnittlichen täglichen Verkehrsstärke am Beispiel der Strecke Frankfurt Bonames - Niedereschbach

Mittels Summation über die betrachteten Fahrzeugtypen ergab sich die Verkehrsleistung für den betrachteten Schwerlastverkehr und Busverkehr insgesamt. Dies ist den Spalten AL bis AW in dem zugehörigen Excel-Sheet berechnet – sowohl für die einzelnen Fahrzeugtypen als auch als Summe über alle Fahrzeugtypen.

3.3.2.5. Kraftstoffverbrauch pro Fahrzeug

Für die Ermittlung des Wasserstoffverbrauchs von Brennstoffzellenfahrzeugen für verschiedene Fahrzeugtypen wurde in AP 4.2. bereits eine umfangreiche Analyse des Kraftstoffverbrauchs über verschiedene Antriebsarten und Kraftstoffe hinweg durchgeführt. Auf die dort ermittelten Verbrauchswerte für Brennstoffzellenfahrzeuge wurde an dieser Stelle zurückgegriffen.

Die nachfolgende Tabelle fasst die H₂-Kraftstoffverbruachswerte für die relevanten Fahrzeugtypen nochmals zusammen. Im Falle der Busse wurden die Verbrauchswerte der Reisebusse herangezogen, da diese den Busverkehr auf der Autobahn besser abbilden als die im Stadtverkehr eingesetzten Solo- und Gelenkbusse für den ÖPNV.

Tabelle 7: H₂-Kraftstoffverbrauch in kg je 100 km für verschiedene Fahrzeugtypen

Fahrzeugtyp	Datenpunkte [#]	H ₂ -Kraftstoffverbrauch in kg/100km		
		Quantil 25 %	Median	Quantil 75 %
Zugmaschine	3	7,00	8,01	8,29
Lkw	9	6,35	7,50	8,02
Lieferfahrzeug	2	1,22	1,25	1,27
Reisebus	0	-	7,37	-

Für die weitere Bedarfsanalyse wurden die Median-Werte herangezogen und als Verbrauchswerte der in der verkehrlichen Analyse betrachteten Fahrzeugtypen verwendet.

3.3.2.6. Wasserstoffbedarf zur Deckung der Verkehrsleistung je Streckenabschnitt

Der Jahreswasserstoffbedarf zur Deckung der Verkehrsleistung je Streckenabschnitt lässt sich abschließend durch Multiplikation der (Szenario- und stützjahrabhängigen) Flottenanteile von Brennstoffzellenfahrzeugen je Fahrzeugtyp, der jährlichen durchschnittlichen Verkehrsleistung je Fahrzeugtyp (vgl. oben) und des Wasserstoffverbrauchs je Fahrzeugtyp bestimmen.

Durch Summation über die betrachteten Fahrzeugtypen errechnet sich so der jährliche Wasserstoffbedarf je Streckenabschnitt unter Betrachtung des konservativen und optimistischen Szenarios für die Stützjahre. Diese Berechnung wurde in den Spalten CD bis CK und CM bis CT durchgeführt, wobei erstere den normierten Wasserstoffbedarf pro Kilometer Streckenlänge für die jeweilige Strecke berechnet und die zweite Berechnung den Wasserstoffbedarf für die verkehrliche Leistung auf der jeweiligen Strecke insgesamt berechnet. Zusätzlich wurde für das Stützjahr 2040 der Wasserstoffbedarf je Fahrzeugtyp genau ermittelt, um Unterschiede in der Verteilung bestimmter Fahrzeugtypen zu analysieren.

3.3.2.7. Güterbinnenschifffahrt

Zusätzlich zum Straßenverkehr wurde auch der Binnenschiffsverkehr im Raum Frankfurt in der verkehrlichen Analyse betrachtet, da auch im Bereich der Schifffahrt alternative Antriebe, darunter insbesondere Wasserstoff, eine immer größere Rolle einnehmen. Die in der Analyse betrachtete Binnenwasserstraße begrenzt sich auf die ca. 9,5 km lange Strecke auf dem Main von der Alten Niederräder Brücke bis hin

zum Frankfurter Osthafen. Für diesen Abschnitt des Mains wurde der Durchgangsverkehr analysiert, um den potentiellen Bedarf an Wasserstoff für Schiffsbetankungen zu ermitteln.



Abbildung 15: Main-Abschnitt zur Analyse des Binnenschiffsverkehrs

Zur Analyse des Binnenschiffverkehrs auf diesem Abschnitt des Mains werden zwei Quellen bzgl. Anzahl der Schiffsfahrten, Verkehrsleistungen und transportierter Gütermenge betrachtet, um abschließend mit fundierten Daten arbeiten zu können.

Daten und Fakten 2019/2020 des Bundesverbands für deutsche Binnenschifffahrt e.V.

Der Bundesverband für deutsche Binnenschifffahrt e.V. (BDB) erstellt jährlich eine Übersicht mit Daten und Fakten zur Binnenschifffahrt in Deutschland, welche Verkehrsleistungen sowie transportierte Gütermengen pro Wasserstraße enthält. Anhand der Veröffentlichung für das Jahr 2019⁴ kann somit die Anzahl der jährlichen Schiffsfahrten auf dem Main abgeschätzt werden. Über die Länge des Streckenabschnitts von ca. 9,5 km können so die auf diesem Abschnitt gefahrenen Tonnenkilometer innerhalb eines Jahres berechnet werden. Für den Abschnitt des Mains von der Alten Niederräder Brücke bis hin zum Frankfurter Osthafen ergibt sich somit für das Jahr 2019 eine Verkehrsleistung von 79,94 Mio. Tonnenkilometern.

Daten zum Durchgangsverkehr an der Schleuse Kostheim in Gustavsburg

Zusätzlich können Daten des Durchgangsverkehrs der Schiffe an der Schleuse Kostheim in Gustavsburg betrachtet werden. Hier liegen Daten zum Fracht- und Fahrgastschiffsverkehr für das Jahr 2019 in monatlicher Auflösung vor. Für das Jahr 2019 ergaben sich an der Schleuse Kostheim folgende Durchfahrten pro Schiffstyp und Typ der Beladung:

⁴ https://www.binnenschiff.de/wp-content/uploads/2020/11/Daten-Fakten_2019-20_final.pdf

Tabelle 8: Schiffsdurchfahrten an der Schleuse Kostheim im Jahr 2019 nach Schiffstyp und Typ der Beladung

Jahr	2019			
	Fahrzeugart	beladen	leer	gesamt
Gütermotorschiff (GMS)		5.926	2.135	8.061
Tankmotorschiff (TMS)		2.579	2.238	4.817
Schubleichter (GSL)		1.013	418	1.431
Fahrgastkabinenschiff (FGKS)		1.122	126	1.248
Summe		10.640	4.917	15.557

Insgesamt wurde im Jahr 2019 im Durchfahrtsverkehr an der Schleuse Kostheim eine Gütermenge von 13,2 Mio Tonnen transportiert. Unter der Annahme, dass bis zu zwei Drittel der die Schleuse Kostheim passierenden Schiffe ebenfalls den in der Analyse betrachteten Abschnitt des Mains von der Alten Niederäder Brücke bis hin zum Frankfurter Osthafen passieren, ergab sich somit für das Jahr 2019 eine Verkehrsleistung von 83,4 Mio. Tonnenkilometern.

Berechnung des Jahreswasserstoffbedarfs für die Binnenschifffahrt

Für die Binnenschifffahrt wurde insgesamt eine langsame Hochlaufkurve an BZ-Schiffen festgelegt. Diese begründet sich durch die Langlebigkeit der eingesetzten Schiffe und der aktuell noch geringen Marktverfügbarkeit.

Tabelle 9: Anzahl BZ-Schiffe an der Gesamtflotte

Anteil von BZ-Schiffen an der Gesamtflotte Konservatives Szenario				Anteil von BZ-Schiffen an der Gesamtflotte Optimistisches Szenario			
2025	2030	2035	2040	2025	2030	2035	2040
1%	2%	4%	8%	2%	5%	8%	15%

Durch Multiplikation mit dem Wasserstoffverbrauch pro Tonnenkilometer und dem Anteil von Wasserstoffschiffen an der gesamten Flotte konnten somit Jahreswasserstoffbedarfswerte in Tonnen pro Stützjahr für die beiden Szenarien berechnet werden.

Aufgrund der geringen Datenverfügbarkeit wurden die beiden Datenquellen zunächst getrennt betrachtet und anschließend der Mittelwert zwischen den beiden Datenquellen für die Festlegung der Szenariowerte bestimmt, vgl. auch Darstellung im Tab „3-Binnengüterschifffahrt“ in der zugehörigen Excel-Datei.

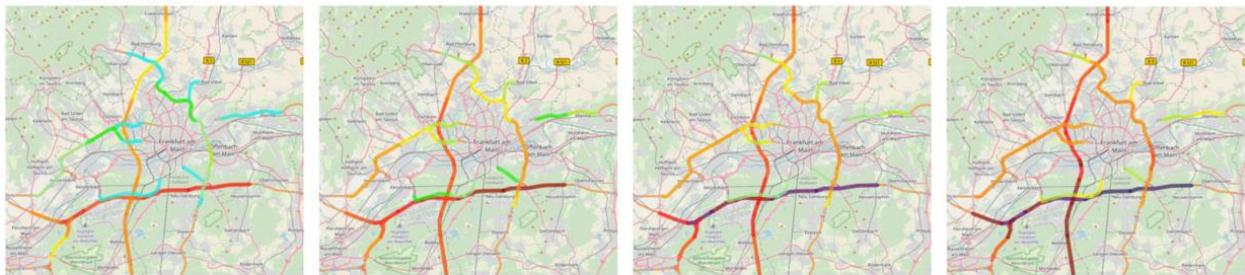
3.3.3. Ergebnisse für die Stichtage 2025, 2030, 2035 und 2040

3.3.3.1. Grafische Darstellung der streckenabschnittsbezogenen Wasserstoffnachfrage unter Berücksichtigung der Hochlaufszenerarien

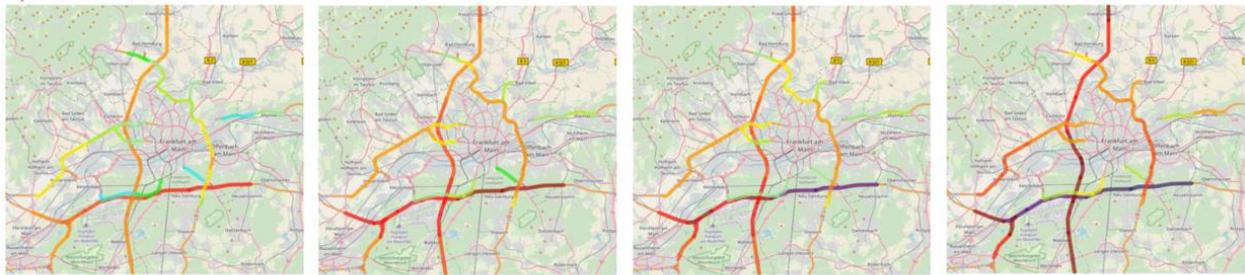
Die in den vorherigen Kapiteln beschriebene Methodik lieferte als Ergebnis für die Hauptverkehrsachsen im Raum Frankfurt den Wasserstoffverbrauch des Schwerlastverkehrs pro Streckenabschnitt für die Stützjahre 2025, 2030, 2035 und 2040. Die Aufteilung in Streckenabschnitte ermöglichte es, auf einer granularen Ebene Abschnitte zu identifizieren, die für die Installation von Wasserstofftankstellen geeignet erscheinen.

In der gesamtheitlichen Betrachtung zeigte die im Frankfurter Süden verlaufende A3 auf der West-Ost-Achse gefolgt von der Autobahn A5 auf der Nord-Süd-Achse die größten Verkehrsstärken im Bereich des Schwerlastverkehrs auf. In der detaillierten Betrachtung ergaben sich auch auf diesen beiden Streckenabschnitten zusätzlich noch Bereiche, die sich besonders für die Installation von Wasserstofftankstellen eignen.

Konservatives Szenario



Optimistisches Szenario



2025

2030

2035

2040

Abbildung 16: Entwicklung des Wasserstoffbedarfs auf den Hauptverkehrsachsen

3.3.3.2. Ergebnisse für den Liefer- und Schwerlastverkehr

Die Modellierung des Jahreswasserstoffbedarfs für die verkehrliche Leistung des Liefer- und Schwerlastverkehrs im Raum Frankfurt ergab einen Bedarf von ca. 400 bis 1.000 Tonnen im Jahr 2025. Die Berechnung für das Stützjahr 2040 ergab einen prognostizierten Jahresbedarf von ca. 10.000 bis 16.500 Tonnen. Diese Werte basieren auf einem schnellen Hochlauf der Schwerlastfahrzeuge gemäß den dargestellten Hochlaufkurven.



Abbildung 17: Wasserstoffverbrauch für den Liefer- und Schwerlastverkehr im Raum Frankfurt

3.3.3.3. Ergebnisse für den Binnenschiffsverkehr

Die Modellierung des Jahreswasserstoffbedarfs für die verkehrliche Leistung des Binnenschiffsverkehrs im Raum Frankfurt ergab einen Bedarf von ca. 290 bis 580 Tonnen im Jahr 2025. Die Berechnung für das Stützjahr 2040 ergab einen prognostizierten Jahresbedarf von ca. 2.900 bis 4.300 Tonnen. Diese Werte basieren auf einem langsamen Hochlauf von BZ-Binnenschiffen bedingt durch die lange Lebensdauer der eingesetzten Schiffe. Die prognostizierten Werte für 2040 gehen von einem Anteil in Höhe von 8% (konservativ) bzw. 15% (optimistisch) von BZ-Binnenschiffen an den Binnenschiffen insgesamt aus.

An dieser Stelle ist zu beachten, dass nur der Wasserstoffbedarf für die verkehrliche Leistung auf der Strecke auf dem Main von der Alten Niederräder Brücke bis hin zum Frankfurter Osthafen betrachtet wurde. In der Bedarfsanalyse wurde der potenzielle Wasserstoffbedarf der anliegenden Binnenhäfen für die Betankung berücksichtigt. Für eine gesamtheitliche Beurteilung geeigneter Tankstelleninfrastruktur (Standorte und Bedarfsmenge) müssen die Ergebnisse aus 4.3.2. und 4.3.3. gemeinsam betrachtet werden.

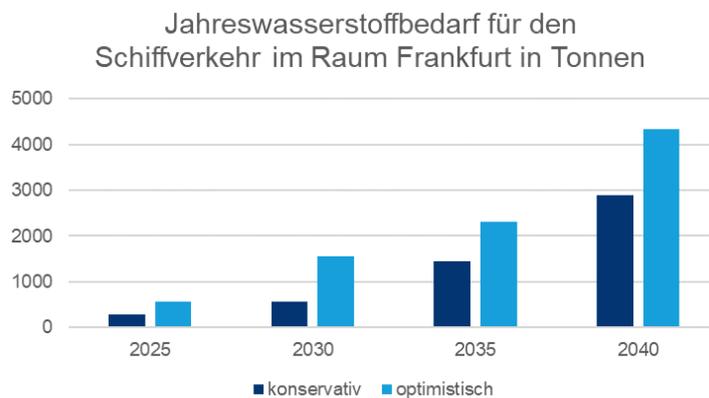


Abbildung 18: Wasserstoffbedarf für den Schiffsverkehr im Raum Frankfurt

3.4. Gesamtheitliche Auswertung

Abschließend wurden auf Basis der standortbezogenen Wasserstoffbedarfsanalyse in 4.2 und der verkehrlichen Analyse in 4.3 relevante Standorte für die Installation von Wasserstofftankinfrastruktur identifiziert und ausgewertet. Die gesamtheitliche Betrachtung der Ergebnisse aus 4.2 und 4.3 ist hierbei von zentraler Bedeutung, um nachhaltig Standorte zu identifizieren, die eine hohe Auslastung gewährleisten und durch effiziente Positionierung der Tankinfrastruktur den Hochlauf des Energieträgers Wasserstoff fördern. Hierfür wurden zunächst Auswahlkriterien bestimmt, die sowohl die verkehrliche Sicht als auch die Bedarfsabdeckung umfassen.

Im Fokus der Auswertung stand die Identifikation von Gebieten bzw. Bereichen im Rhein-Main-Gebiet, die kurz- und mittelfristig den Hochlauf der Wasserstofftechnologie unterstützen und langfristig nachhaltig sichern. Nicht weiter betrachtet wurden an dieser Stelle die genaue Identifizierung von geeigneten Grundstücken in diesen Gebieten bzw. Bereichen, welche neben der allgemeinen Verfügbarkeit gegebenenfalls auch weitere rechtliche und sicherheitstechnische Anforderungen erfüllen müssen. Die Bewertung einzelner Standorte oder Grundstücke erfolgte im Rahmen der weiteren Projektierung (vgl. 4.1.1).

3.4.1. Relevante Kriterien für die Standortauswahl von Wasserstofftankinfrastruktur

Für die Standortauswahl von Wasserstofftankstellen wurden Kriterien ermittelt und festgelegt, auf deren Basis anschließend Standorte ausgewählt und bewertet wurden. Auf Grundlage der gesamtheitlichen Betrachtung der Ergebnisse aus der Wasserstoffbedarfs- sowie verkehrlichen Analyse und der Informationen aus den Gesprächen mit den Partnerunternehmen konnten folgende Kriterien formuliert werden:

» **Abdeckung des Bedarfs der Partnerstandorte [BP]**

Die Auswahl der ersten Tankstellenstandorte sollte insbesondere die Anforderungen der Partnerunternehmen berücksichtigen. Dies ist dadurch begründet, dass die Partnerunternehmen durch ihre Teilnahme am Projekt ein gewisses Interesse an der Verwendung von Wasserstoff als alternativem Energieträger geäußert haben und teilweise bereits die Anschaffung von Wasserstofffahrzeugen in Erwägung gezogen haben oder mindestens als attraktive Alternative im Bereich der alternativen Antriebe sehen, z.B. wegen der besseren Reichweite im Vergleich zu batteriebetriebenen Fahrzeugen. Auch wenn neben der Infrastruktur derzeit noch zusätzliche Herausforderungen für die Umstellung auf Wasserstoff bestehen – wie beispielsweise die geringe oder fehlende Marktverfügbarkeit von Brennstoffzellenfahrzeugen – so kann durch die Bereitstellung von Tankinfrastruktur ein großer Anreiz für die weitere Verfolgung der Wasserstofftechnologie bei den Partnerunternehmen gesetzt werden.

» **Räumliche Nähe zu Partnerstandorten [RNP]**

Einige der Partnerunternehmen, darunter vor allem die Busverkehrsdienstleister, haben in den Gesprächen bekundet, dass eine gewisse räumliche Nähe zu ihren Standorten bzw. Depots gewünscht bzw. benötigt wird, um die Betankung in den Betriebsablauf integrieren zu können. Gleiches gilt für Spezialanwendungen im Bereich der Abfallbewirtschaftung. Für Logistikunternehmen hingegen ist die räumliche Nähe eher ein untergeordneter Faktor, für diese ist es vor allem wichtig, dass die Tankstellen verkehrlich gut angebunden sind. In der Binnenschifffahrt oder anderen Anwendungen auf abgeschlossenen Betriebsgeländen wird die Betankung voraussichtlich über mobile H₂-Betankungsfahrzeuge erfolgen.

» **Förderung des Hochlaufs im Umfeld [FöU]**

In der Auswahl von geeigneten Standorten für Wasserstofftankinfrastruktur sollte neben den Partnerunternehmen zudem das Umfeld berücksichtigt werden. Insbesondere öffentlich zugängliche Wasserstofftankstellen oder Standorte, die mehreren Nutzern zugänglich sind, sind zu empfehlen. Dies begründet sich mit zwei Aspekten: Zum einen kann mit dem zusätzlichen Bedarf der Unternehmen aus dem Umfeld schon frühzeitig eine hohe Auslastung der Infrastruktur sichergestellt und somit Investitionskosten schnell amortisiert werden. Dies führt mittelfristig zu vermehrten Investitionen. Zweitens führen frei zugängliche Tankstellen zu einer verbesserten Redundanz im Versorgungsnetz und stellen somit Versorgungssicherheit auch in einem dünneren Tankstellennetz her. Dies ist für die Akzeptanz der Wasserstofftechnologie im operativen Betrieb wichtig.

Im weiteren Vorgehen wurden auf Basis der Ergebnisse aus 4.2 und 4.3 zunächst Standorte identifiziert, welche die formulierten Kriterien erfüllen. Auf Einzelebene wurden dann weitere Kennzahlen für jeden Standort ermittelt (Jahreswasserstoffbedarf am Standort sowie erwarteter Hochlauf am Standort) und so eine Bewertung der Standorte vorgenommen.

3.4.2. Identifizierung von geeigneten Gebieten für Wasserstofftankstellen

Die in 4.2 und 4.3 erarbeiteten Visualisierungen in Form einer Heatmap des Wasserstoffbedarfs sowie der Darstellung des Verkehrsaufkommens auf den Hauptverkehrsachsen im Raum Frankfurt konnten in einem ersten Schritt zur Identifikation von geeigneten Gebieten für die Installation von Wasserstofftankinfrastruktur dienen. So konnte zunächst eine Gesamtübersicht über den Raum Frankfurt geschaffen und die identifizierten Gebiete konnten im Anschluss bzgl. Bedarf sowie der formulierten Auswahlkriterien auf granularer Ebene analysiert werden.

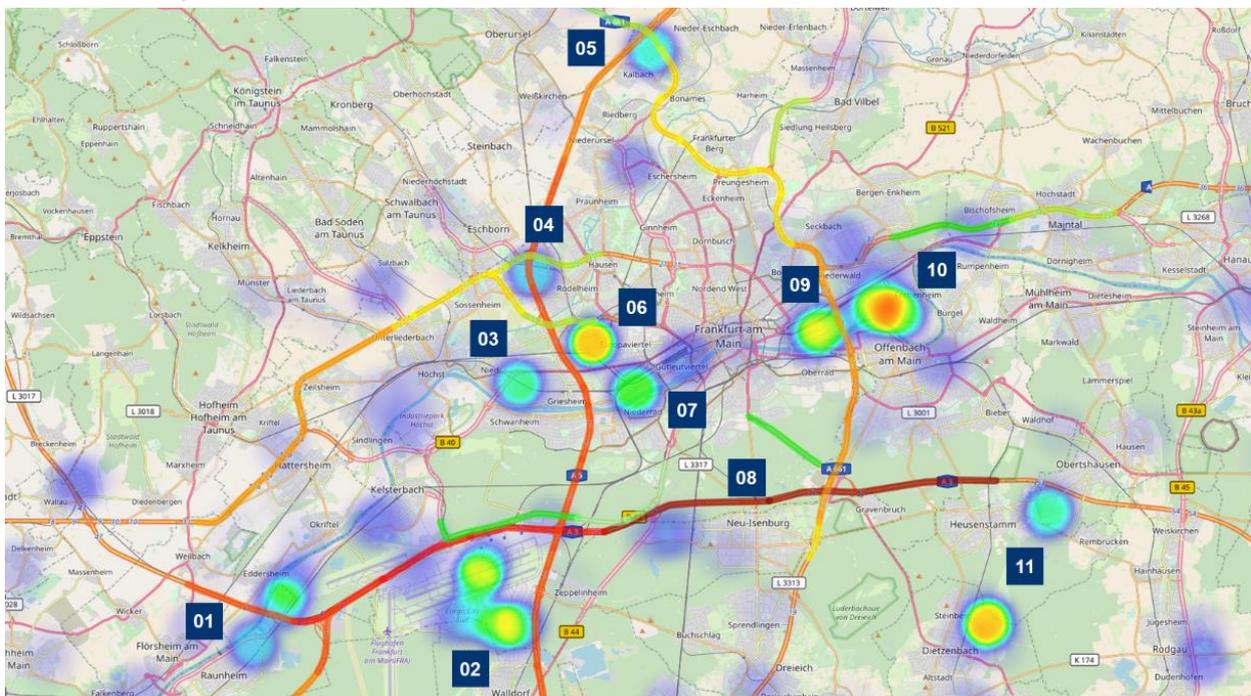


Abbildung 19: Erste Identifikation von potenziellen Standorten für Wasserstofftankstellen (Basis: 2030, konservatives Szenario)

Auf Basis der Ergebnisse für das Jahr 2030 unter Annahme des konservativen Szenarios wurden folgende Gebiete als geeignet betrachtet und im Folgenden näher untersucht:

Tabelle 10: Identifizierte Gebiete im Raum Frankfurt zur weiteren Untersuchung

ID	Gebiet
1	Raunheim/Eddersheim
2	Cargo City Süd (Flughafen Frankfurt)
3	Industriepark Griesheim
4	Eschborn
5	Bad Homburger Kreuz
6	Am Römerhof
7	Gutleutstraße
8	A3 (Abschnitt Neu-Isenburg - Heusenstamm)
9	Osthafen (West)
10	Osthafen (Ost)
11	Heusenstamm/Dietzenbach/Rodgau

Wie die folgende weitere Analyse zeigt, besteht in diesen Gebieten auch bereits im Jahr 2025 ein gewisser Wasserstoffbedarf, sodass auch in einer ersten Hochlaufphase eine Auslastung der Tankstellen sichergestellt werden könnte.

Um den Bau einer nachhaltigen Infrastruktur zu fördern, ist es außerdem wichtig, Gebiete zu identifizieren, die zwar bereits in den nächsten Jahren einen gewissen Wasserstoffbedarf aufweisen, aber die auch in der Zukunft in der gesamtheitlichen Betrachtung Frankfurts geeignet und effizient erscheinen.

3.4.3. Bewertung der identifizierten Gebiete

Für jedes Gebiet wurden weitere Kennzahlen ermittelt (Jahreswasserstoffbedarf am Standort sowie Anwendungsbereiche der Unternehmen am Standort), die eine Bewertung der Standorte ermöglichen.

Im ersten Schritt wurden dazu die Anzahl sowie Anwendungsbereiche der sich in den betrachteten Gebieten befindenden Unternehmen analysiert. Es wurde nach den Anwendungsbereichen Mobilität (M), Logistik (L), Binnenschifffahrt (B) und Spezialeinsatz (S) unterteilt. Zudem wurde eine Unterscheidung in Partnerunternehmen und das Umfeld vorgenommen, um eine differenziertere Übersicht zu erhalten und die formulierten Auswahlkriterien auswerten zu können.

Die Verteilung der Unternehmen nach Anwendungsbereichen wirkt sich auch auf den Hochlauf in dem jeweiligen Gebiet aus – bspw. ist der Hochlauf im ÖPNV in der ersten Phase zwar schneller, erreicht voraussichtlich in Zukunft durch die Konkurrenz des Batterieantriebs einen geringeren Gesamtanteil als Schwerlastfahrzeuge in der Logistik.

Tabelle 11: Entwicklung des Wasserstoffbedarfs in Tonnen der identifizierten Gebiete unterschieden nach Partner und Umfeld unter dem konservativen Szenario

Standorte		Umfeld			Partner			Gesamt		
ID	Bezeichnung	2025	2030	2040	2025	2030	2040	2025	2030	2040
1	Raunheim/Eddersheim	12	60	296	0	0	0	12	60	296
2	Cargo City Süd (Flughafen Frankfurt)	22	88	411	0	0	0	22	88	411
3	Industriepark Griesheim	0	2	12	18	57	164	18	59	175
4	Eschborn	6	14	47	11	99	323	16	113	369
5	Bad Homburger Kreuz	7	25	104	3	7	20	10	33	124
6	Am Römerhof	0	0	0	34	106	289	34	106	289
7	Gutleutstraße	3	11	61	11	99	323	14	110	383
8	A3 (Abschnitt Neu-Isenburg - Heusenstamm)	5	24	122	0	0	0	5	24	122
9	Osthafen (West)	10	38	196	0	0	0	10	38	196
10	Osthafen (Ost)	11	53	255	11	99	323	21	152	577
11	Heusenstamm/Dietzenbach/Rodgau	28	125	608	0	0	0	28	125	608
Summe		104	441	2111	87	468	922	191	909	3552

Tabelle 12: Entwicklung des Wasserstoffbedarfs in Tonnen der identifizierten Gebiete unterschieden nach Partner und Umfeld unter dem optimistischen Szenario

Standorte		Umfeld			Partner			Gesamt		
ID	Beschreibung	2025	2030	2040	2025	2030	2040	2025	2030	2040
1	Raunheim/Eddersheim	31	82	458	0	0	0	31	82	458
2	Cargo City Süd (Flughafen Frankfurt)	49	122	630				49	122	630
3	Industriepark Griesheim	1	3	18	27	82	233	28	85	251
4	Eschborn	9	20	69	27	115	518	36	136	586
5	Bad Homburger Kreuz	14	35	158	4	11	28	18	45	186
6	Am Römerhof	0	0	0	52	151	408	52	151	408
7	Gutleutstraße	6	23	100	27	115	518	33	138	618
8	A3 (Abschnitt Neu-Isenburg - Heusenstamm)	13	34	189	0	0	0	13	34	189
9	Osthafen (West)	21	64	312	0	0	0	21	64	312
10	Osthafen (Ost)	26	75	395	27	115	518	53	190	913
11	Heusenstamm/Dietzenbach/Rodgau	67	171	938	0	0	0	67	171	938
Summe		238	629	3267	162	589	2222	400	1218	5489

3.4.4. Standortempfehlung für Wasserstofftankstellen

Nach der Analyse der identifizierten Gebiete auf granularer Ebene konnten im Folgenden für die Installation der ersten Wasserstofftankstellen fünf Cluster gebildet werden. Durch die Aggregation mehrerer Standorte mit erhöhtem Wasserstoffbedarf könnte somit auch eine gewisse Auslastung der Tankinfrastruktur, vor allem in der ersten Phase des Hochlaufs, sichergestellt werden. Diese ist für das Fortbestehen und Betrieb von zentraler Bedeutung.

Die folgenden Cluster ließen sich anhand der zuvor vorgenommenen Analyse sowie der räumlichen Verteilung identifizieren:

- » Osthafen Frankfurt – Standorte 9 und 10
- » Cargo City Süd (Flughafen Frankfurt) – Standort 2
- » A5 (Nordwestkreuz - Bad Homburger Kreuz) – Standorte 4 und 5
- » Frankfurt West – Standorte 3,6 und 7
- » A3 – Standorte 1, 8 und 11

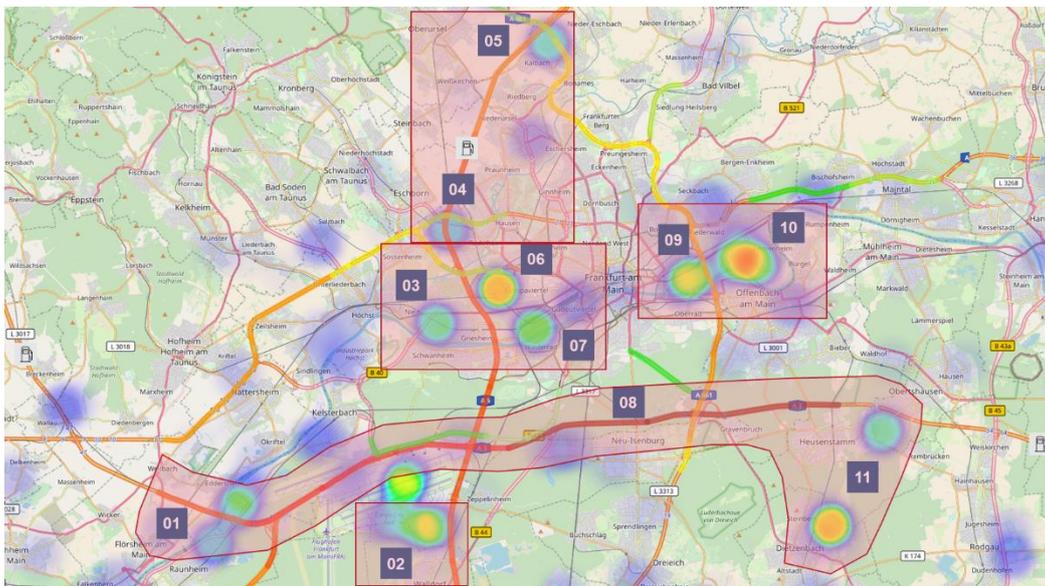


Abbildung 20: Die Aggregation der einzelnen Gebiete in Cluster

Osthafen Frankfurt

Der Frankfurter Osthafen weist als Hauptumschlagpunkt in Frankfurt durch die hohe Anzahl an Logistikunternehmen sowie die Güterbinnenschifffahrt bereits im Jahr 2025 einen Jahreswasserstoffbedarf von 31-74 Tonnen auf. Als potenzielle Standorte für die Installation einer Wasserstofftankstelle in diesem Gebiet scheint vor allem der markierte Abschnitt auf der Hanauer Landstraße geeignet, da dieser zum einen den lokalen Bedarf der ansässigen Unternehmen, aber auch den Durchfahrtsverkehr bedienen könnte. Alternativ sind im Gebiet des Osthafens vor allem die Carl-Benz-Straße im Osten oder auch das Hafenbecken weitere Optionen.

Cargo City Süd (Flughafen Frankfurt)

Neben dem Bedarf des eigentlichen Flughafenbetriebs, welcher durch den Einsatz von verschiedenen Fahrzeugtypen auf dem Gelände des Flughafens entsteht, weist der Flughafen als einer der größten Umschlagsplätze in Deutschland allein durch die lokalen Logistikunternehmen bereits 2025 einen Bedarf von 22-49 Tonnen auf. Daher bietet sich unabhängig und außerhalb vom Flughafengelände die Installation einer Wasserstofftankstelle für das im Süden des Flughafens liegende Gewerbegebiet Cargo City Süd an. Perspektivisch ist demnach eine separate Tankstelle auf dem Flughafengelände für den Bedarf des Flughafens und eine weitere Tankstelle außerhalb des Geländes für die Logistik vorstellbar.

In diesem Gebiet bietet sich insbesondere der markierte Bereich auf der Zufahrtstrecke von der A5 an.

A5 (Nordwestkreuz – Bad Homburger Kreuz)

Zur Deckung des Bedarfs auf der A5 als Hauptverkehrsachse in der Achse Nord-Süd mit hohem Schwerlastverkehrsaufkommen eignet sich der Verkehrsknotenpunkt Bad Homburger Kreuz, insbesondere auch aufgrund der ansässigen Unternehmen im Logistikbereich und anliegender Busdepots. In diesem Bereich ist vor allem die Züricher Straße, aber auch der markierte Bereich des Gewerbegebietes für die Installation einer Tankstelle aufgrund der verkehrlichen Anbindung zur A5 sinnvoll.

Frankfurt West

Im Westen Frankfurts bieten sich der Bereich Am Rebstock sowie die Gutleutstraße als potenzielle Standorte für eine Wasserstoffinfrastruktur an. Beide Standorte sind in räumlicher Nähe zu Partnerunternehmen und bieten zudem eine gute verkehrliche Anbindung an die Autobahn, sodass hier vom weiteren Umfeld ausgegangen werden kann. Insbesondere wären diese Standorte auch für Fernbusse vom Zentralen Omnibusbahnhof am Frankfurt Hauptbahnhof aus gut erreichbar.

A3

Aufgrund des hohen Schwerlastverkehrsaufkommens sollte die A3 als eine der Hauptverkehrsachsen – nicht nur im Raum Frankfurt, sondern im ganzen Rhein-Main-Gebiet – im Aufbau der Tankinfrastruktur berücksichtigt werden.

Im Falle einer gewünschten Integration von Wasserstoffbetankung an bestehenden konventionellen Tankstellen, bieten sich auf dem betrachteten Streckenabschnitt die im Osten liegende Raststätte Medenbach Ost/West oder ganz im Westen der Rasthof Weiskirchen West/Ost an. Die beiden Raststätten verfügen jeweils in beide Fahrrichtungen über Tankstellen, welche von Shell bzw. Esso (Medenbach Ost) betrieben werden. Für die lokalen Unternehmen in den Gewerbegebieten entlang der A3 könnte die Installation einer Tankstelle an einem der beiden Standorte jedoch mit längeren Umwegen zur Betankung einhergehen.

Eine weitere Möglichkeit würde in der Installation einer Tankstelle an einer geeigneten Ausfahrt entlang der A3 mit zusätzlichem lokalem Bedarf durch ansässige Unternehmen bestehen.

3.4.5. Weitere relevante Aspekte für den Aufbau von Tankinfrastruktur

Neben den in der Auswertung betrachteten Auswahlkriterien für Standorte der Wasserstofftankstellen sind weitere Aspekte für den Auf- und Ausbau von Tankinfrastruktur relevant:

1. Eine zentrale Forderung von Flottenbetreibern zur Sicherstellung des Betriebsablaufs ist eine gewisse Redundanz der Tankinfrastruktur. In einer ersten Phase des Infrastrukturaufbaus sollte daher entschieden werden, ob zunächst in einem räumlich begrenzten Gebiet die Redundanz sichergestellt wird und dann eine räumliche Ausdehnung unter Beibehaltung der Redundanz vorgenommen wird oder ob es für den Hochlauf zunächst sinnvoll ist, ein möglichst großes Gebiet durch die räumliche Verteilung abzudecken und dann im zweiten Schritt eine Redundanz herzustellen.
2. Die Zugänglichkeit von Tankinfrastruktur ist ein weiterer wichtiger Aspekt zur Unterstützung des Hochlaufs. Öffentlich zugängliche Infrastruktur sollte präferiert werden, um jedem die Teilnahme am Hochlauf zu ermöglichen und so Synergien im Betrieb der Tankstellen zu nutzen.
3. Der Aufbau einer Tankinfrastruktur im Rhein-Main-Gebiet kann lokale Unternehmen mit einem auf das Rhein-Main-Gebiet begrenzten Einsatzgebiet unterstützen. Für den Fernverkehr, welcher potenziell aufgrund der benötigten Reichweite und Leistung einen schnellen Hochlauf von Wasserstoff verspricht, ist aufgrund des räumlich ausgedehnten Einsatzgebietes jedoch die Bereitstellung von Infrastruktur nur im Rhein-Main-Gebiet nicht ausreichend. Vielmehr können die Investitionstätigkeiten überregional abgestimmt werden.

Eine Bewertung von Grundstücken bzw. Standorten nach technischen, sicherheitsrelevanten sowie rechtlichen Aspekten wurde an dieser Stelle nicht abgedeckt, ist für die konkrete Planung und Umsetzung des Infrastrukturaufbaus aber unabdingbar und von zentraler Bedeutung.

4. Gesamtsystemmodellierung

Nachdem der rechtliche Rahmen bekannt war und die zukünftige Entwicklung des Wasserstoffbedarfs im Rhein-Main Gebiet analysiert wurde, konnte mit dem theoretischen Aufbau eines bedarfsgerechten regional organisierten Wasserstoffversorgungssystems gestartet werden. Das Vorgehen wurde in drei Phasen untergliedert und wie folgt strukturiert:



Abbildung 21: Übersicht Gesamtsystemmodellierung

Zusätzlich wurde im Rahmen der Gesamtsystemmodellierung auch eine mögliche Verwertung des anfallenden Sauerstoffs aus dem Elektrolyseprozess auf deren Einsetzbarkeit im Verbrennungsprozess der Müllverbrennungsanlage untersucht.

4.1. Grundlagenermittlung

Die Grundlagenermittlung dient der Erfassung und Definition von Daten, Parametern und technischen Grenzen und enthält grundlegende Informationen für die weiterführende Konzeptionierung, welche zwingend zu berücksichtigen sind. Auch die Erkenntnisse aus der Rechts- und Umfeldanalyse fließen an dieser Stelle mit ein und wurden entsprechend weiterentwickelt.

4.1.1. Standortanalysen

4.1.1.1. MHKW Nordweststadt

Das Müllheizkraftwerk in der Frankfurter Nordweststadt wird von der MHKW Frankfurt am Main GmbH (im Folgenden „MHKW“ oder „MHKW-Betreiber“) betrieben. Die Müllverbrennungsanlage hat 4 Linien mit einer Kapazität von jeweils 20 t/h, welche jeweils aus Kessel, Dampferzeuger und Rauchgasreinigung bestehen. Als Brennstoff wird Restmüll eingesetzt mit einem biogenen Anteil von ca. 50 % im Jahresmittel. Aufgrund des biogenen Anteils im Brennstoff ist ca. 50 % der Bruttostromerzeugung des MHKW als Grünstrom zertifizierbar. Der bei der Müllverbrennung erzeugte Dampf wird zur Strom- und Fernwärmeerzeugung verwendet. Die zwei Dampfturbinen der Anlage verfügen über eine Stromausspeiseleistung von insgesamt maximal 49 MW, welche bisher vollständig in das öffentliche Stromnetz eingespeist wird.

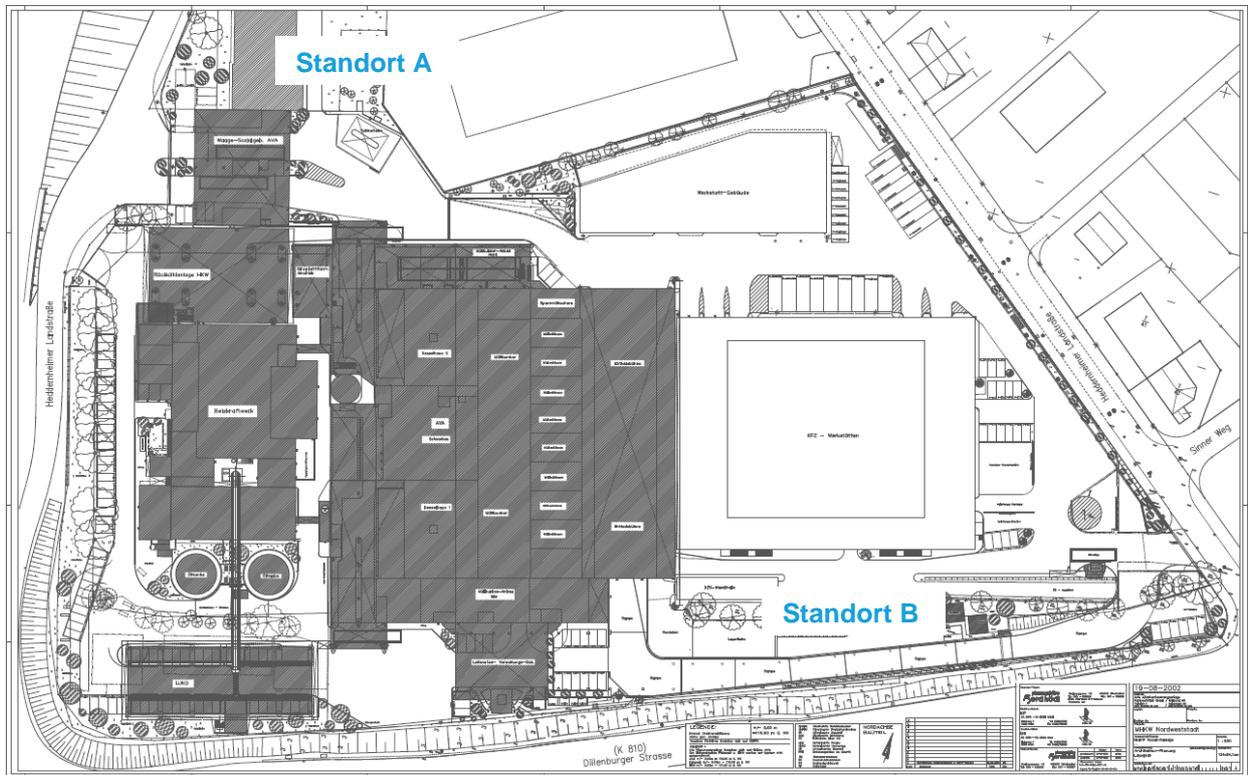


Abbildung 22: Lageplan MHKW Frankfurt Nordweststadt

Der Lageplan zeigt zwei potenzielle Standorte für die geplante Elektrolyseanlage zur Wasserstoffherzeugung auf dem Gelände des MHKW.

Standort A

Der erste Standort A liegt im nördlichen Teil des MHKW Geländes, an der Durchfahrtsstraße zwischen der existierenden Dieselbetriebstankstelle und der nordwestlichen Ausfahrt auf die Landesstraße L3004. Auf der westlich gegenüberliegenden Straßenseite befindet sich eine existierende Umspannanlage und auf der östlichen Seite wird der Standort durch ein angrenzendes Areal mit Gewerbegebäuden begrenzt, welches nicht zum MHKW gehört. Dort grenzen zwei Gebäude unmittelbar an den Standort A an.

Der Standort A wird gegenwärtig als Abstellplatz für Einsatzfahrzeuge der Straßenreinigung (FES) und als Streusalzlager verwendet. Im südlichen Teil angrenzend an die existierende Tankstelle, befindet sich ein schmaler Grünstreifen. Im Norden grenzt ein ca. 20 m breites abgezauntes Areal an, welches mit Rasen bedeckt ist und in dessen Mitte sich eine kleine Elektroinstallation befindet.

Die Gesamtfläche beträgt ca. 14 x 70 m², verfügt über gute Anbindungsmöglichkeiten zur Strom- und Medienversorgung zum MHKW und liegt auch verkehrstechnisch günstig mit Einfahrtsmöglichkeiten über die MKHW Hauptpforte und Ausfahrtsmöglichkeiten über eine Einbahnstraße und ein separates Tor mit Ausfahrt auf die L3004.

Standort B

Der zweite Standort B liegt im süd-östlichen Bereich des MHKW Geländes, zwischen der Verlängerung der Einfahrt von der Heddenheimer Landstraße und der parallel zur Dillenburger Straße verlaufenden Auffahrrampe zum Müllbunker. Momentan werden dort Betriebsfahrzeuge geparkt und Betriebsmaterialien

gelagert. Dieser Standort verfügt zwar über eine gute Verkehrsanbindung, ist aber sehr schmal geschnitten, hat mit 10 x 50 m² eine deutlich kleinere Fläche und besitzt eine deutlich schlechtere Anbindung an die Strom- und Medienversorgung des MHKW, welche längere Leitungs- und Kabellängen von den MHKW Versorgungssystemen erfordern würde. Aus diesen Gründen wurde dieser Standort vorerst nicht weiter betrachtet.

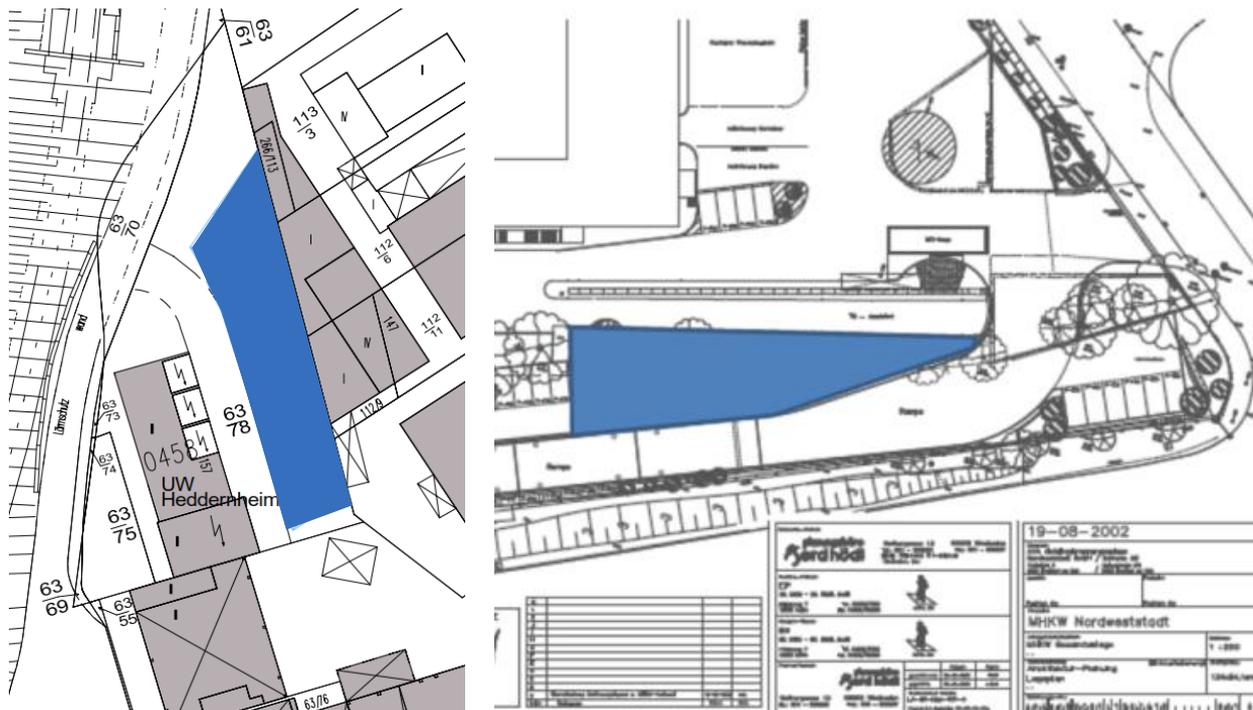


Abbildung 23: Standortoption A (links), Standortoption B (rechts)

Verfügbare Stromanbindung

6,3 kV Mittelspannungsversorgung

Die Stromversorgung der Wasserstoff-Produktionsanlage (Elektrolyseanlage inklusive Nebenanlagen) soll im Rahmen des Projekts über die Eigenverbrauchsschiene des MHKW bereitgestellt werden. Zur Anbindung der Wasserstoff-Produktionsanlage an die Eigenverbrauchsschiene des MHKW sind zwei Schaltfelder auf der 6,3 kV Spannungsebene verfügbar. Eines dieser Schaltfelder kann für die Elektrolyseanlage genutzt werden. Das zweite Schaltfeld muss als Reserve für den MHKW Betrieb vorgehalten werden und kann nicht für das Projekt MH2Regio genutzt werden. Der MHKW-Betreiber empfahl die Einspeisung 10BBD03 zu verwenden, da die Anbindung dort einfacher zu realisieren ist. Der Ausgangs-Transformator kann bis zu 18 MW zur Verfügung stellen, die maximal verfügbare Leistung auf der 6,3 kV-Schiene ist jedoch durch Schalter und Kabel auf eine effektive nutzbare Anschlussleistung von 5-6 MW begrenzt. Die Distanz des Schaltfeldes zum vorausgewählten Standort A beträgt ca. 150 m. In den bestehenden Kabeltrassen ist ein eigener Kabelkanal für 6,3 kV vorhanden sowie ausreichend Ausbaureserve für die zusätzlich notwendigen Kabel zur Anbindung der Wasserstoff-Produktionsanlage vorhanden.

0,4 kV Niederspannungsversorgung

Die Niederspannungsversorgung soll mittels Abspanntransformator von der 6,3 kV-Schiene erfolgen und zusätzlich eine redundante 0,4 kV Anbindung als Hilfseinspeisung für Prüfungen und Notfälle von der MHKW-NS Schiene in der Konzeption vorgesehen werden. Eine Anbindung an das USV System des MHKWs kann genutzt werden (vorbehaltlich der benötigten Leistung der H₂-Anlage). Kapazitäten des existierenden Notstromgenerators können nicht bereitgestellt werden, bei Bedarf ist ein neuer Diesel-Generator o.ä. vorzusehen. Der Anschluss einer Elektrolyseanlage im Maßstab 3-5 MW könnte, in Abhängigkeit der verwendeten Gleichrichterschaltung, einen Einfluss auf die Strom-Spannungsqualität haben und könnte entsprechende Maßnahmen/Einrichtungen zur Kompensation (OberschwingungsfILTER) erforderlich machen. Die genaue Dimensionierung muss im Rahmen einer Harmonic-Power-Studie untersucht werden und ist nicht Bestandteil des Projekts. Für das Leitsystem wird eine unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) in der Warte notwendig, diese wird aber Teil der Erweiterung des Leitsystems sein (siehe unten).

Leittechnikanbindung

Die Wasserstoff-Produktionsanlage muss durch das MHKW überwacht und gesteuert werden können. Die Leittechnik muss daher mit dem bestehenden Leittechniksystem des MHKW, welches von der Fa. Mitsubishi installiert wurde, kompatibel sein. Die Elektrolyseanlage soll, wie die existierende Vollentsalzungsanlage (VE-Anlage), mit separatem Process Logic Controller (PLC) ausgestattet sein, über welchen wesentliche Systemparameter mit dem MHKW Leitsystem mittels LWL-Leitung ausgetauscht werden. Der genaue Anbindungspunkt muss in nachfolgenden Planungsphasen definiert werden. Die Integration in das MHKW Leitsystem kann als eigener Bedienplatz in der Leitwarte oder als zusätzlicher Bildschirm realisiert werden. Wenn die IP-Adresse des PLC (CPU) bekannt ist, kann das System bei der nächsten MHKW Revision integriert werden.

Verfügbare Medien

Vollentsalztes Wasser

Das MHKW kann 1-2 m³/h vollentsalztes Wasser (VE-Wasser) für die Elektrolyse zur Verfügung stellen. Für diese Versorgungskapazität gibt es keine tageszeitlichen Einschränkungen, allerdings kann bei Anfahrvorgängen des MHKW die Verfügbarkeit von VE-Wasser für die Elektrolyse über einen Zeitraum von bis zu 12 Stunden eingeschränkt sein. Die existierende VE-Wasser-Anlage basiert auf Ionentauscher Technologie und ist kürzlich erneuert und um 50% erweitert worden. Ein VE-Wasser Speichertank mit 280 m³ Kapazität ist am MHKW vorhanden. Aktuelle Analysen der verfügbaren VE-Wasserqualität wurden kürzlich im Rahmen der Inbetriebnahme erstellt und entsprechen den Vorgaben des VGB für Kessel- und Turbinenbetrieb.

Frischwasser

Trinkwasser kann aus dem vorhandenen Trinkwasserversorgungssystem des MHKW zur Verfügung gestellt werden. Die genaue Lage des Anbindungspunkts muss in nachfolgenden Planungsphasen definiert werden.

Brauchwasser

Brauchwasser ist am MHKW zur Versorgung der Behälterkühlung im Brandfall verfügbar. Die genaue Lage des Anbindungspunkts muss in nachfolgenden Planungsphasen definiert werden.

Löschwasser

Die Rückhaltung von Löschwasser im Brandfall muss zumindest für kleine Mengen gesichert sein. Im Brandfall aufgefangenes Löschwasser wird abgesaugt und kann in den Müllbunker des MHKW gepumpt werden. Alternativ kann eine Druckleitung bis in den Müllbunker vorgesehen werden. Die nächstgelegene Löschwasserversorgung ist laut Feuerwehrplan - DN80, bei Pforte - DN100, gegenüber Bauteil J/F und neben der Werkstatt. Es wird angenommen, dass die bestehenden Löschwasseranschlüsse für die Brandbekämpfung der Wasserstoff-Produktionsanlage genutzt werden können. Eine detaillierte Betrachtung muss im Rahmen der Entwurfsplanung (außerhalb des Leistungsumfangs dieser Studie) durchgeführt werden.

Abwasser

Unbelastetes Abwasser, ohne hohe Salzfracht, kann in den Betriebswasserkreislauf geleitet werden. Niederschlagswasser kann in das bestehende Regenwasser-Kanalsystem eingeleitet werden.

Stickstoff

Eine Stickstoffversorgung ist am MHKW nicht vorhanden und muss als separates Nebensystem der Wasserstoff-Produktionsanlage geplant werden.

Druckluft

Eine Druckluftversorgungs-Anlage ist am MHKW vorhanden mit einem Betriebsdruck zwischen 6-7 bar(ü), aber es wären sehr lange Wege im Außenbereich zu möglichen Anbindungspunkten nötig. Aus Sicht des MHKW ist eine Anbindung an die vorhandene Druckluftversorgung nicht sinnvoll. Die Druckluftversorgung muss daher als separates Nebensystem der Wasserstoff-Produktionsanlage geplant werden.

Kühlwasser

Das MHKW verfügt über ein offenes Rückkühlsystem mit hohem Bestandsalter, welches mit VE-Wasser betrieben wird. Das Rückkühlsystem basiert auf Verdunstungskühlung durch Rieseltürme mit einem Wasservolumen von 100 m³. Der Kühlkreislauf wird u.a. zur Ölkühlung der zwei Dampfturbinen eingesetzt. In den Sommermonaten kann es zeitweise zu Leistungsengpässen des Kühlsystems kommen. Daher muss ein separates neues Kühlsystem für die Wasserstoff-Produktionsanlage geplant werden.

4.1.1.2. Wasserstoff – Distributionsstützpunkt

Zur Analyse geeigneter Standorte für einen Distributionsstützpunkt zur zentralen Lagerung und bedarfsgesteuerten Verteilung von Wasserstoff wurden im Rahmen der Studie verschiedene Standorte im Stadtgebiet von Frankfurt a.M. identifiziert und bewertet. Grundlage hierfür waren die Ergebnisse aus der Umfeldanalyse. Die Standortsuche konzentrierte sich auf die Cluster im Rhein-Main Gebiet in denen zukünftig ein Wasserstoffbedarf entstehen könnte, um die Transportwege möglichst gering zu halten.

Folgende Standortkriterien wurden für die Standortanalyse definiert:

Tabelle 13: Standortkriterien

Technische Kriterien	Genehmigungsrechtliche Kriterien
Entfernung zur Wasserstofferzeugungsanlage	Menge des am Standort gelagerten Wasserstoffs
Grundstücksfläche	Anwendbarkeit der Störfallverordnung
Entfernung zu benachbarten potenziellen Nachfrageschwerpunkten	Einhaltung der Anforderungen aus dem Bebauungsplan
Art der umgebenden Bebauung und Abstand zu diesen	Einhaltung der Anforderungen aus dem Naturschutzrecht
Bisherige Nutzung des Grundstücks	Einhaltung der Anforderungen aus dem Wasserrecht
Zustand und Erschließung des Grundstücks	Einhaltung der Anforderungen aus dem Immissionsschutz
Baugrund	Schutz- und Sicherheitsabstände
Vorhandene Bebauung auf Grundstück	Schutzgüter
Zustand der Verkehrswege	Bodenschutz
Verkehrsanbindung	Brandschutz und Sicherheitsaspekte
Medienverfügbarkeit	Rückbau/Abbruch vorhandener baulicher Anlagen
Bodenrichtwert	

Insgesamt wurde die Standortbewertung für drei von zehn potenziellen Standorten durchgeführt. Die Bewertung erfolgte mittels definierter Bewertungsskala und Gewichtung.

Die Gewichtung erfolgte von 0 = *nicht relevant bis 5 = hoher Einfluss auf die Realisierung*.

Die Punkteverteilung erfolgte von 0 = *Kriterium nicht erfüllt oder keine Informationen verfügbar bis 10 = Kriterium vollständig erfüllt, Ausbaureserve vorhanden*.

Die Ergebnisse der Standortbewertung sind im Anhang zu finden:

[*Ergebnisse der Standortbewertung - Distribution*](#)

Als Ergebnis der Standortbewertung wurde Standort 10.2 als der Standort mit der höchsten Punktzahl (933) bzw. dem höchsten Erfüllungsgrad (53 %) ermittelt. Standort 10.2 befindet sich am Osthafen in Frankfurt a.M., das Grundstück befindet sich bereits im Eigentum der Mainova. Die in der Gesamtbewertung nächstbesten Standorte sind Standort 10.1 (MN Heizwerk, 51 % Erfüllungsgrad) und Standort 5.1 (Industriegebiet Kalbach, Erfüllungsgrad 40 %).

4.1.1.3. Wasserstofftankstellen

Wie bereits in der Standortsuche für einen Distributionsstützpunkt geschehen, werden auch für Wasserstofftankstellen im öffentlichen Bereich geeignete Standorte gesucht. Die Standortkriterien und Bewertungsskalen für Wasserstofftankstellen entsprechen im Wesentlichen denen der Tabelle 13: Standortkriterien. Auch hier wurden die Ergebnisse aus der Umfeldanalyse als Grundlage zur Standortfindung genutzt.

Insgesamt wurde die Standortbewertung für vier von dreizehn potenziellen Standorten durchgeführt.

Die Ergebnisse der Standortbewertung sind im Anhang zu finden:

[*Ergebnisse der Standortbewertung - Tankstellen*](#)

Als Ergebnis wurden die Standorte 5.1 (Industriegebiet Kalbach, Erfüllungsgrad 59 %), Standort 10.2 (Osthafen, Erfüllungsgrad 54 %) am besten bewertet.

In die nachfolgende Entwicklung von Szenarien wurde die Tankstelle am Osthafen übernommen, da es als sinnvoll erachtet wird, Distribution und Tankstelle an einem Standort zu vereinen. Als gesetzte Standorte, unabhängig von der Standortbewertung, wurden die bestehende Betriebstankstelle des MHKW, sowie der geplante Betriebshofstandort eines assoziierten Partnerunternehmens und das Verkehrsdrehkreuz A3/A5 (Frankfurter Kreuz) am Flughafen ausgewählt.

Darüber hinaus wurde die bestehende Wasserstofftankstelle in Niederrad als fünfter Tankstellenstandort aufgenommen. Dieser Standort bildet die Referenz zur Belieferung bestehender Tankstellen mit Wasserstoff und liegt günstig in annähernd gleichen Abstand zu Tankstellenstandort 2, 3 und 4.

Nachfolgende Karte gibt einen Überblick über die Tankstellenstandorte für die Szenarien-Entwicklung.

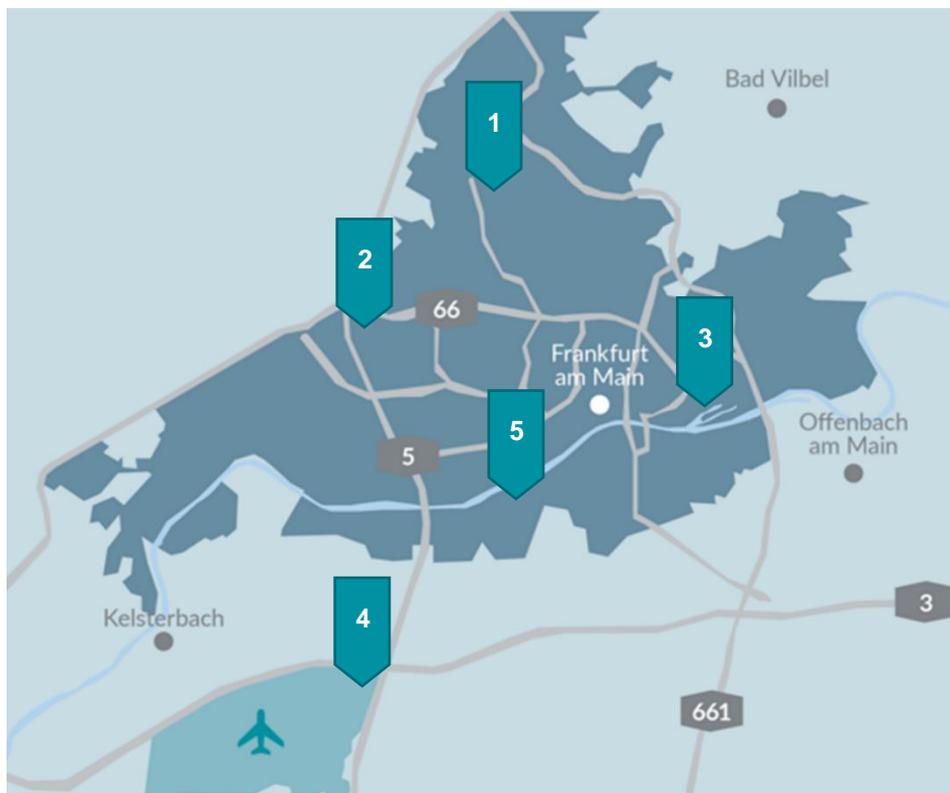


Abbildung 24: Übersicht der Tankstellenstandorte für das Gesamtsystem

4.1.2. Entwicklung von Szenarien

4.1.2.1. Grundmodell

Mit dem MH2Regio Grundmodell wird ein Basismodell beschrieben, welches im Rahmen weiterer Projektentwicklungsschritte als realistisch angesehen wurde. Das Grundmodell ist charakterisiert durch eine zentrale Wasserstoffproduktion am MHKW Nordweststadt und durch zwei Wasserstofftankstellen. Als potenzielle Wasserstoffabnehmer wurden ausgewählte Projektpartner erfasst, für welche auf Basis der Grundlagenermittlung und der Partnergespräche der Einsatz von Brennstoffzellenfahrzeugen mittelfristig am wahrscheinlichsten gilt.

Folgende Infrastrukturstandorte wurden im MH2Regio Grundmodell betrachtet:

- Standort Distributionsstützpunkt: Osthafen (1)
- Standort Elektrolyseanlage: MHKW Nordweststadt (1)
- Standorte Wasserstofftankstellen: MHKW Nordweststadt (1), Betriebshof Lorscher Str. (2)

Zum Vergleich möglicher Wasserstoffbereitstellungsketten wurden die folgenden vier Hauptszenarien unterschieden:

- Szenario 1: Zentrale Wasserstoffherzeugung, LKW-Transport bei 200 bar
- Szenario 2: Zentrale Wasserstoffherzeugung, LKW-Transport bei 500 bar
- Szenario 3: Zentrale Wasserstoffherzeugung, Leitungsgebundener Transport

- Szenario 4: Dezentrale Wasserstoffherzeugung, kein Transport

Die o.g. Hauptszenarien wurden auf Basis der in der Umfeldanalyse prognostizierten Nachfrageentwicklung (Markthochlauf) in jeweils zwei Unterszenarien unterteilt:

- a: optimistische Nachfrageentwicklung
- b: konservative Nachfrageentwicklung

Als zusätzliches Optimierungsszenario wird in zwei der o.g. Szenarien jeweils eine Nachfrageglättung angewendet, um Spitzenverbräuche in den Nachfrageprofilen zu vergleichmäßigen. Diese zwei zusätzlichen Szenarien sind mit einem „+“ gekennzeichnet.

Insgesamt wurden zehn Szenarien für das MH2Regio Grundmodell untersucht, welche nachfolgend dargestellt sind.

Table 14: Szenariomatrix MH2Regio "Grundmodell"

Szenario Nr.	Transportart	Transportdruck	Transportkapazität	Abnehmer	Nachfrage-szenario	Nachfrage-glättung	Anzahl Tankstellen
1a	LKW- Trailer	200 bar	Tube- Trailer	Projekt- partner	Optimistisch	Nein	2
1a+	LKW- Trailer	200 bar	Tube- Trailer	Projekt- partner	Optimistisch	Ja	2
1b	LKW- Trailer	200 bar	Tube- Trailer	Projekt- partner	Konservativ	Nein	2
2a	LKW- Trailer	500 bar	20 ft. MEGC	Projekt- partner	Optimistisch	Nein	2
2a+	LKW- Trailer	500 bar	20 ft. MEGC	Projekt- partner	Optimistisch	Ja	2
2b	LKW- Trailer	500 bar	20 ft. MEGC	Projekt- partner	Konservativ	Nein	2
3a	Pipeline	< 30 bar	DN100 PN30	Projekt- partner	Optimistisch	Nein	2
3b	Pipeline	< 30 bar	DN100 PN30	Projekt- partner	Konservativ	Nein	2
4a	Vor-Ort-Elektrolyse (onsite)			Projekt- partner	Optimistisch	Nein	2
4b	Vor-Ort-Elektrolyse (onsite)			Projekt- partner	Konservativ	Nein	2

Die detaillierte Aufstellung und Beschreibung der einzelnen Szenarien des Grundmodells sind im Anhang hinterlegt:

[Detaillierte Szenarienbeschreibung Grundmodell](#)

4.1.2.2. Vision 2040

Mit der Vision 2040 wird ein erweitertes, „visionäres“ Modell definiert. Im Gegensatz zum Grundmodell wurde das Wasserstoffsystem um drei weitere Tankstellenstandorte (Tankstelle 3, 4, 5) und einen weiteren Produktionsstandort (Elektrolyse 2) erweitert. Nachfrageseitig wurden zudem weitere Projektpartner aus dem Einzugsgebiet sowie zusätzliche Nachfragepotentiale aus der Umfeldanalyse integriert. Es ergibt sich somit ein Modell mit einer erhöhten Anzahl von Standorten und Komponenten, sowie einer gesteigerten Verknüpfung der Standorte im Sinne eines Gesamtsystems. Aufgrund der dadurch erhöhten Komplexität wurden für das Vision 2040 Modell eine begrenzte Anzahl von Szenarien berechnet, die im Folgenden beschrieben werden.

Folgende Infrastrukturstandorte wurden im MH2Regio Vision 2040 Modell betrachtet:

- Standort Distributionsstützpunkt: Osthafen (1)
- Standort Elektrolyseanlage: MHKW Nordweststadt (1), Biomasse HKW Fechenheim (2)
- Standorte Wasserstofftankstellen: MHKW Nordweststadt (1), geplanter Bus-Betriebshof Lor-scher Str. (2), Osthafen (3), Flughafen Frankfurt a.M. (4), Shell Tankstelle Niederrad (5)

Folgende Wasserstoffbereitstellungsketten wurden unterschieden:

- Szenario 5: Zentrale Wasserstofferzeugung, LKW-Transport bei 500 bar
- Szenario 6: Zentrale Wasserstofferzeugung, Leitungsgebundener Transport
- Szenario 7: Dezentrale Wasserstofferzeugung, kein Transport

Insgesamt wurden drei Szenarien für das MH2Regio Vision 2040 Modell untersucht, welche in der folgen-den Übersichtstabelle (Tabelle 15: Szenariomatrix MH2Regio "Vision 2040") dargestellt sind. Ein Szenario mit 200 bar Trailertransport wurde im Gegensatz zum Grundmodell nicht betrachtet, da für die erforderli-chen hohen Transportmengen (> 11 t/Tag) die niedrigen Transportkapazitäten der 200 bar Tube Trailer als nicht geeignet bewertet wurden.

Tabelle 15: Szenariomatrix MH2Regio "Vision 2040"

Sze-nario Nr.	Trans- portart	Trans- port- druck	Trans- portka- pazität	Abneh- mer	Nachfra- geszena- rio	Nachfra- geglä- tung	Anzahl Tank- stellen	Elektrolyse- standort
5+	LKW- Trailer	500 bar	20 ft. MEGC	Projekt- partner + Umfeld	Optimis- tisch	Ja	5	MHKW + Biomasse HKW
6+	Pipeline	< 30 bar	DN100 PN30	Projekt- partner + Umfeld	Optimis- tisch	Ja	5	MHKW + Biomasse HKW
7+	Vor-Ort-Elektrolyse			Projekt- partner + Umfeld	Optimis- tisch	Ja	5	MHKW + Biomasse HKW

Die Nachfrage an den externen Tankstellenstandorten 3 – 5 wurde auf Basis der Umfeldanalyse ermittelt. Im Vergleich zum Grundmodell ergaben sich deutlich höhere Absatzmengen, insbesondere im Umfeld des

Flughafens. Die Nachfragemengen der Projektpartner entsprachen den Nutzerprofilen. Für die Nachfrage aus dem Umfeld wurden die definierten Standardnutzerprofile genutzt (vgl. 4.1.4 Entwicklung von Standardnutzerprofilen).

Die detaillierte Aufstellung und Beschreibung der einzelnen Szenarien des Grundmodells sind im Anhang hinterlegt:

Detaillierte Szenarienbeschreibung Vision 2040

In der folgenden Abbildung 25 ist das Anbindungskonzept zwischen dem Elektrolysestandort am MHKW Nordweststadt und der geplanten externen Wasserstofftankstelle an der Lorscher Straße, Frankfurt a.M., skizziert. Der skizzierte Trassenverlauf für eine Rohrleitungsanbindung orientiert sich an den bestehenden Straßenverläufen und wurde mit Mainova abgestimmt. Die Leitungslänge sowie die Anzahl der erforderlichen (Straßen-) Querungen werden in der Kostenschätzung berücksichtigt.



Abbildung 25: Vision 2040 – Anbindungskonzept per Pipeline (Szenario 6+)

4.1.3. Definition von Eingangsparmeter zur Softwaresimulation

Die wesentlichen Vorgaben und Randbedingungen für die Gesamtsystemmodellierung wurden in einer Parameterliste festgehalten. Mit Beginn der Studie bis zum Abschluss wurden alle technischen, wirtschaft-

lichen und rechtlichen Informationen identifiziert, dokumentiert, bei Bedarf korrigiert und im Konzeptionierungsverlauf angepasst oder erweitert. Bei der Dokumentation der Eingangsparameter wurde zwischen (nicht veränderlichen) Vorgaben und variablen Parametern für die Systemmodellierung unterschieden.

Die Parameter werden in Ein- und Ausgangsparameter wie folgt unterschieden und gekennzeichnet:

	Vorgabe
	Annahme
	Variable
	Berechnungs-/auslegungsergebnis
	vorläufige / unvollständige Angaben

Abbildung 26: Legende Parameterliste

Die vollständige Parameter-Tabelle ist in folgender Datei zu finden:

[MH2Regio_AP1.2_Parameterliste.xlsx](#)

Detaillierte Informationen zu den technischen und wirtschaftlichen Eingangsparametern erfolgen in den nachfolgenden Kapiteln.

Wesentliche Eingangsparameter für die Systemmodellierung umfassen für die Elektrolyse die verfügbare Anschlussleistung, den Wirkungsgrad und das Druckniveau sowie den anzulegenden Strompreis.

Für Transport, Distribution und Absatz des Wasserstoffs an den Tankstellen sind Speicher- und Transportkapazität sowie der Betriebsdruckbereich von wesentlicher Bedeutung. Für die Tankstellen sind ebenfalls die Abnehmeranforderungen wie Betankungsgeschwindigkeit, Tankkapazität und tägliche Absatzmenge bestimmende Eingangsparameter.

4.1.4. Entwicklung von Standardnutzerprofilen

Die Entwicklung von Standardnutzerprofilen ist eine etablierte Methode, um für die unterschiedlichen Nutzergruppen und Wasserstoffanwender Zeitreihen des Wasserstoffbedarfs zu generieren. Aus den Gesprächen mit den Partnerunternehmen und der Auswertung der Fragebögen aus der Umfeldanalyse konnten die spezifische Wasserstoffnachfrage je Anwender und ein entsprechendes Betankungsprofil abgeleitet werden.

Die Nachfrageprofile bildeten die Grundlage für die weitere Auslegung der benötigten Wasserstofferzeugungs- und Distributionsinfrastruktur im Projekt MH2Regio.

4.1.4.1. Methodik

Zur Erstellung von Nachfrageprofilen als Eingangsparameter für die Gesamtsystemmodellierung sowie die technische Auslegung wurde eine möglichst hohe Genauigkeit der Datengrundlage angestrebt. Die methodische Vorgehensweise kann wie folgt dargestellt werden:

Schritt 1: Datenerhebung und -analyse

Schritt 2: Modellbildung und -parametrisierung

Schritt 3: Berechnung Nachfrageprofile für Referenzwoche
(je Anwender & Jahr)

Schritt 4: Zuordnung zu Tankstellenstandorten

Abbildung 27: Methodisches Vorgehen zur Erstellung von Standardnutzerprofilen

Zur Datenerhebung (Schritt 1) wurde zu Projektbeginn ein Fragenkatalog, in Zusammenarbeit mit Mainova und d-fine, erstellt und an die Projektpartner versandt. Mit dem Fragebogen wurden spezifische Angaben zum Fahrzeugbestand, Fahrleistung sowie Betankungszeiträumen abgefragt. In einer Online-Besprechung wurden die Fragebögen mit den Projektpartnern diskutiert und um zusätzliche Informationen ergänzt. Die erhaltenen Informationen aus Fragebogen und Online-Besprechung wurden konsolidiert und bildeten die Datengrundlage für die weitere Bearbeitung.

Zur Abbildung des Markthochlaufs der Wasserstoffnachfrage der Projektpartner (Umrüstung oder Neuananschaffung von BZ-Fahrzeugen) sowie aus dem Umfeld wurden die Markthochlaufkurven aus der Umfeldanalyse berücksichtigt, welche die prozentualen Umrüstungsquoten pro Jahr je Fahrzeugtyp und Anwendergruppe angeben. Zusammen mit dem ermittelten Fahrzeugbestand wurde die Anzahl an BZ-Fahrzeugen mit jährlicher Auflösung abgebildet und für die Stützjahre 2025, 2030, 2035, 2040, 2045 ermittelt.

In Schritt 2 wurde ein Berechnungsmodell erstellt, mit welchem in Schritt 3 die Nachfrageprofile für jeden Anwender und jedes Stützjahr berechnet und ausgegeben wurden. Die Berechnung erfolgte auf Basis der in Schritt 1 ermittelten Datengrundlage, insbesondere den Werten zum spezifischen Kraftstoffverbrauch, der Fahrleistung pro Tag, der Fahrzeuganzahl und dem Betankungszeitraum pro Tag. Die Auflösung der Nachfrageprofile ist stündlich für die im Rahmen der Gesamtsystemmodellierung betrachtete Referenzwoche (1 Woche = 168 Stunden) erfolgt.

In Schritt 4 wurden die berechneten Nachfrageprofile gemäß der vorgesehenen Tankstellenstandorte (Tankstellen 1-5) zugeordnet und zusammengefasst. Die zusammengefassten Nachfrageprofile werden als stündliche Zeitreihen dem Optimierungsmodell übergeben.

4.1.4.2. Übersicht Anwendergruppen

Tabelle 16: Übersicht Anwendergruppen

Anwender Code	Nutzergruppe	Fahrzeugkategorie und Fahrzeuganzahl	Datenqualität
Anwender 1	Personennahverkehr	Solobus (42), Gelenkbus (18)	Fragebogen
Anwender 2	Personennahverkehr	Solobus (25), Gelenkbus (8)	Fragebogen
Anwender 3	Logistik	LKW ()	Fragebogen
Anwender 4	Logistik	Abfallsammelfahrzeug (100)	Fragebogen, Tankprotokoll
Anwender 5	Personenfernverkehr	Reisebus (195)	Fragebogen
Anwender 6	Logistik		Fragebogen
Anwender 7	Personennahverkehr	Solobus (136), Gelenkbus (78)	Fragebogen, Umlaufplan
Anwender 8	Logistik	LKW mit Kipper und Kran (5), LKW (2)	Fragebogen, Tankprotokoll
Anwender 9	Binnenschifffahrt	Binnenfahrgastschiff (5)	Fragebogen
Anwender 10	Personennahverkehr	Solobus (35), Gelenkbus (19)	Fragebogen

4.1.4.3. Annahmen

Abweichend von den in der Umfeldanalyse ermittelten und im Modell hinterlegten Markthochlaufkurven wurden für die Anwender 7 und 9 Annahmen zur Anzahl der betriebenen BZ-Fahrzeuge getroffen. Demnach wurden für Anwender 7 im Jahr 2025 22 BZ-Fahrzeuge angenommen, basierend auf konkreten Anschaffungsplänen. Für Anwender 9 wurde in den Jahren 2025-2045 von einem BZ-Fahrzeug ausgegangen (Umrüstung oder Neuanschaffung).

Für den Wasserstoffverbrauch der BZ-Fahrzeuge wurden, basierend auf den Ergebnissen aus der Umfeldanalyse, die nachfolgenden Werte angenommen.

Tabelle 17: spezifischer Wasserstoffverbrauch je Fahrzeugkategorie

Fahrzeugkategorie	Spez. Wasserstoffverbrauch [kgH ₂ /100 km]
Binnenfahrgastschiff	8,80
Gelenkbus	11,51
Gepäckschlepper	3,60
Lkw	7,50
Lkw mit Kipper und Kran	11,78
Müllfahrzeug	6,45
Reisebus	7,37
Solobus	8,80
Zugmaschine	8,01
Kleintransporter	1,10

4.1.4.4. Nachfrageprofile je Nutzergruppe

Im Folgenden werden die Nachfrageprofile zusammengefasst nach Nutzergruppen dargestellt. Die dargestellten Nutzergruppen umfassen den Personennahverkehr, Logistik und Binnenschifffahrt. Für den Personenfernverkehr konnten wegen unzureichender Datengrundlage keine Nachfrageprofile dargestellt werden.

Zur Übersichtlichkeit werden nur die Nachfrageprofile im optimistischen Szenario mit geglättetem Verlauf, sog. „a+“-Szenario dargestellt.

Eine Übersicht der weiteren Nachfrageprofile ist in folgender Datei zu finden:

[MH2Regio_AP1.3_Nachfrageprofile je Anwender und Jahr.xlsx](#)

Personennahverkehr

Die Nutzergruppe des Personennahverkehrs setzt sich zusammen aus Anwender 1, Anwender 2, Anwender 7 und Anwender 10.

Die stündlichen Nachfrageprofile je Anwender sind nachfolgend dargestellt.

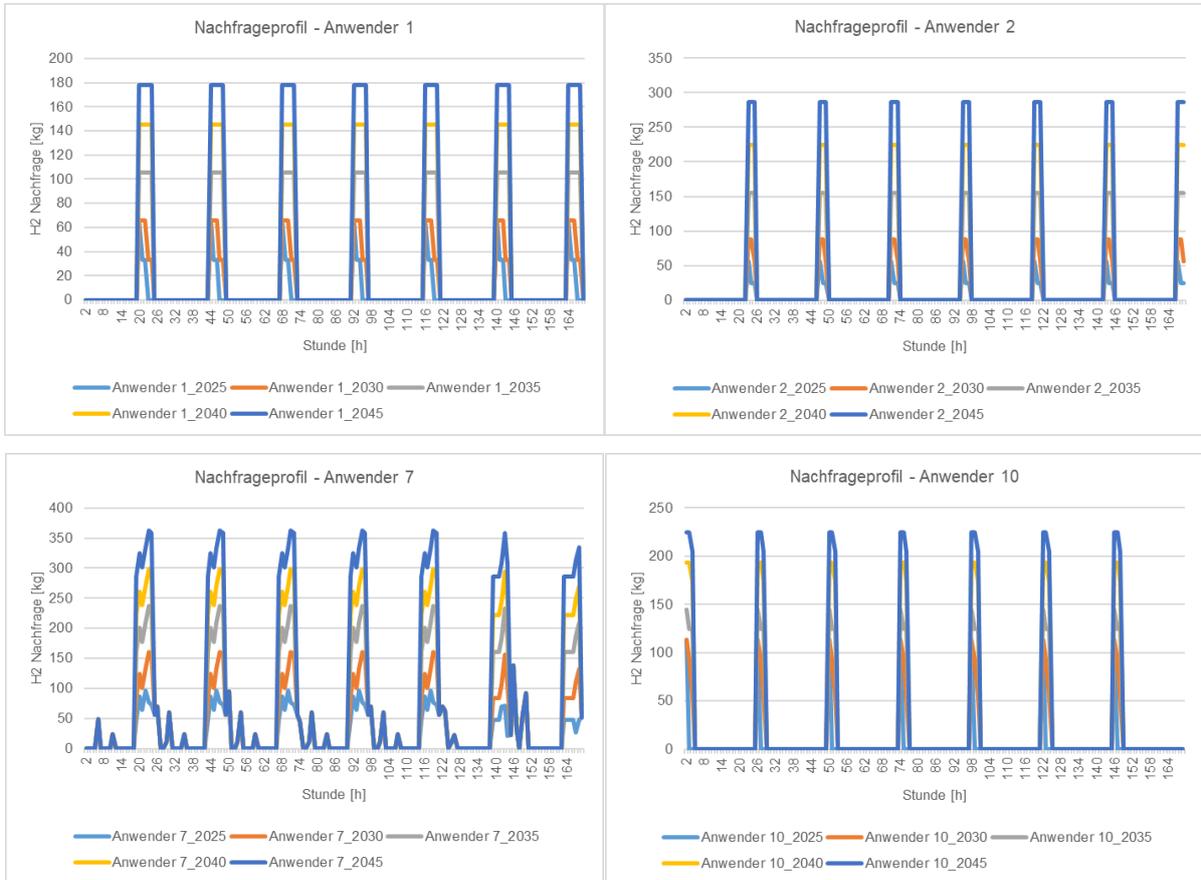


Abbildung 28: Personennahverkehr: stündliche Nachfrageprofile

Entsorgungslogistik

Die Nutzergruppe des Personennahverkehrs setzt sich zusammen aus Anwender 4 und Anwender 8. Die stündlichen Nachfrageprofile je Anwender sind nachfolgend dargestellt.

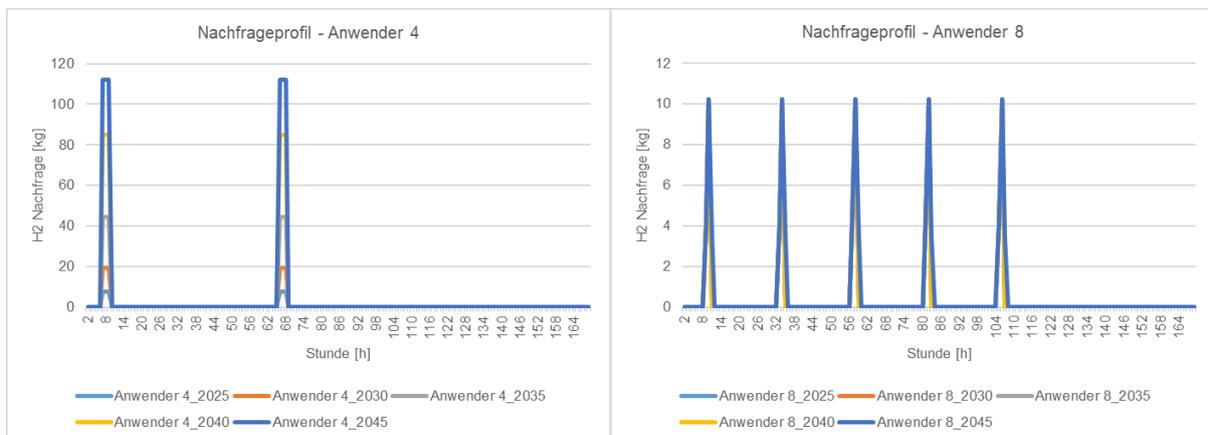


Abbildung 29: Entsorgungslogistik: stündliche Nachfrageprofile

Binnenschifffahrt

Die Nutzergruppe Binnenschifffahrt wird vertreten durch Anwender 9.

Das Nachfrageprofil ist nachfolgend dargestellt.

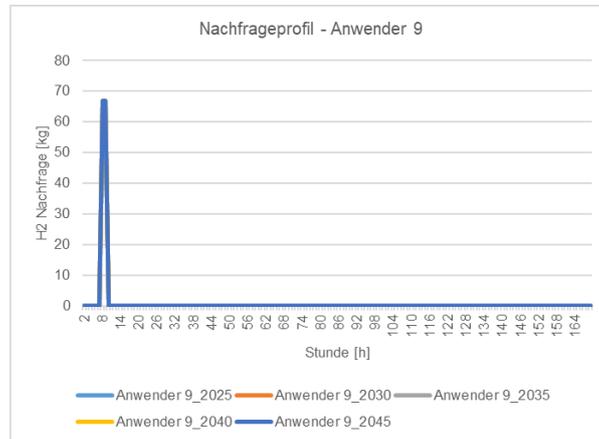


Abbildung 30: Binnenschifffahrt: stündliche Nachfrage

Umfeld

Den Tankstellenstandorten 4 und 5 wurde im Rahmen der Gesamtsystemmodellierung keine Nachfrage der Projektpartner explizit zugeordnet. Stattdessen wird eine Nachfrage aus dem allgemeinen Marktumfeld („Umfeld“) im Einzugsgebiet der Tankstellen auf Basis der in der Umfeldanalyse erfolgten Quellen-Senken-Analyse abgeleitet. Die Ergebnisse der Quellen-Senken-Analyse umfassen jedoch keine Nachfrageprofile, sondern geben das erwartete Absatzpotenzial in kg pro Tag an. Folglich musste eine Erstellung der stündlichen Nachfrageprofile vorgenommen werden, um den erforderlichen Detailgrad für das Optimierungsmodell zu erreichen. Hierzu wurden die Nachfrageprofile auf Basis der Tagesabsatzmenge mithilfe von öffentlich zugänglichen Daten parametrisiert. Die Nachfrageprofile wurden auf den Tagesabsatz normiert und für Busse und LKW / PKW in der nachfolgenden Grafik dargestellt. Aufgrund anderweitig nicht-verfügbaren Daten zu den Betankungszeiträumen von LKW wurden für PKW und LKW vereinfachend die gleichen Nachfrageprofile angenommen.

Im Vergleich zu den Nachfrageprofilen auf Basis der Angaben der Projektpartner ergab sich eine gleichmäßigere Verteilung der Absatzmenge über den Tagesverlauf mit einer schwächeren Ausprägung von Nachfragespitzen.

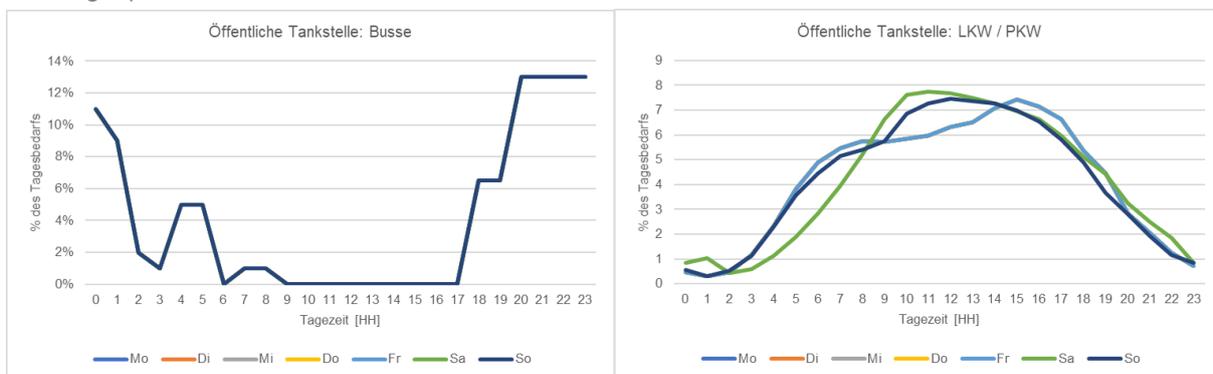


Abbildung 31: Normiertes Nachfrageprofil für Busse (links) und LKW/PKW (rechts)

Die zugrunde liegenden Markthochlaufwerte Umfeld sind in der Anlage hinterlegt:

Übersicht Markthochlaufwerte Umfeld

4.1.4.5. Nachfrageprofile nach Tankstellenstandort

Im Folgenden wurden die Anwender-Lastprofile den Tankstellenstandorten zugeordnet. Die Nachfrageprofile wurden je Tankstelle summiert und nachfolgend dargestellt.

Tabelle 18: Übersicht Tankstellenstandorte und zugeordnete Anwender

TANKSTELLENSTANDORT	ZUGEORDNETE ANWENDER
Tankstelle 1: MHKW	Anwender 4, Anwender 8, Anwender 10 (teilweise)
Tankstelle 2: assoziierter Partner	Anwender 9
Tankstelle 3: Osthafen	Anwender 2, Anwender 9, Umfeld
Tankstelle 4: Flughafen / Frankfurter Kreuz	Umfeld
Tankstelle 5: Niederrad	Umfeld

Tankstelle 1

Die maximale stündliche Nachfrage beträgt 114 kg/h im Jahr 2025 und steigt auf 225 kg/h bis zum Jahr 2045 an. Der mittlere Tagesabsatz steigt von 131 kg/Tag im Jahr 2025 auf 763 kg/Tag im Jahr 2045.

Tankstelle 2

Die maximale stündliche Nachfrage beträgt 138 kg/h im Jahr 2025 und steigt auf 362 kg/h bis zum Jahr 2045 an. Der mittlere Tagesabsatz steigt von 627 kg/Tag im Jahr 2025 auf 2.150 kg/Tag im Jahr 2045.

Tankstelle 3

Die maximale stündliche Nachfrage beträgt 75 kg/h im Jahr 2025 und steigt auf 341 kg/h bis zum Jahr 2045 an. Der mittlere Tagesabsatz steigt von 276 kg/Tag im Jahr 2025 auf 3.057 kg/Tag im Jahr 2045.

Tankstelle 4

Die maximale stündliche Nachfrage beträgt 7 kg/h im Jahr 2025 und steigt auf 296 kg/h bis zum Jahr 2045 an. Der mittlere Tagesabsatz steigt von 93 kg/Tag im Jahr 2025 auf 3.816 kg/Tag im Jahr 2045.

Tankstelle 5

Die maximale stündliche Nachfrage beträgt 13 kg/h im Jahr 2025 und steigt auf 125 kg/h bis zum Jahr 2045 an. Der mittlere Tagesabsatz steigt von 169 kg/Tag im Jahr 2025 auf 1.617 kg/Tag im Jahr 2045.

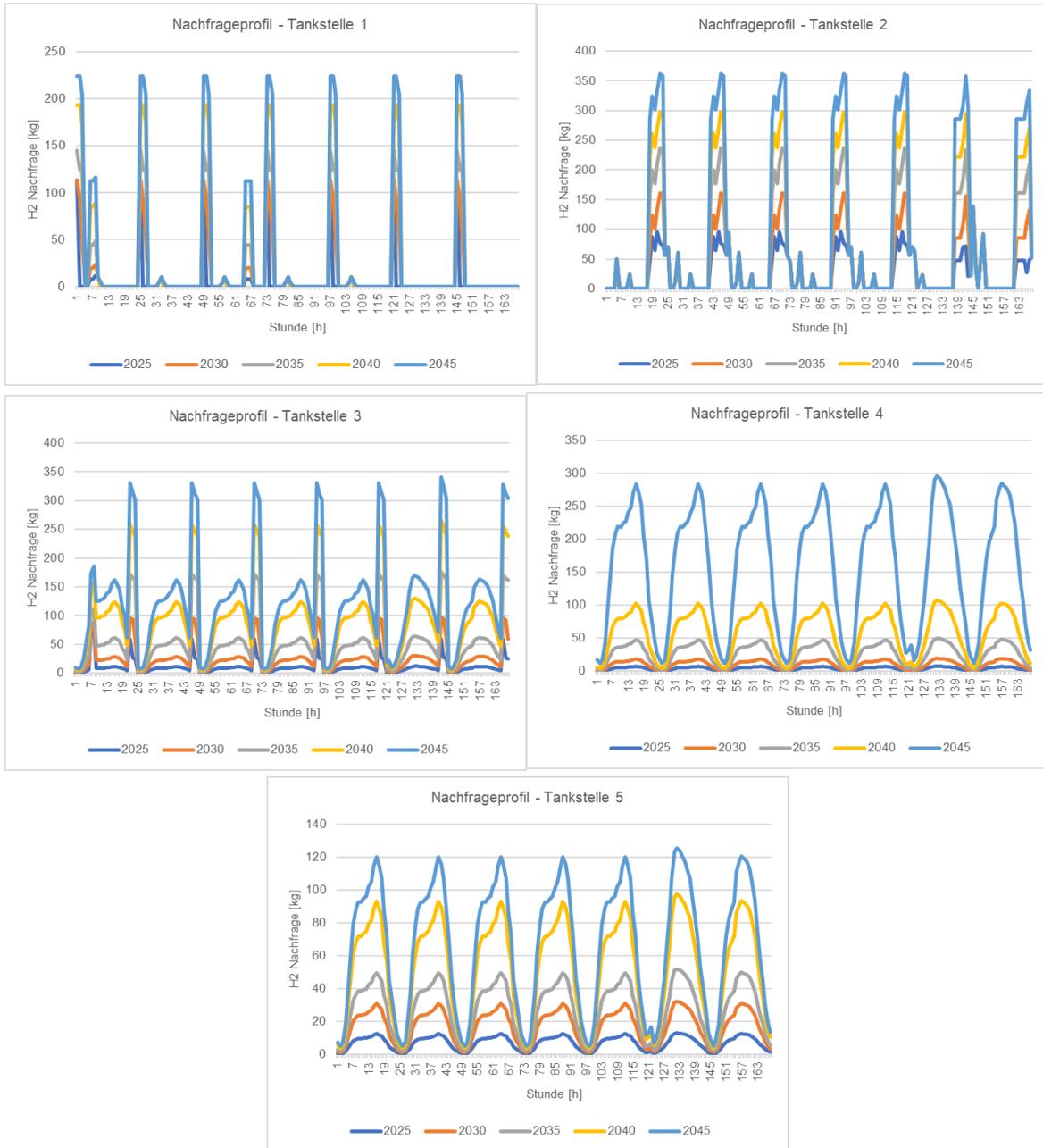


Abbildung 32: Nachfrageprofile einer Referenzwoche für die Tankstelle 1 - 5 (Szenario optimistisch geglättet)

Die Entwicklung des mittleren Tagesabsatzes je Tankstellenstandort über den betrachteten Projektzeitraum ist nachfolgend zusammenfassend dargestellt.

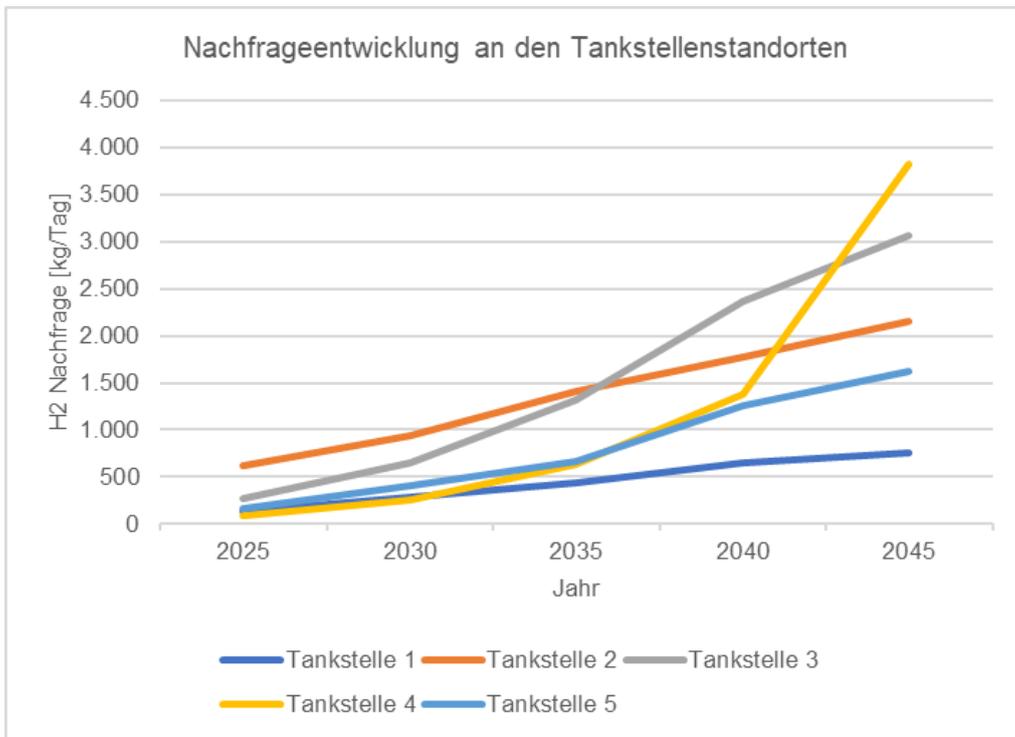


Abbildung 33: Nachfrageentwicklung (Tagesabsatz) an den Tankstellenstandorten

4.1.5. Definition von Störereignissen und Stresstestszenarien

Um ein zukünftiges Wasserstoffgesamtsystem betreiben zu können, ist es von entscheidender Bedeutung, wie resistent es gegen innere und äußere planbare und nicht planbare Störereignisse ist. Systemkomponenten müssen technisch so ausgelegt werden, dass sie Störereignisse ausgleichen können, aber dabei nicht überdimensioniert werden, um auf alle denkbaren Ereignisse reagieren zu können.

Dazu wurden Störereignisse identifiziert sowie eine vorläufige Risikobewertung erstellt, welche in den nachfolgenden Auslegungen berücksichtigt wurden und in die Systemmodellierung einfließen.

4.1.5.1. Methodik

Für die Erstellung von Stresstestszenarien für die Gesamtsystemmodellierung und deren Einfluss auf das Wasserstoffversorgungssystem, mussten zunächst mögliche Störereignisse identifiziert und deren Risiko für das Gesamtsystem bewertet werden. Danach wurden geeignete Maßnahmen zur Risikominderung abgeleitet.

Auf Basis der Risikobewertung wurden anschließend diejenigen Störereignisse ausgewählt, welche das höchste Risiko für das Gesamtsystem darstellen. Diese ausgewählten Störereignisse wurden als Stresstestszenarien definiert und deren Auswirkungen im Rahmen der Modellierung (Abschnitt 4.2) quantifiziert. Folgende Vorgehensweise wurde hierfür gewählt:

- Schritt 1: Identifizierung von Störereignissen
- Schritt 2: Bewertung des Risikos der Störereignisse (Risikobewertung)
- Schritt 3: Definition von Stresstestszenarien

Schritt 1: Identifizierung von Störereignissen

Die potenziellen Störereignisse wurden strukturiert erfasst. Unterschieden wurden dabei verschiedene Kategorien in Bezug auf den räumlichen Standort (Standort), die Systemebene (System), die technische Anlagenkomponente (Komponente) sowie die Planbarkeit (Planbarkeit).

In der Standortkategorie wurde zwischen den Standorten „MHKW“ und „MHKW-Betriebstankstelle“ unterschieden. Der Standort MHKW umfasst die Stromversorgung des MHKW, die Elektrolyseanlage sowie die Trailerabfüllanlage inkl. Verdichter. Die MHKW-Betriebstankstelle umfasst Hochdruckspeicher, Verdichter sowie Dispenser und Vorkühler.

Die nachfolgende Abbildung 34: Kategorien zur Identifizierung von Störereignissen stellt die betrachteten Kategorien dar. Es wurden vier Standortkategorien, sieben Systemkategorien und zwölf Komponentenkategorien sowie zwei Kategorien zur Planbarkeit unterschieden. Insgesamt wurden 40 verschiedene Störereignisse als Kombination der o.g. Kategorien ermittelt.

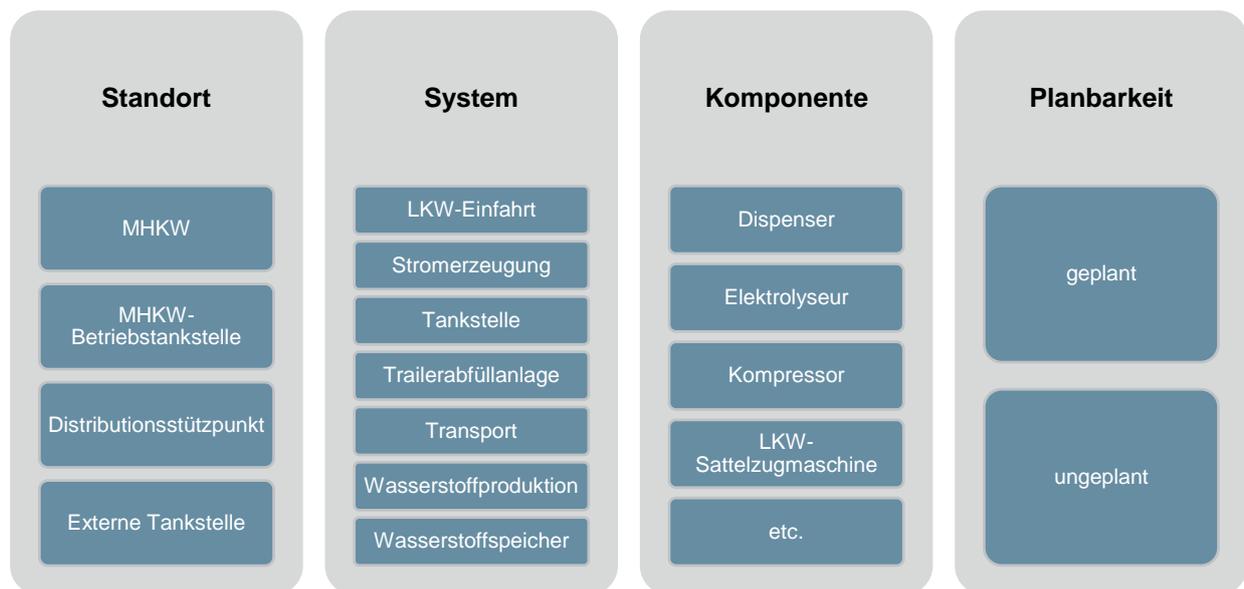


Abbildung 34: Kategorien zur Identifizierung von Störereignissen

Schritt 2: Risikobewertung

Zur Abschätzung des Risikos der Störereignisse wurde eine gewichtete Risikobewertung durchgeführt. Die Störereignisse wurden isoliert betrachtet, ohne Wechselwirkungen mit anderen Störereignissen. Zur Risikobewertung wurden folgende quantitativen und qualitativen Kriterien definiert:

quantitative Kriterien

- Eintrittswahrscheinlichkeit (1% - 100%)
- Häufigkeit (täglich, jährlich)
- Auswirkungsdauer (Stunden pro Jahr)

qualitative Kriterien

- Auswirkungsfaktor (1 – 5)

Die oben genannten Kriterien wurden für jedes in Schritt 1 definierte Störereignis ausgefüllt. Die Eingabewerte wurden auf Basis von Erfahrungswerten konservativ abgeschätzt und in Absprache mit Mainova festgelegt. Für die Wasserstofftankstellen wurden die ermittelten Werte mit Literaturwerten abgeglichen.

Die Berechnung des Risikos aus einem Störereignis erfolgte als Produkt aus Eintrittswahrscheinlichkeit und Auswirkungsdauer. Für die Definition von Eintrittswahrscheinlichkeit und Auswirkung wurde eine fünf-stufige Risikomatrix angewendet, wie in Abbildung 35: Matrix zur Risikobewertung dargestellt.

Zudem wurde ein normierter Risikobewertungsfaktor definiert, welcher Eintrittswahrscheinlichkeit, Häufigkeit, Auswirkungsdauer und Auswirkungsfaktor zu einem normierten Gesamtrisiko je Störereignis zusammenfasst. Die Normierung erfolgt auf das Ereignis mit der höchsten individuellen Risikobewertung. Der Risikobewertungsfaktor wurde wie folgt berechnet:

Risikobewertungsfaktor = Gewichteter Häufigkeitsfaktor (h/Jahr) x Auswirkungsdauer (h) x Auswirkung

Auswirkung	5	0,5	1,5	2,5	3,5	4,5
	4	0,4	1,2	2	2,8	3,6
	3	0,3	0,9	1,5	2,1	2,7
	2	0,2	0,6	1	1,4	1,8
	1	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9
		10%	30%	50%	70%	90%
		Eintrittswahrscheinlichkeit				

Legende Eintrittswahrscheinlichkeit

10% = sehr unwahrscheinlich (1% - 20%)

30% = unwahrscheinlich (21% - 40%)

50% = wahrscheinlich (41% - 60%)

70% = höchstwahrscheinlich (61% - 80%)

90% = fast sich (81% - 99%)

Legende Auswirkung

(Zeit, Kosten, Qualität, Funktionalität)

1 = zu vernachlässigen

2 = unkritisch (bis +5% Zeit, Kosten)

3 = in einzelnen Bereichen kritisch (bis +15% Zeit, Kosten)

4 = eingeschränkte Nutzbarkeit (bis +25% Zeit, Kosten)

5 = hoher wirtschaftlicher Schaden, Ergebnisse nicht nutzbar (>25% Zeit, Kosten)

Abbildung 35: Matrix zur Risikobewertung

Dadurch ließen sich die mit den Störereignissen verbundenen Risiken miteinander vergleichen und es konnten die Störereignisse mit dem größten erwarteten Einfluss auf das Gesamtsystem identifiziert werden. Anhand der Planbarkeit ließen sich die Störereignisse zudem weiter sinnvoll zur Ableitung von Stress-test szenarien clustern. In die Ergebnisdarstellung wurden je Standort die fünf Störereignisse mit der höchsten Risikobewertung übernommen.

Je Störereignis wurden geeignete Maßnahmen zur Risikominderung vorgeschlagen, welche in der nachfolgenden Definition von Stress-test szenarios in Schritt 3 berücksichtigt wurden.

Schritt 3: Definition von Stress-test szenarien

Basierend auf den Ergebnissen der Risikobewertung aus Schritt 2 wurden die Störereignisse mit der höchsten Risikobewertung ausgewählt und als Stress-test szenario für die Modellierung definiert. Insgesamt wurden sechs Stress-test szenarien definiert. Je Standortkategorie wurden zwei Szenarien nach der Planbarkeit unterschieden. Als Tankstellenstandort wurde nur die externe Tankstelle betrachtet.

4.1.5.2. Risikobewertung

In der Ergebnisdarstellung wurden je Standort die fünf Störereignisse mit der höchsten Risikobewertung übernommen. Diese stellen somit das repräsentative Risiko dar.

Risikobewertung MHKW Elektrolyse & Abfüllung

Die Ereignisse mit der höchsten Risikobewertung am Standort MHKW stellten ungeplante Instandhaltungsvorgänge an Elektrolyseur, Kompressor oder MHKW dar. Die Nichtverfügbarkeit von Elektrolyseur und Kompressor beeinflusst das Gesamtsystem unmittelbar, daher wurde die Auswirkung als hoch bis sehr hoch bewertet. Geplante Instandhaltungsmaßnahmen am MHKW wie die Kesselrevision stellten aufgrund der Planbarkeit und der relativen Häufigkeit (alle fünf Jahre) ein geringeres Risiko für das Gesamtsystem dar, welches durch organisatorische Maßnahmen wie einen externen Wasserstoffbezug reduziert werden kann.

Ungeplante Instandhaltungsmaßnahmen an der Trailerabfüllanlage stellten aufgrund der erwarteten vergleichbar kurzen Auswirkungsdauer ein geringes Risiko dar. Zudem kann eine vorübergehende Nichtverfügbarkeit über die als Planungskriterium berücksichtigten strategischen Speicherkapazitäten am Distributionsstützpunkt und Tankstelle überbrückt werden. Dies wurde in der Auslegung und Planung in den nachfolgenden Kapiteln berücksichtigt.

Risikobewertung MHKW Betriebstankstelle

Die Ereignisse mit der höchsten Risikobewertung am Standort der MHKW-Betriebstankstelle stellten ungeplante Instandhaltungsvorgänge an Kompressor und Speichertank(s) dar. Die Nichtverfügbarkeit des Kompressors beeinflusst den Betrieb der Tankstelle unmittelbar (sofern keine redundante Ausführung geplant wird), daher wurde die Auswirkung als hoch bewertet.

Ungeplante Instandhaltungsmaßnahmen an Einzelkomponenten der Tankstelle (Steuerung, Dispenser) stellten aufgrund der erwarteten vergleichbar kurzen Auswirkungsdauer ein geringeres Risiko dar. Als Extremereignis ist ein Ausfall der Gesamtanlage infolge eines Brandereignisses zu berücksichtigen, welcher aufgrund der geringen Eintrittswahrscheinlichkeit mit einem niedrigeren Risiko bewertet wurde.

Risikobewertung Distributionsstützpunkt

Die Ereignisse mit der höchsten Risikobewertung am Standort des Distributionsstützpunktes stellten ungeplante Ereignisse dar. Als Extremereignis ist ein Ausfall der Gesamtanlage infolge eines Brandereignisses zu berücksichtigen, welcher für den Standort als das höchste Risiko bewertet wurde.

Ungeplante vorübergehende Ereignisse wie die Beschränkung der Zufahrtswege oder Verzögerung durch erhöhtes Verkehrsaufkommen stellten aufgrund der erwarteten vergleichbar kurzen Auswirkungsdauer ein geringeres Risiko dar. Ungeplante Ereignisse wie Defekte an LKW-Sattelzugmaschine, Trailer oder Stellplatz stellten aufgrund der vorhandenen Redundanz das geringste Risiko dar.

Risikobewertung externe Tankstelle

Die Ereignisse mit der höchsten Risikobewertung am Standort der externen Tankstelle stellten ungeplante Instandhaltungsvorgänge an Kompressor und Speichertank(s) dar. Die Nichtverfügbarkeit des Kompressors beeinflusst den Betrieb der Tankstelle unmittelbar (sofern keine redundante Ausführung geplant wird), daher wurde die Auswirkung als hoch bewertet.

Ungeplante Instandhaltungsmaßnahmen an Einzelkomponenten der Tankstelle (Steuerung, Dispenser, Vorkühlung) stellten aufgrund der erwarteten vergleichbar kurzen Auswirkungsdauer ein geringeres Risiko dar. Als Extremereignis ist ein Ausfall der Gesamtanlage infolge eines Brandereignisses zu berücksichtigen, welcher aufgrund der geringen Eintrittswahrscheinlichkeit mit einem niedrigeren Risiko bewertet wurde.

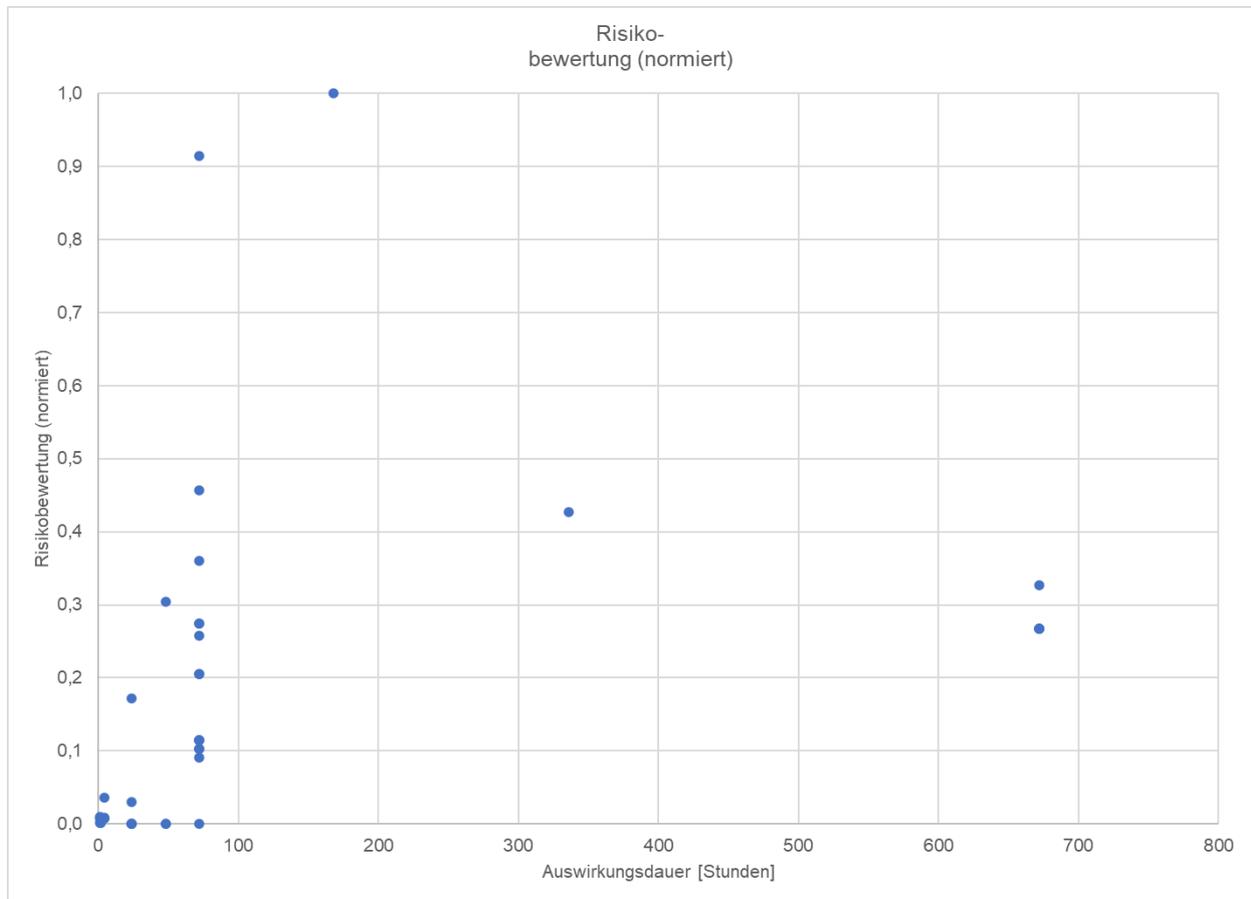


Abbildung 36: Verteilung der betrachteten Störereignisse nach Risikobewertung und Auswirkungsdauer

Die Verteilung der betrachteten möglichen Störereignisse nach Risikobewertung und Auswirkungsdauer ist in Abbildung 36: Verteilung der betrachteten Störereignisse nach Risikobewertung und Auswirkungsdauer dargestellt. Abbildung 36: Verteilung der betrachteten Störereignisse nach Risikobewertung und Auswirkungsdauer zeigt, dass für die Mehrzahl der Störereignisse eine Auswirkungsdauer von bis zu 72 Stunden (3 Tage) erwartet wird. Die Risikobewertung dieser Störereignisse liegt im moderaten Bereich bis 0,5.

Für die Definition der Stresstestszenarien und die Gesamtsystemplanung konnte daraus abgeleitet werden, dass der Zeitraum von 72 Stunden den oberen Grenzwert für eine Reservekapazität darstellt. Für Störereignisse, deren Auswirkungsdauer über diesen Zeitraum hinausgeht, sind organisatorische Maßnahmen zu prüfen und ggf. zu bevorzugen, um eine Überdimensionierung von Reservekapazitäten zu vermeiden.

4.1.5.3. Stresstestszenarien

Hinsichtlich der Auswirkung der identifizierten Störereignisse auf das Gesamtsystem ist die wesentliche Leitgröße die Ausfalldauer einer betroffenen Komponente, welche die Wasserstoffproduktion, den Wasserstofftransport oder die Betankung der BZ-Fahrzeuge beeinflusst.

Für die Modellierung der Stresstestszenarien wurden daher sechs verschiedene Störereignisse als repräsentative Szenarien erachtet. Betrachtet wurden die Systeme Produktion, Transport und Absatz mit jeweils einem geplanten und einem ungeplanten Störereignis. Als kürzeste Auswirkungsdauer wurde im System Transport ein erhöhtes Verkehrsaufkommen mit 4 Stunden betrachtet. Die längste Auswirkungsdauer stellt die Kesselrevision mit 672 Stunden als Extremfall dar. Ungeplante Instandhaltungsmaßnahmen wurden mit Auswirkungsdauern von 72 Stunden berücksichtigt, geplante Instandhaltungsmaßnahmen mit 24 Stunden.

Grundsätzlich wird die Modellierung der Stresstestszenarien für das unter technisch-wirtschaftlichen Aspekten optimale (ausgewählte) Szenario durchgeführt, um dessen Sensitivität auf zu erwartende Störereignisse zu testen und deren Robustheit / Resilienz zu bestätigen. Die Stresstestszenarien stellen somit eine Simulation dar.

Tabelle 19: Szenariomatrix Stresstestszenarien

System	Produktion		Transport		Absatz	
Szenario Nr.	S1a	S1b	S2a	S2b	S3a	S3b
Planbarkeit	geplant	ungeplant	geplant	ungeplant	geplant	ungeplant
Vorfall / Ursache	Instandhaltung / Kesselrevision	Störung / Steuerung	Instandhaltung / Inspektion	Störung / Verkehrsaufkommen	Instandhaltung / Inspektion	Störung / Kompressor
Auswirkungsdauer	672 h	72 h	24 h	4 h	24 h	72 h
Beeinflusste Komponenten (im Modell)	Generator	Elektrolyse	Trailer-Fahrplan	Trailer-Fahrplan	Kompressor, Speicher, Dispenser (Gesamtanlage Tankstelle)	Kompressor
Optionen zur Risikominderung (im Modell)	1. Externer H ₂ Bezug	1. Strategischer Speicher (Tankstelle) 2. Strategischer Speicher (Distribution) 3. Externer H ₂ Bezug	1. Strategischer Speicher (Tankstelle) 2. Strategischer Speicher (Distribution) 3. Externer H ₂ Bezug	1. Strategischer Speicher (Tankstelle) 2. Strategischer Speicher (Distribution) 3. Externer H ₂ Bezug	1. Umleitung Kunden an andere TS 2. Externer H ₂ Bezug (mobile TS)	1. Strategischer Speicher (Tankstelle) 2. Umleitung Kunden an andere TS 3. Externer H ₂ Bezug (mobile TS)

4.2. Softwaremodellierung des Gesamtsystems und technoökonomische Optimierung

Im Rahmen der Konzeptstudie wurde ein zweistufiges Optimierungsverfahren gewählt. Im ersten Schritt wurden die Systemelemente der einzelnen Wertschöpfungsstufen in ihren Hauptkomponenten vorausgelegt (siehe Kapitel 4.3) und nach dem Stand der Technik und den Vorgaben der Grundlagenermittlung dimensioniert. Im zweiten Schritt wurde das Gesamtsystem entsprechend den definierten Szenarien softwaregestützt modelliert und technisch-wirtschaftlich optimiert.

Diese Ergebnisse wurden wiederum in die finale Dimensionierung der Einzelkomponenten zurückgeführt. Dieses iterative Vorgehen gewährleistete eine Optimierung aller Systemelemente im Einklang des zu entstehenden Gesamtsystems.

Basierend auf den Erkenntnissen aus der Umfeldanalyse hinsichtlich zu erwartender Wasserstoffnachfragemengen im Raum Frankfurt und der in der Grundlagenermittlung erstellten Nutzerprofile (4.1.4) erfolgte im Rahmen der Modellierung die technisch-ökonomische Optimierung des Gesamtsystems.

Ziel der Modellierung war die Identifikation des kostenminimalen Versorgungssystems (Komponentendimensionierung) sowie dessen optimalen Betriebs unter Zugrundelegung von

- Nachfragezeitreihen für Wasserstoff an den verschiedenen Standorten,
- Elektrolysemöglichkeiten an den verschiedenen Standorten,
- Zeitreihen für stündliche Strompreisverläufe sowie deren erwartete Entwicklung im Projektzeitraum sowie der
- technischen und Kostenparameter der Komponenten zur Energieumwandlung und -Speicherung (Elektrolyseure, Kompressoren, Speicher, Transportmöglichkeiten).

4.2.1. Aufbau des Softwaremodells

Den Kern der Modellierung bildete die Tractebel-hauseigene Software PROSUMER. Neben PROSUMER wurde ebenfalls ein Logistikmodell verwendet, mit dessen Hilfe die genau benötigte Anzahl an Trailern für die verschiedenen Planungshorizonte festgestellt werden konnte, gegeben des Druckniveaus sowie der Aufteilung der Wasserstoffnachfrage auf die verschiedenen Standorte, der Distanzen zwischen den Standorten sowie der jeweils verfügbaren Speicherkapazität. Das Logistikmodell und PROSUMER wurden gemeinsam angewendet, um die optimale Gesamtsystemlösung zu ermitteln.

An die techno-ökonomische Systemoptimierung schloss sich eine detaillierte Kostenrechnung an, mit Hilfe derer insbesondere die Wasserstoffgestehungs- und bereitstellungskosten für die verschiedenen Standorte berechnet wurden. Schließlich wurden die Ergebnisse der techno-ökonomischen Optimierung sowie der Kostenrechnung für das ausgewählte Szenario in ein Finanzmodell übernommen. Hierin wurde die Umsetzung des optimalen Gesamtsystems im Rahmen von verschiedenen zu untersuchenden Betreibermodellen analysiert. Ziel der Finanzmodellierung war die Identifikation der Verrechnungspreise der einzelnen Akteure sowie die Ermittlung des notwendigen Förderbedarfs auf den verschiedenen Wertschöpfungsstufen.

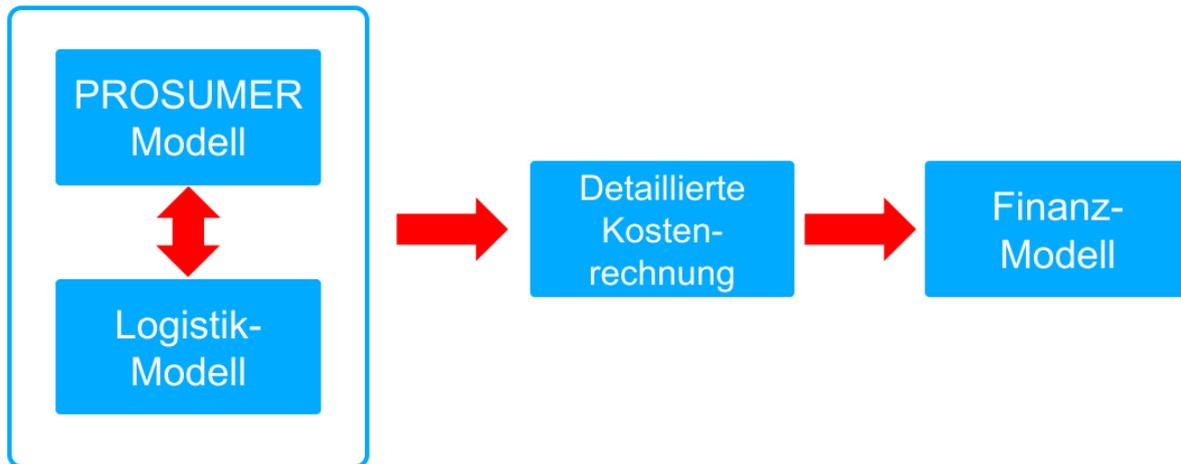


Abbildung 37: Zusammenspiel der verwendeten Modelle

4.2.1.1. PROSUMER

Die Grundlage des Softwaremodells bildete die Tractebel-hauseigene Software PROSUMER, die gleichzeitig Auswahl, Dimensionierung und Betrieb technischer Anlagen vor dem Hintergrund von Investitions- und Betriebskosten und regulatorischer Vorgaben optimiert. Hiermit können multi-fluide Energiesysteme (u.a. Strom, H₂, Wärme, Wasser, Kälte) über verschiedene Vektoren hinweg optimiert werden.

PROSUMER nutzt dafür:

- Gemischt-ganzzahlige lineare Optimierung
- verzweigte Netztopologien
- stündliche Auflösung der Last und Nachfrage verschiedener Knotenpunkte
- Betrachtungszeiträume von mehreren Jahrzehnten
- Betriebliche und wirtschaftliche Parameter verschiedener Ausbauoptionen
- Markt- und Regulierungsszenarien
- Finanzielle Parameter (WACC, Steuern, etc.)
- Definierte Zielparameter (bspw. Kostenminimierung, CO₂-Senkungsziele, etc.)

PROSUMER entwirft die optimale Systemkonfiguration entlang der Betriebsgesamtkosten. Hierbei liegt der Fokus auf strategischen Analysen bzw. Analysen konzeptioneller Geschäftsmodelle dezentraler Energieprojekte.

Abbildung 38: PROSUMER Beispielbild zeigt beispielhaft die Struktur der modellierten Netzknoten sowie der Objekte des in PROSUMER erarbeiteten Energiesystemmodells.

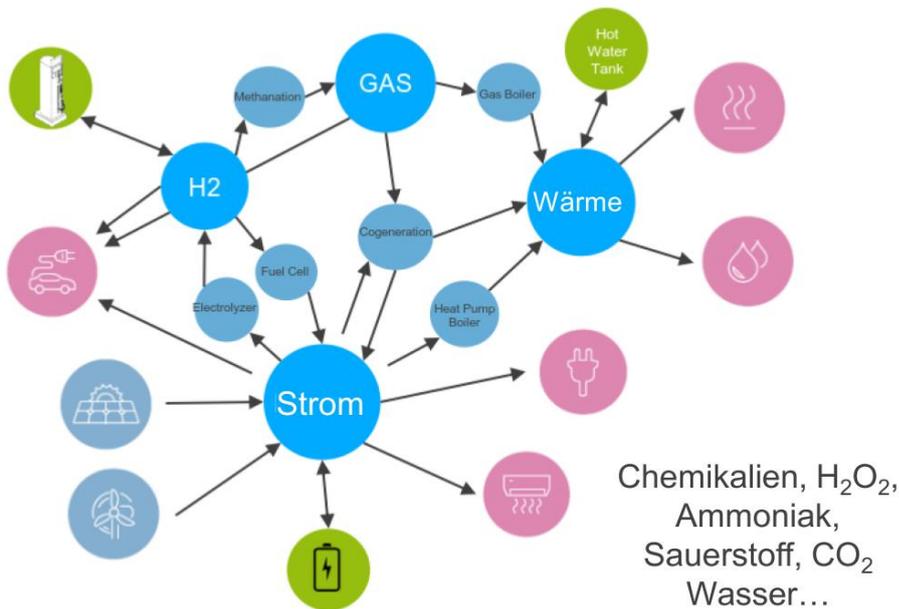


Abbildung 38: PROSUMER Beispielbild

4.2.1.2. Simulationsgrenzen

PROSUMER dient der optimalen Dimensionierung und Allokation, sowie dem optimalen Betrieb von Energiesystemen. Dabei handelt es sich um (Teil-)Systeme des öffentlichen Versorgungssystems, welche steuerbare Lasten und verteilte Energieressourcen wie beispielsweise dezentrale Energiequellen oder -speicher umfassen.

Diese Energiesysteme präsentieren sich gegenüber dem öffentlichen Versorgungssystem als eine einzige steuerbare Einheit und können entweder im Verbund mit dem öffentlichen Versorgungssystem oder im Alleinbetrieb kontrolliert und koordiniert werden. Die Vorteile der Energiesysteme bestehen in der Vor-Ort-Erzeugung und Vor-Ort-Speicherung der Energie, sowie in der Möglichkeit des bidirektionalen Leistungsflusses. Dadurch handelt es sich um eine flexible und unabhängige Ressource, welche bei optimaler Auslegung und optimalem Betrieb Kosteneinsparungspotenziale bietet. Allerdings weisen diese dezentralen Energiesysteme aufgrund ihrer Komplexität hohe Investitionsausgaben (engl.: capital expenditure; kurz: CAPEX) auf.

Das grundsätzliche Ziel hinsichtlich der optimierten Auslegung und des optimierten Betriebs solcher Energiesysteme besteht in der Kostenminimierung. Weitere mögliche Ziele einer solchen Optimierung können die Gesamtauswirkung der Energiesysteme auf die Umwelt, sowie die Stromqualität bzw. -zuverlässigkeit darstellen. Bezüglich dieser Ziele sind verschiedene Planungsebenen von Energiesystemen zu adressieren: Auswahl und Dimensionierung der technischen Anlagen, Standortwahl und Ressourcenzuweisung, sowie die Betriebsplanung.

Insbesondere in Bezug auf die Dimensionierung müssen die Anlagen zur Energieerzeugung und -speicherung auf den Spitzenlastbedarf und nach dem Kriterium der Kosteneffizienz dimensioniert werden. Hinsichtlich des Betriebs ist eine Minimierung der Betriebsausgaben (engl.: operational expenditures; kurz: OPEX) bei gleichzeitiger Abdeckung des Bedarfs anzustreben.

Die für das MH2Regio-Modell verwendeten Eingangsparameter umfassten:

- Nachfragezeitreihen nach Wasserstoff (350 bar, 700 bar)
- Elektrolysemöglichkeiten an den verschiedenen Standorten
- Zeitreihen für stündliche Strompreisverläufe sowie deren erwartete Entwicklung
- Kosten für die Bereitstellung von Wasser (VE-Wasser, Leitungswasser)
- Technische und Kostenparameter der Komponenten zur Energieumwandlung und -Speicherung (Elektrolyseure, Kompressoren, Speicher, Transportmöglichkeiten)

Entsprechend der Beschreibung handelt es sich bei dem in PROSUMER entwickelten Modell folglich um ein Energiesystemmodell (und nicht um ein physikalisches oder thermodynamisches Modell) auf Basis von Energiebilanzen für die verschiedenen untersuchten Energieträger (und Zustände) an den verschiedenen Modellknoten.

4.2.1.3. Schnittstellenanalyse

Wie in Abschnitt 4.2.1.1 dargelegt, wurde ein Großteil der Modellierung mit der Software PROSUMER durchgeführt. Da PROSUMER allerdings nicht alle Aspekte der benötigten Konzeptionierung abdeckt, kamen auch andere Modelle zum Einsatz. Auf das Zusammenspiel an den Schnittstellen zwischen den vier folgenden Modellen sowie deren Rolle im Planungsprozess des Gesamtprojekts wird in diesem Abschnitt eingegangen:

- PROSUMER
- Logistikmodell
- Modell zur detaillierten Kostenrechnung
- Finanzmodell

Die techno-ökonomische Gesamtsystemoptimierung fand in PROSUMER statt. Diese diente im Rahmen des projekteigenen Planungsprozesses als Vordimensionierung, die dann im Rahmen der technischen Planung angepasst und detailliert wurde (siehe Abschnitt 4.3). Ziel dieses Prozesses war es, die groben Anlagengrößen im Rahmen der Systemoptimierung zu optimieren und diese erst dann um die technischen Details zu ergänzen, die im Rahmen der PROSUMER-Modellierung nicht berücksichtigt werden konnten. Dieses Vorgehen wurde als vorteilhaft angesehen im Vergleich zu einer rein technischen Planung der Einzelkomponenten, die nicht optimal aufeinander abgestimmt sind (z.B.: Wo und auf welcher Druckstufe ist es kostenminimaler einen Speicher zu platzieren?).

Im Bereich des Wasserstofftransports sind die Trailerfahrten dergestalt modelliert, dass PROSUMER deren Zeitpunkte flexibel optimieren kann, sodass dies zu einem Gesamtdesignoptimum beiträgt. Die Anlagenoptimierung in PROSUMER wurde ergänzt durch ein eigens entwickeltes Logistikmodell, mit dem sichergestellt werden sollte, dass die Anzahl der von PROSUMER verwendeten (zeitlich auf Stundenbasis optimierten) Trailerfahrten in der Realität auch funktionieren kann. Dafür wurden im Logistikmodell neben der möglichen Wasserstoffproduktion am MHKW (und am Biomasse-HKW) sowie der Nachfrageprofile an der MHKW- und der/n externen Tankstelle(n) auch die jeweiligen Fahrtstrecken, die durchschnittliche

Fahrtgeschwindigkeit, Umschlagszeiten, die nutzbaren Kapazitäten der Trailer der verschiedenen Druckniveaus sowie weitere logistische Parameter berücksichtigt. Mithilfe des Logistikmodells wurde die Anzahl der operativ benötigten Trailer bestimmt. Die folgende Abbildung illustriert einen beispielhaften Trailerdispatch im Logistikmodell.

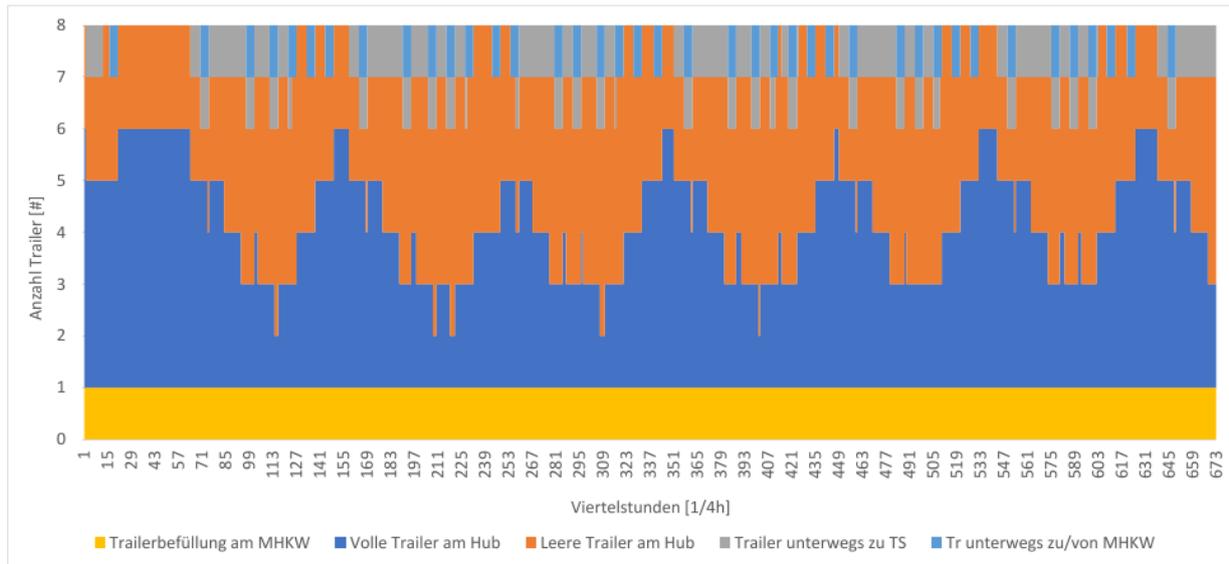


Abbildung 39: Logistikmodell - Beispiel Trailerdispatch

Sie zeigt, wie viele Trailer in einer Viertelstunde (i) gerade am MHKW befüllt werden, (ii) gerade voll und auch (iii) leer am Hub stehen, (iv) unterwegs zur externen Tankstelle und (v) zum MHKW sind.

Darüber hinaus wurde anhand des Planungskriteriums, dass immer eine Gesamtsystemtagesnachfrage am Distributionsstützpunkt in den Trailern vorgehalten werden muss, die Anzahl der strategisch benötigten Trailer festgelegt. Im Zusammenspiel kann gesagt werden, dass die anhand des Logistikmodells ermittelte Anzahl von benötigten Trailern eher konservativ (weil nicht optimiert) ist, da sie den Fokus auf die Ausbauplanung und eine ausreichende Kapazität legt. Der in PROSUMER optimierte stündliche Trailerfahrplan entspricht einer optimierten Einsatzplanung, gegeben der verfügbaren Transportressourcen, und trägt so zu einer optimalen Gesamtsystemoptimierung bei.

Die Ergebnisse aus PROSUMER und dem Logistikmodell fanden Eingang in das detaillierte Wirtschaftlichkeitsberechnungsmodell. Konkret wurden sämtliche Kostenzeitreihen (CAPEX sowie Ersatz-/Erweiterungsinvestitionen, fixe und variable OPEX) sowie Kosten, Kapazitäten und Mengen als auch Rehabilitierungsmaßnahmen und Bezug externer Medien (Strom, Wasser, externer H₂-Bezug) in das Wirtschaftlichkeitsmodell übernommen. Ziel war hier, für jedes Szenario die Gesamtsystemwasserstoffbereitstellungskosten (LCOH) zu ermitteln.

Auf der Basis des LCOH wurde das unter Wirtschaftlichkeitsgesichtspunkten optimale Szenario ausgewählt. Wie oben beschrieben, wurde für dieses ausgewählte Szenario eine erweiterte technische Planung vorgenommen basierend auf der techno-ökonomischen Vordimensionierung. Für das ausgewählte und technisch ausgelegte Szenario wurden die Kosten (anhand von Herstellerinformationen, Kostendatenbanken und Erfahrungswerten) genauer ermittelt. Die aktualisierten technischen und wirtschaftlichen Kostendaten fanden anschließend Eingang in das Finanzmodell zur Finanz- und Förderbedarfsanalyse (vgl. Abschnitt 4.2.4).

Hierin wurde die Umsetzung des optimalen Gesamtsystems im Rahmen von verschiedenen zu untersuchenden Betreibermodellen analysiert. Ziel der Finanzmodellierung war es, die Verrechnungspreise zwischen den einzelnen Akteuren, sowie den notwendigen Förderbedarf auf den verschiedenen Wertschöpfungsstufen zu ermitteln, sodass der hergestellte Wasserstoff konkurrenzfähig mit vergleichbaren konventionellen Brennstoffen ist.

4.2.2. Auswirkung Stresstestszenarien

Basierend auf der Definition der Störereignisse in 4.1.5.3 wurden Störfallszenarien erstellt. Die Stressszenarien wurden entlang der Bereitstellungskette / Infrastruktur in drei Systeme (Produktion, Transport, Absatz) gegliedert und in je zwei Fälle (geplant / ungeplant) unterteilt. Insgesamt wurden sechs Stresstestszenarien mit unterschiedlichem Einfluss auf das Gesamtsystem betrachtet.

Zur Risikominderung wurden je Stresstest verschiedene Maßnahmen betrachtet. Diese können hierarchisch gegliedert werden, wie in folgender Abbildung dargestellt. Dabei stellten die Nutzung der strategischen Speicher an Tankstelle und Distributionsstützpunkt die bevorzugten Maßnahmen dar, während die Nutzung mobiler Tankstellen oder der externe Bezug von Wasserstoff als am wenigsten bevorzugte Maßnahmen im Extremfall angesehen werden.



Abbildung 40: Hierarchische Gliederung der Risikominderungsmaßnahmen

Im Modell beeinflussen die Störereignisse verschiedene Anlagenkomponenten, deren Auswahl sich nach der Art des Störereignisses richtet. Folgende Modellkomponenten wurden beeinflusst:

- Generator (Stromversorgung MHKW)
- Elektrolyseur
- Trailerfahrplan
- Kompressor
- Speicher
- Dispenser

Als Optionen zur Risikominderung wurden dem Modell verschiedene Freiheitsgrade ermöglicht bzw. die Auswirkungen der Störereignisse bei fixierten („eingefrorenen“) Modellkapazitäten simuliert. Als Freiheitsgrad nutzbar war eine Änderung des Trailerfahrplans sowie Menge und Zeitpunkt des externen Wasserstoffbezugs. Folgende Optionen zur Risikominderung wurden im Modell betrachtet:

- Externer Wasserstoffbezug (Anlieferung von Trailern am Distributionsstützpunkt)
- Strategischer Speicher an Tankstelle oder Distributionsstützpunkt
- Umleitung Abnehmer / Kunden an andere Tankstelle im System
- Externer Wasserstoffbezug mit mobiler Tankstelle (Anlieferung an Tankstellenstandorten)

4.2.2.1. Stresstest 1 – Störung im System Produktion

S1a – Kesselrevision

Während eines Gesamtanlagenstillstandes am MHKW steht für einen Zeitraum von bis zu 624 h (26 Tagen) keine Stromversorgung zum Betrieb des Elektrolyseurs, der Trailerabfüllanlage oder der MHKW-Betriebstankstelle aus dem MHKW zur Verfügung (nur Netzstrombezug möglich). Da über die MHKW-Betriebstankstelle keine Betankungen möglich sind, müssen die zu betankenden Fahrzeuge (Abfallsammel-fahrzeuge FES, Busse) zu der externen Tankstelle umgeleitet werden. Somit kann als kurzfristige Maßnahme 1 nur die Nutzung des strategischen Speichers der externen Tankstelle betrachtet werden. Durch die höhere tägliche Absatzmenge verringert sich die eigentlich auf einen Tag ausgelegte Reichweite des strategischen Speichers von 24 h auf 18 h.

Als Maßnahme 2 könnte die strategische Reserve am Distributionsstützpunkt genutzt werden, welche für einen Tagesbedarf ausgelegt ist und somit für weitere 24 h die externe Tankstelle mit eigenerzeugtem Wasserstoff versorgen. Nach 46 h sind beide strategische Reserven aufgebraucht und eine externe Belieferung mit Wasserstoff per Trailer wird erforderlich. Hochgerechnet auf die restliche Überbrückungs-dauer von 630 h ergibt sich eine Wasserstoffmenge von 48,4 t, welche 102 Trailieranlieferungen (20' 500 bar MEGC) erforderlich macht.

Tabelle 20: Stresstestszenario 1a - Übersicht der Maßnahmen

		Kapazität / Menge	Überbrückungsdauer
Maßnahme 1	Strategischer Speicher Tankstelle (nur TS 2)	1.845 kg	18 h
Maßnahme 2	Strategischer Speicher H ₂ -Zentrallager	1.845 kg	24 h
Maßnahme 3	Externer H ₂ Bezug	48.406 kg	630 h

S1b – Störung Elektrolyseur

Bei einer Störung des Elektrolyseurs mit einer Auswirkungsdauer von 72 h erhöht sich die Reichweite durch Nutzung der strategischen Speicher an den Tankstellen, da im Vergleich zu Szenario S1a auch der strategische Speicher an der MHKW-Betriebstankstelle vollständig genutzt werden kann (Stromversorgung für Verdichter verfügbar). Der externe H₂ Bezug kann dadurch im Vergleich zu Szenario S1a begrenzt

werden. Mit jeder Maßnahme kann eine Überbrückungsdauer von 24 h erreicht werden. Kann die Störung am Elektrolyseur in kürzerer Zeit als angenommen behoben werden (z.B. leicht behebbarer Defekt, Serviceverträge mit Laufzeitgarantie), kann der externe H₂ Bezug gegebenenfalls vollständig vermieden werden.

Tabelle 21: Stresstestszenario 1b - Übersicht der Maßnahmen

		Kapazität / Menge	Überbrückungsdauer
Maßnahme 1	Strategischer Speicher Tankstelle	1.845 kg	24 h
Maßnahme 2	Strategischer Speicher H ₂ - Zentrallager	1.845 kg	24 h
Maßnahme 3	Externer H ₂ Bezug	1.845 kg	24 h

4.2.2.2. Stresstest 2 – Störereignisse im System Transport

S2a und S2b – Störung durch Instandhaltung oder Verkehrsaufkommen

Beispielhaft wird im Folgenden für eine Woche im Jahr 2035, in der eine 24-stündige Inspektion des Transportsystems stattfindet, gezeigt, welche Auswirkungen dies auf die Nachfragedeckung an der externen Tankstelle hat und auf welche Lösungen/Maßnahmen zurückgegriffen werden kann. Es wird angenommen, dass die 24-stündige Inspektion des Transportsystems am fünften Tag, d.h. im Zeitfenster Stunde 97-120, stattfindet. Während der Inspektion kann nicht auf die operativen sondern nur noch auf die strategisch gelagerten vollen Trailer zur Nachfragedeckung zurückgegriffen werden. Die folgende Abbildung illustriert den Nachfrageverlauf an der externen Tankstelle sowie das Zeitfenster der Inspektion im Transportsystem.

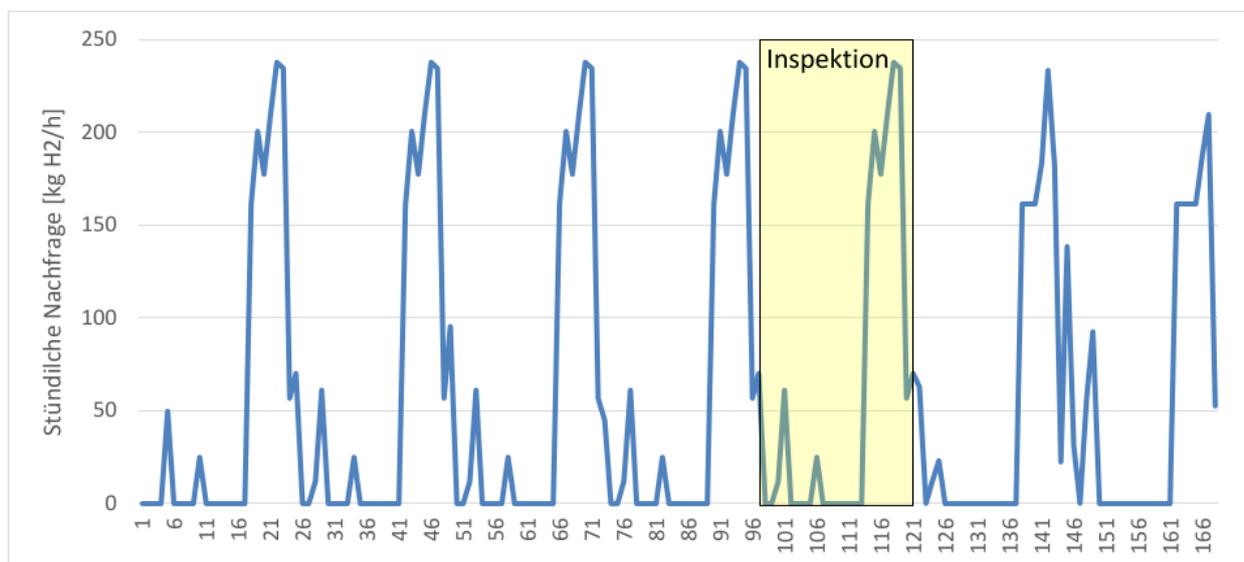


Abbildung 41: Stresstestszenario 2 – Inspektionszeitfenster

Maßnahme 1: Strategische Speicherkapazität an der externen Tankstelle

Wenn aufgrund der Inspektion des Transportsystems kein voller Trailer mehr die externe Tankstelle beliefern kann, dann kann als erste Maßnahme auf die strategische Speicherkapazität der externen Tankstelle zurückgegriffen werden. Das Designkriterium der Speicherkapazität besagt, dass diese so gewählt werden muss, dass im Regelbetrieb zu jedem Zeitpunkt mindestens eine Tagesnachfrage gedeckt werden kann. Für den Fall in 2035 beträgt der strategische Speicherfüllstand (engl. State of Charge, kurz SOC) also 1.400 kg. Dieser wird im Regelbetrieb nicht unterschritten. Da während der Inspektion keine vollen Trailer mehr den Speicher der externen Tankstelle befüllen können, muss hier vom Regelbetrieb abgewichen werden und der strategische Speicherinhalt zur Lastdeckung verwendet werden. Insbesondere in den Stunden 114-120 wird in sieben Stunden annähernd der gesamte strategische Speicher entleert. Ab Stunde 121, wenn die Inspektion vorbei ist, wird mittels zusätzlicher Trailerlieferungen der strategische Speicher wieder aufgefüllt. Abbildung 42 illustriert den Verlauf des Speicherfüllstands im regulären Betrieb sowie für den Fall der 24-stündigen Inspektion im Transportsystem.

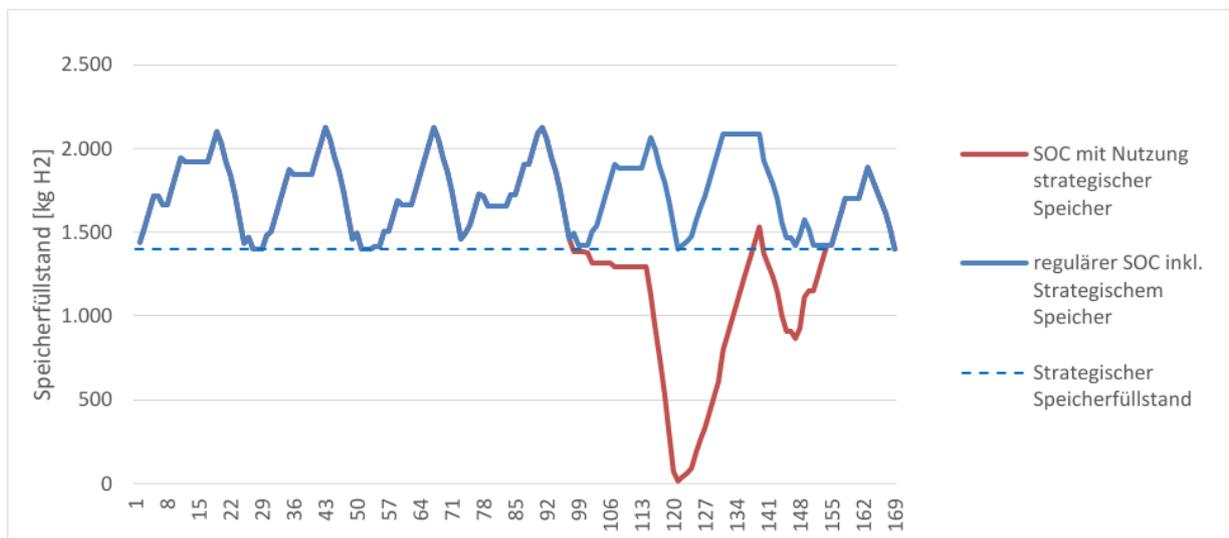


Abbildung 42: Stresstestszenario 2 – Verlauf Speicherfüllstand

Maßnahme 2: Strategische Trailerreserve

Alternativ kann auch auf die strategische Trailerreserve im Distributionsstützpunkt (Hub) zurückgegriffen werden. Können keine (eigentlich) operativen Trailer mehr vom MHKW oder vom Hub zur externen Tankstelle verkehren, dann besteht die Möglichkeit die strategisch gelagerten vollen Trailer aus dem Hub die externe Tankstelle beliefern zu lassen. Hierbei wird unterschieden zwischen operativen Trailern aus dem regulären Betrieb sowie strategischen Trailern, die eigens für Sonderfälle wie diesen voll vorgehalten werden. Die Anzahl der insgesamt verfügbaren, strategischen Trailer bemisst sich an einer durchschnittlichen Tagesgesamtsystemnachfrage, d.h. an der MHKW-Betriebstankstelle als auch an der externen Tankstelle. Für 2035 werden also insgesamt 8 Trailer vorgehalten. Im untersuchten Inspektionsfall werden davon 5 benötigt, um die Nachfrage an der externen Tankstelle zu decken.

Maßnahme 3: Externer H₂-Bezug

Soll oder kann nicht auf den strategischen Speicher der externen Tankstelle und auch nicht auf strategisch vorgehaltene volle Trailer zurückgegriffen werden, so kann alternativ auch auf den externen Bezug von Wasserstoff zurückgegriffen werden. Hierzu werden Trailer von einem externen Zulieferer bestellt, der

Nachfrage an der externen Tankstelle decken kann. Bevor der externe Bezug nötig wird, kann kurzfristig der verbleibende Speicherinhalt (außer dem strategischen s.o.) verwendet werden (Stunde 97-100). Dann erfolgt die Deckung mit Hilfe der externen Belieferung. Bei einem angenommenen externen Belieferungspreis von 15 EUR/kg H₂, liegen die Kosten der Interimsbelieferung folglich bei 20,2 TEUR.

Tabelle 22: Stresstestszenario 2a und 2b Übersicht der Maßnahmen

		Kapazität / Menge	Überbrückungsdauer
Maßnahme 1	Strategischer Speicher externe Tankstelle	1.400 kg	24 h
Maßnahme 2	Strategische Trailerre- server	3.795kg	24 h
Maßnahme 3	Externer H ₂ Bezug	1.345 kg	24 h

4.2.2.3. Stresstest 3 – Störereignis im System Absatz

S3a – Instandhaltung Tankstelle

Während einer geplanten Instandhaltungsmaßnahme an der Tankstelle steht die Betankung für einen Zeitraum von 24 Stunden nicht zur Verfügung. Für das Stresstestszenario wird davon ausgegangen, dass die Instandhaltungsmaßnahme entweder an der MHKW-Betriebstankstelle oder der externen Tankstelle durchgeführt wird, jedoch nicht an beiden Tankstellen zeitgleich. Als Risikominderungsmaßnahmen stehen die Umleitung der zu betankenden Fahrzeuge an die jeweils andere Tankstelle (Maßnahme 1) oder der externe H₂ Bezug durch eine mobile Tankstelle (Maßnahme 2) zur Verfügung.

Maßnahme 1

Eine Umleitung der Tankvorgänge zwischen den beiden betrachteten Tankstellen 1 und 2 erscheint aufgrund des gegenläufigen Nachfrageprofils als geeignete Maßnahme. Die Betankungszeiträume für Tankstelle 1 liegen zwischen 1 – 3 Uhr, 7 – 8 Uhr sowie 15 – 16 Uhr. Die Betankungszeiträume für Tankstelle 2 liegen zwischen 17 – 1 Uhr, 3 – 4 Uhr sowie 9 Uhr. Beide Nachfrageprofile ergänzen sich somit, ohne zu einer signifikanten Erhöhung der Spitzennachfrage zu führen. Eine Anpassung bzw. Verschiebung der Betankungszeitpunkte ist erforderlich zur Beibehaltung der ausgelegten Anlagenkonfiguration.

Bei einer Umleitung der Nachfrage von Tankstelle 1 zu Tankstelle 2 ist eine Erhöhung der Anlieferungsfrequenz mit Trailern vom Distributionsstützpunkt erforderlich, um die erhöhte Tagesnachfrage zu decken. Zu beachten ist, dass Tankstelle 2 nur zur Betankung von 350 bar Fahrzeugen geeignet ist. 700 bar Fahrzeuge (in diesem Fall Abfallsammelfahrzeuge) können nicht an Tankstelle 2 betankt werden.

Bei einer Umleitung der Nachfrage von Tankstelle 2 zu Tankstelle 1 ist eine zeitweise Reduktion bzw. Aussetzung der Trailerabfüllung erforderlich, um ausreichend Kapazität für die Tankstelle bereitzustellen. Auf Basis der Elektrolyse- und Verdichterkapazität (100,5 kg/h) beträgt die maximale tägliche Betankungsmenge 2,4 t/Tag, bei einer im Idealfall gleichmäßigen Verteilung der Betankungsvorgänge über den Tag. Im Praxisfall sind zudem betriebliche Aspekte zu beachten, z.B. in Bezug auf das zulässige Verkehrsaufkommen am Anlagenstandort.

Maßnahme 2

Ein externer Wasserstoff-Bezug durch mobile Wasserstofftankstellen stellt eine mögliche Lösung zur Überbrückung kurzzeitiger Störereignisse dar (vgl. folgenden Abschnitt). Zu beachten sind die unterschiedlichen Druckniveaus, welche ebenfalls von einer mobilen Tankstelle bedient werden müssen.

Tabelle 23: Stresstestszenarien 3a – Übersicht der Maßnahmen

		Kapazität / Menge	Überbrückungsdauer
Maßnahme 1	Umleitung der zu betanken- den Fahrzeuge	2.400 kg	24 h
Maßnahme 2	Externer H ₂ Bezug	1.845 kg	24 h

S3b Störung Tankstelle

Maßnahme 1 – Strategische Speichertankstelle

Bei einem Ausfall des Verdichters an der Tankstelle ist die Betankung von Fahrzeug nur aus dem Wasserstoffspeicher möglich, ohne weitere Nachverdichtung durch einen Verdichter wie im Normalbetrieb vorgesehen. Dadurch reduziert sich die nutzbare Speicherkapazität, da der Speicher nur bis zum Druckausgleich mit dem Fahrzeugtank genutzt werden kann. Der Ausfall des Speichers bedingt zudem, dass die Trailer-Anlieferung nicht bzw. ebenfalls nur eingeschränkt durch Überströmen bis zum Druckausgleich nutzbar ist. Die Überbrückungsdauer aus dem strategischen Speicher beträgt ca. 6 Stunden an jeder Tankstelle, unter Annahme eines vollständig gefüllten Speichers zu Beginn des Störereignisses.

Maßnahme 2 – Umleitung an andere Tankstelle

Die Umleitung der Fahrzeuge an eine andere Tankstelle des Systems (Tankstelle 1 / 2) stellt eine Lösungsmöglichkeit dar.

Maßnahme 3 – Externer Wasserstoff-Bezug durch mobile Tankstelle

Ein externer Wasserstoff-Bezug durch mobile Wasserstofftankstellen stellt eine mögliche Lösung zur Überbrückung kurzzeitiger Störereignisse dar. Für die Berechnung des Stresstestszenarios wird eine mobile Tankstelle mit einer Kapazität von 360 kg/Tag betrachtet. Auf Basis der Nachfrageprofile im Referenzjahr 2035 ergibt sich die folgende Anzahl von Anlieferungen während der Dauer der Störereignisse.

- Tankstelle 1: fünf Anlieferungen innerhalb von 72 Stunden
- Tankstelle 2: elf Anlieferungen innerhalb von 72 Stunden

Tabelle 24: Stresstestszenarien 3b – Übersicht der Maßnahmen

		Kapazität / Menge	Überbrückungsdauer
Maßnahme 1	Netto-Speicherkapazität (Druckausgleich)	TS 1: 115 kg TS 2: 346 kg	je 6 h
Maßnahme 2	Umleitung der zu betankenden Fahrzeuge	2.400 kg	24 h
Maßnahme 3	Mobile Tankstelle	TS 1: 1.800 kg TS 2: 3.960 kg	72 h

4.2.2.4. Auswertung Stresstest

Die Auswertung der Stresstestszenarien zeigte, dass für jedes Störereignis eine geeignete Minderungsmaßnahme / Lösung vorhanden ist. Aus technischer Sicht stellte der externe Wasserstoff-Bezug (durch Trailer oder mobile Tankstellen) in allen Fällen eine geeignete Lösung dar. Aus wirtschaftlicher Sicht wäre dieser jedoch ebenfalls mit hohen Kosten verbunden. Die strategischen Speicherkapazitäten an Tankstellen und Hub wären geeignet, kurzfristige Störereignisse mit Auswirkungsdauern von insgesamt bis zu zwei

Tagen zu überbrücken. Beim Ausfall kritischer Komponenten wie des Kompressors an der Tankstelle würde die Überbrückungsdauer signifikant beeinträchtigt und um bis zu 75 % reduziert.

4.2.3. Ergebnisse der technischen und wirtschaftliche Optimierung

Im Rahmen der Gesamtsystemmodellierung wurde ein techno-ökonomisches Optimierungsmodell basierend auf der Software PROSUMER entwickelt. In dem Optimierungsmodell fand eine kombinierte Optimierung unter sowohl technischen als auch wirtschaftlichen Aspekten statt. Eine Unterscheidung in zwei separate Optimierungsschritte – technisch und wirtschaftlich – ist daher nicht anwendbar im Rahmen des verfolgten Optimierungsansatzes.

In den folgenden Abschnitten des vorliegenden Berichtes werden die Ergebnisse der techno-ökonomischen Optimierung dargestellt.

4.2.3.1. Kostenstruktur Wasserstoffgestehung

Die Graphen in den zwei folgenden Tabellen stellen die Kostenstruktur der Wasserstoffgestehungskosten für die untersuchten zehn Szenarien dar (Grundmodell). Unterschieden wurden die folgenden Kostenkategorien:

- Erzeugung: Kosten für die Elektrolyseanlage (ohne Stromkosten)
- Strombedarf für die Elektrolyse, aber auch für den Betrieb der relevanten Nebensysteme
- Transport: Kosten für Trailer, Sattelzugmaschinen bzw. für den Bau und den Betrieb der Pipeline
- Tankstelle (TS): Bereitstellung des Wasserstoffs, d.h. Dispenser und Vorkühlaggregate
- Sonstige: Kosten für Kompressoren und Speicher
- H₂-Zukauf: Im Falle einer Unterdeckung der Nachfrage wird von einem Zukauf von 15 EUR/kg⁵ Wasserstoff ausgegangen

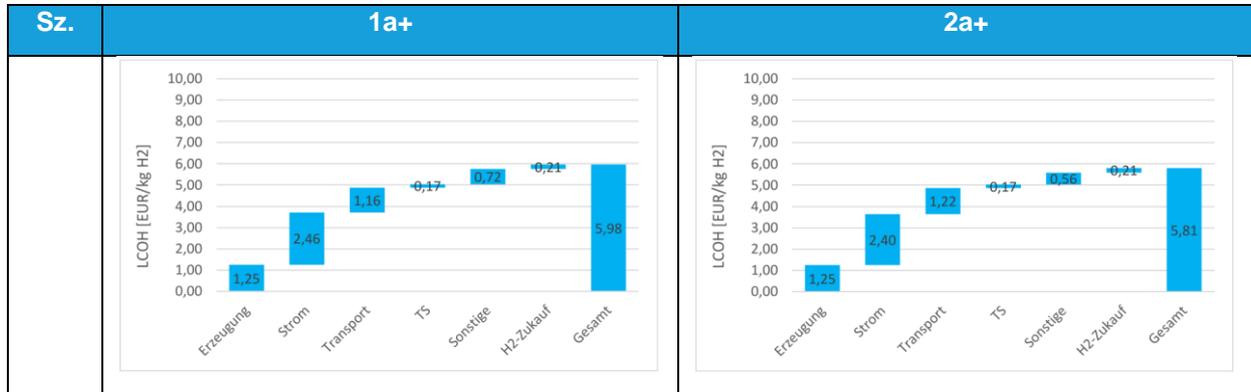
Die Kostenkategorien umfassen jeweils sowohl Investitionskosten als auch laufende Aufwendungen. Zum Ende des Betrachtungszeitraums 2025 – 2045 wurden die jeweiligen Restwerte der Anlagen berücksichtigt. Bei der Diskontierung wurde von einem Diskontsatz von 6% ausgegangen.

⁵ Der Zukaufspreis wurde aus modell-technischen Gründen in dieser Höhe festgelegt, um den unbeabsichtigten Zukauf von Wasserstoff aus externen Quellen zu vermeiden, solange dies nicht zur Lösung der Zielfunktion erforderlich war.

Tabelle 25: Wasserstoffgestehung in den Szenarien des Grundmodells

Sz.	Optimistische Nachfrage (a)	Konservative Nachfrage (b)
1		
2		
3		
4		

Tabelle 26: Wasserstoffgestehung in den geglätteten Szenarien des Grundmodells



Für die Grundmodell Szenarien kann Folgendes gesehen werden:

- Die Kosten für Erzeugung und Strombezug in den ersten drei Szenarien (Sz. 1-3) sind ähnlich, da es sich um die gleichen Elektrolyseurkapazitäten handelt. Die Kosten für Erzeugung in den Onsite-Szenarien (4a/4b) fallen höher aus, da hier generell mehr Elektrolyseleistung zugebaut werden muss, um die Bedarfe in beiden Standorten zu decken.
- Neben der EEG-Umlagenbefreiung von bis zu 5.000 Vollbetriebsstunden wurden bei der Berechnung des LCOH für die Onsite-Szenarien ebenfalls davon ausgegangen, dass für die weiteren Vollbetriebsstunden in der Zukunft keine EEG-Umlage zu zahlen ist. Dies passt ins Bild, da der Gesetzgeber die EEG-Umlage dauerhaft beschränken bzw. abschaffen will. Wird für die verbleibenden Vollbetriebsstunden eine EEG-Umlage von 25 EUR/MWh angesetzt, so würden die LCOH für die Szenarien 4a 6,95 EUR/kg H₂ (statt 6,61 EUR/kg H₂) und 4b 7,18 EUR/kg H₂ (statt 6,90 EUR/kg H₂) betragen. Wird konservativ von einer ähnlichen EEG-Umlage wie in den Jahren vor 2021 von ca. 65 EUR/MWh ausgegangen, so würden die LCOH 7,51 EUR/kg H₂ (4a) und 7,63 EUR/kg H₂ (4b) betragen.
- Die Kosten in den ersten beiden Szenarien (Transport per Trailer) sind ähnlich, fallen aber in Szenario 3 deutlich höher aus. Letzteres liegt an den hohen Investitionskosten für die Pipeline, die nur zu etwa 10% ausgelastet ist. Im vierten Szenario (Onsite-Elektrolyse) fallen per definitionem keine Transportkosten an.

Tabelle 27: Wasserstoffgestehung in den Modell 2040 Szenarien



Für die Modell 2040 Szenarien kann folgendes gesehen werden:

- Die Wasserstoffbereitstellungskosten im Trailerszenario 5a+ (5,71 EUR/kg H₂) und im Onsite-Szenario 7a+ (5,62 EUR/kg H₂) sind auf einem vergleichbaren Niveau.
- Demgegenüber liegen die Wasserstoffbereitstellungskosten im Pipeline-Szenario deutlich über den Kosten von Szenario 5a+ und 7a+. Begründet wird dies durch die niedrige Auslastung der Pipeline, welche von Anfang an mit ihrer vollen Kapazität installiert wird, die Auslastung zu Beginn nur bei ca. 10% liegt. Erst im letzten Jahr wird die volle Kapazität verwendet.
- Neben der EEG-Umlagenbefreiung von bis zu 5.000 Vollbetriebsstunden wird bei der Berechnung des LCOH für das Onsite-Szenario ebenfalls davon ausgegangen, dass für die weiteren Vollbetriebsstunden in der Zukunft keine EEG-Umlage zu zahlen ist. Dies passt ins Bild, dass der Gesetzgeber die EEG-Umlage dauerhaft beschränken bzw. abschaffen will. Wird für die verbleibenden Vollbetriebsstunden eine EEG-Umlage von 25 EUR/MWh angesetzt, so würde der LCOH für das Szenario 7a+ 6,26 EUR/kg H₂ (statt 5,62 EUR/kg H₂) betragen. Wird konservativ von einer ähnlichen EEG-Umlage wie in den Jahren vor 2021 von ca. 65 EUR/MWh ausgegangen, so würde der LCOH 7,01 EUR/kg H₂ betragen. Unter Berücksichtigung der EEG-Umlage wäre also das Onsite-Szenario (deutlich) teurer als das Trailerszenario.
- Da im Gegensatz zum Trailer- oder Onsite-Szenario im Pipeline-Szenario kein nachfrage-orientierter Ausbau der Transportkapazität möglich ist, sind im Pipeline-Szenario in den Anfangsjahren Überkapazitäten vorhanden, die erst bei vollständigem Markthochlauf ausgeglichen werden können.
- Im Trailer-Szenario wird die benötigte Transportkapazität je nach Bedarf erweitert. Im Onsite-Szenario wird gar kein Transport benötigt. Dementsprechend ist das Pipeline-Szenario unter den gegebenen Annahmen mit den höchsten Wasserstoffbereitstellungskosten verbunden.

Anmerkung: wenn die Pipeline von Anfang an mit der vollen Kapazität ausgelastet wäre, z.B. durch einen Ankerkunden mit konstanter hoher Nachfragemenge, dann verringert sich der LCOH für das Pipeline-Szenario auf 6,30 EUR/kg H₂.

4.2.3.2. Ranking der Szenarien im Grundmodell

Ranking	Szenario Nr	KPI H ₂ -Bereitstellung
1	2b (Trailer 500 bar, konservativ)	5,72 EUR/kg H ₂
2	2a+ (Trailer 500 bar, optimistisch, geglättete Nachfrage)	5,81 EUR/kg H ₂
3	2a (Trailer 500 bar, optimistisch)	5,91 EUR/kg H ₂
4	1b (Trailer 200 bar, konservativ)	5,94 EUR/kg H ₂
5	1a+ (Trailer 200 bar, optimistisch, geglättete Nachfrage)	5,98 EUR/kg H ₂
6	1a (Trailer 200 bar, optimistisch)	6,04 EUR/kg H ₂
7	4a (Onsite-Elektrolyse, optimistisch)	6,61 EUR/kg H ₂
8	4b (Onsite-Elektrolyse, konservativ)	6,90 EUR/kg H ₂
9	3a (Pipeline, optimistisch)	8,49 EUR/kg H ₂
10	3b (Pipeline, konservativ)	9,32 EUR/kg H ₂

Generell lässt sich feststellen, dass

- die Kostenunterschiede zwischen den Trailer-Szenarien 1 und 2 relativ gering sind;
- die Nachfrage-Glättung in den Trailer-Szenarien 1a+ und 2a+ zu einer Kostenreduktion führen;
- die dezentrale Onsite-Elektrolyse generell teurer ist als die zentrale Elektrolyse am MHKW;
- die Pipeline-Szenarien mit Abstand am teuersten sind. Hier gilt zu beachten, dass die Pipeline im Durchschnitt nur zu ca. 10% ausgelastet ist, diese Szenarien aber dennoch die vollen Kosten tragen. Wenn entsprechend auch nur 10% der Kosten für die Pipeline angenommen würden, läge der KPI+ im Szenario 3a bei 5,09 EUR/kg H₂, im Szenario 3b bei 5,16 EUR/kg H₂. Dementsprechend wäre dann Szenario 3a am günstigsten.

4.2.3.3. Darstellen des optimalen Gesamtsystems im Grundmodell

Das kostengünstigste Szenario stellt das Szenario 2b dar, dies allerdings für eine konservative Nachfrageentwicklung. Für die optimistische Nachfrageentwicklung ist das Szenario 2a+ am kostengünstigsten. Die Anlagenauslegung für dieses Szenario ist ebenfalls geeignet, falls sich eine niedrigere als die optimistische Nachfrage einstellt. Da allerdings von einer stark wachsenden Nachfrage ausgegangen wird (für die das konservative Szenario nicht geeignet ist), wird Szenario 2a+ als weitere Planungsgrundlage ausgewählt. Szenario 2a+ stellt somit eine robuste Systemauslegung dar, für welche nur mit geringfügigen Mehrkosten in Bezug auf die Wasserstoffbereitstellungskosten zu rechnen ist (+ 0,10 EUR/ kg H₂ im Vergleich zu 2b).

Das folgende Blockfließdiagramm zeigt dementsprechend die Struktur des optimalen Szenarios 2a+ (Trailer 500 bar, optimistische, geglättete Nachfrage) für den Endausbau im Jahr 2045 dar.

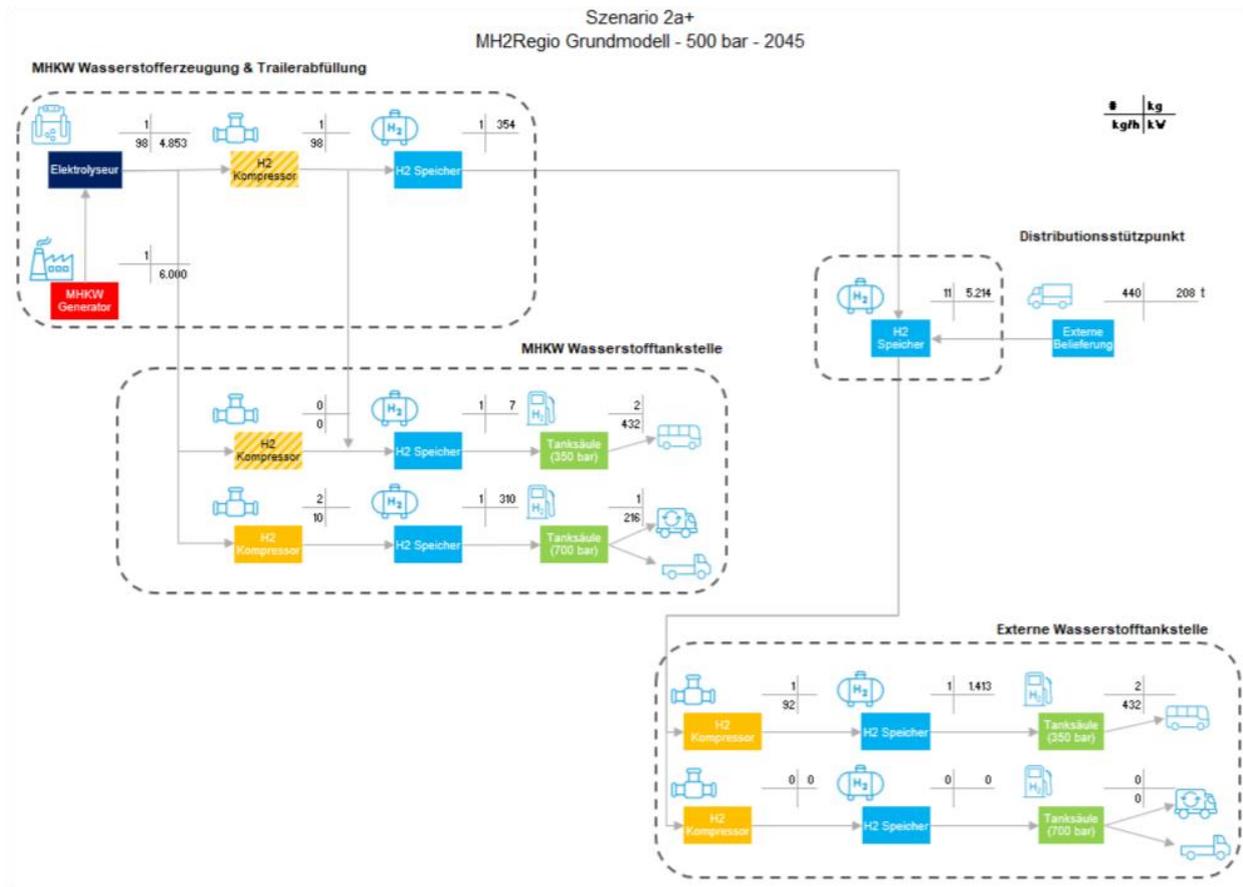


Abbildung 43: Blockfließdiagramm des Szenario 2a+

Dementsprechend beträgt die (bis im Jahr 2045 bereits geringfügig degradierte) Elektrolyseurleistung 4,9 MW mit einer maximalen Produktionskapazität von 98 kg/h H₂. Der 500 bar Kompressor verfügt über eine Leistung von 98 kW, für den Hochdruckspeicher an der Trailerabfüllanlage wird eine Netto-Speicherkapazität von 354 kg H₂ berechnet. Die MHKW-Betriebstankstelle verfügt im 700 bar-Strang über zwei Kompressoren (30 auf 900 bar und 500 auf 900 bar) mit zusammen 10 kg/h H₂ Durchsatz. Zudem wird ein 900 bar Speicher mit 310 kg Netto-Speicherkapazität berechnet. Im 350 bar-Strang wird ein 500 bar Speicher mit 7 kg Netto-Speicherkapazität berechnet. Für die Betankung werden 2 x 350 bar Dispenser und 1 x 700 bar Dispenser berechnet, mit einem H₂-Durchsatz von 216 kg/h (entspricht 3,6 kg/min) je Dispenser. Am Distributionsstützpunkt stehen insgesamt 11 x 500 bar Trailerstellplätze mit einer Netto-Speicherkapazität von 5.214 kg H₂ zur Verfügung. Da im Falle der optimistischen Nachfrage der Elektrolyseur nicht die gesamte Nachfrage abdecken kann, werden 440 Trailerlieferungen mit insgesamt 208 t/Jahr externer H₂-Belieferung benötigt. Im Falle der konservativen Nachfrageentwicklung reicht die Produktionsleistung des MHKW-Elektrolyseurs aus, um die komplette Nachfrage zu decken und es ist keine externe Belieferung (am Distributionsstützpunkt) erforderlich. An der externen Wasserstofftankstelle ist ein 500 bar Kompressor mit 92 kg/h H₂ zum Entleeren der Trailer sowie ein 500 bar Speicher mit 1.413 kg Netto-Speicherkapazität vorgesehen. An der externen Tankstelle werden zwei 350 bar Dispenser mit einem gesamten Durchsatz von 432 kg/h H₂ berechnet.

4.2.3.4. Darstellen des optimalen Gesamtsystems im Vision 2040 Modell

Im Folgenden werden die Modellierungsergebnisse für die Vision 2040 Szenarien dargestellt. Von den untersuchten Szenarien stellte das Szenario 7a+ (Onsite-Elektrolyse) das kostenoptimale Gesamtsystem dar. Eine Übersicht der Elektrolyseleistungen und der durchschnittlichen täglichen Wasserstoff-Absatzmenge an den Tankstellen für Szenario 7a+ zeigt die folgende Übersichtskarte.

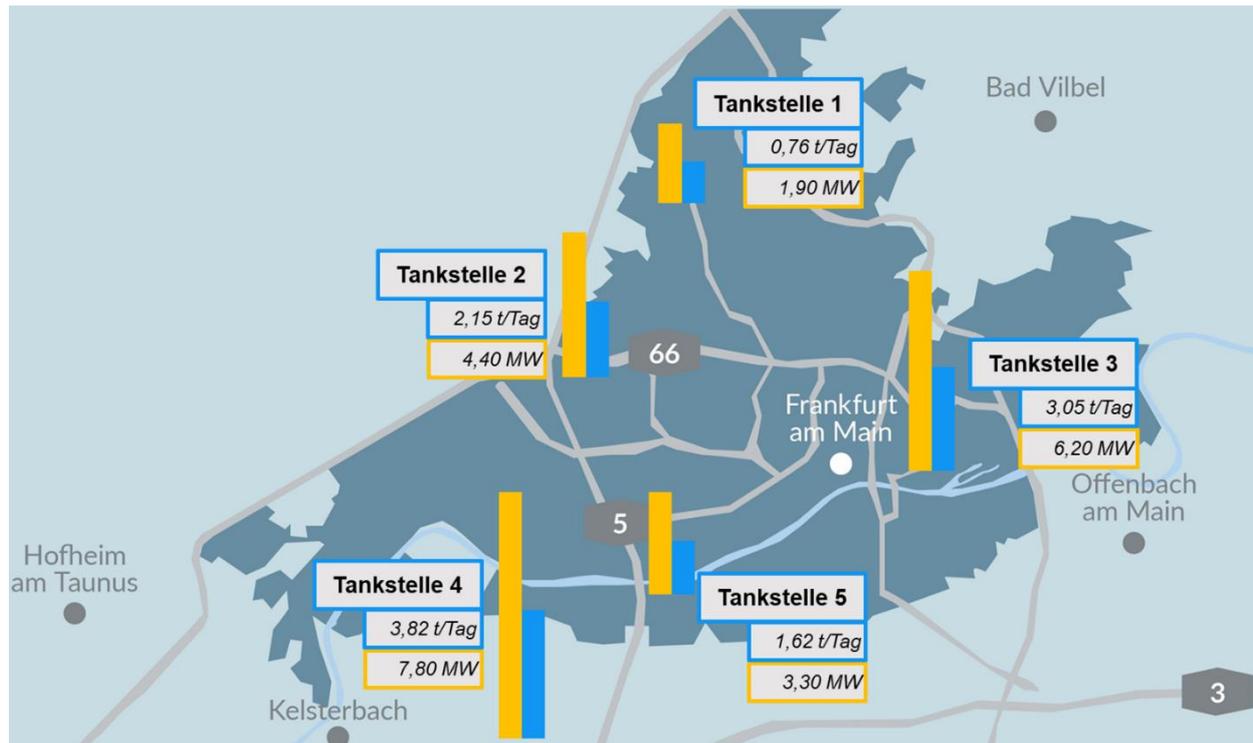


Abbildung 44: Übersichtskarte der Elektrolyse- und Tankstellenkapazitäten im Szenario 7a+

4.2.3.5. Ranking der Szenarien im Vision 2040 Modell

Tabelle 28: Ranking der Szenarien im Vision 2040 Modell

Ranking	Szenario Nr	KPI H ₂ -Bereitstellung
1	7a+ Onsite Elektrolyse	5,62 EUR/kg H ₂
2	5a+ Trailer 500 bar	5,71 EUR/kg H ₂
3	6a+ Pipeline	15,63 EUR/kg H ₂

4.2.3.6. Vergleich Grundmodell und Vision 2040 Modell

Im direkten Vergleich der Parallelszenarien aus Grundmodell und Vision 2040 Modell ergibt sich Folgendes:

- Die spezifischen Kosten im 500 bar Trailer-Szenario sind etwa identisch. Das Vision 2040 Modell profitiert in geringem Umfang von Skaleneffekten in Produktion und Transport.
- Das Pipeline-Szenario stellt sowohl im Grundmodell als auch im Vision 2040 Modell mit Abstand das Szenario mit den höchsten Bereitstellungskosten dar.

Im Vision 2040 Modell sind die Kosten allerdings fast doppelt so hoch wie im Grundmodell. Dies liegt zum einen an der spezifisch viel größeren, notwendigen Länge der Pipeline und den damit einhergehenden deutlich höheren Kosten als auch an der Annahme des massiven Markthochlaufs, bei der anfänglich nur 10% und erst im letzten Jahr die volle Kapazität benötigt werden (~Faktor 10). Im Grundmodell zeichnet sich der Nachfrageanstieg lediglich durch den Faktor ~4 aus. Wären die Pipelines jeweils von Beginn an voll ausgelastet ergäben sich signifikant geringere Kosten, wobei auch hier das Vision 2040 Modell teurer ist.

- Im Onsite-Szenario sind die Wasserstoffbereitstellungskosten ca. 1 EUR/kg H₂ niedriger als im Vision 2040 Modell verglichen mit dem Grundmodell. Auch hier kommen Skaleneffekte in Produktion und v.a. in den Nebensystemen zu tragen, da die Nachfrage an den drei zusätzlichen externen Tankstellen deutlich höher ist als die an der MHKW- und der einen externen Tankstelle im Grundmodell.
- Während im Grundmodell folglich die Trailerlösung am wirtschaftlichsten ist, ändert sich im Vision 2040 Modell die Reihenfolge: Hier erscheint die Onsite-Elektrolyse geringfügig günstiger als die zentrale Elektrolyse mit Trailertransport. Die Mehrkosten der On-site-Elektrolyse (Investition [geringere Skaleneffekte als bei der zentralen Lösung] und Betrieb [höhere Stromkosten als bei der zentralen Lösung]) übersteigt nun nicht mehr die Transportkosten im Trailerszenario und führt damit prinzipiell zu einem gleichmäßigeren Kostenniveau.
- Zu bedenken ist der Platzbedarf zur Installation der Elektrolyseure an den Tankstellen, insbesondere bei Bestandstankstellen.

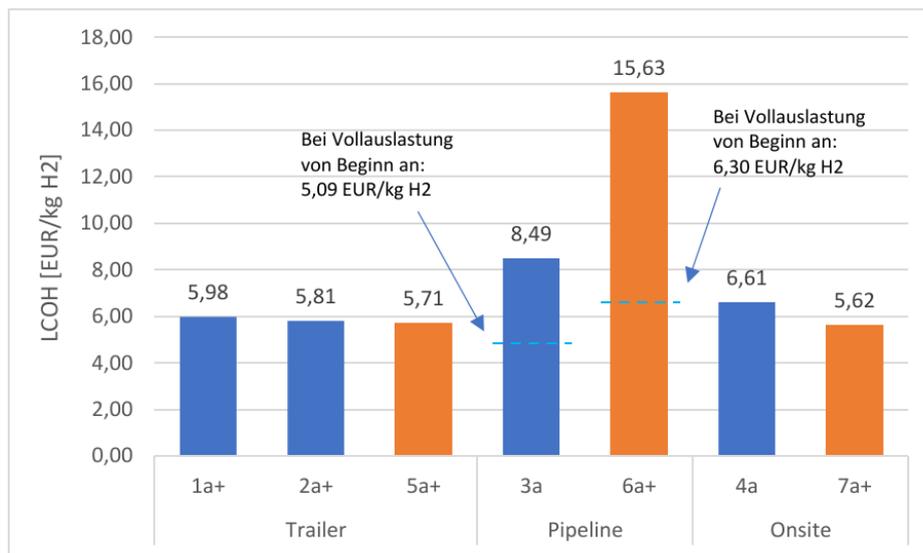


Abbildung 45: Vergleich der Bereitstellungskosten Grundmodell und Vision 2040

4.2.3.7. Kostenvor-/nachteile unterschiedlicher Systemkomponenten

Die Kostenvor-/nachteile der unterschiedlichen im Optimierungsmodell betrachtenden Systemkomponenten werden im Folgenden qualitativ aufgezeigt. Wie in der Tabelle 29 dargestellt, sind die Systemkomponenten mit charakteristischen Vor- und Nachteilen verbunden, welche ebenfalls Einfluss auf andere vor- oder nachgelagerte Systemkomponenten haben und daher nicht isoliert betrachtet werden können. Daher wurden im Rahmen der Gesamtsystemmodellierung die Kostenvor- und -nachteile der Systemkomponenten im Rahmen der Szenarioanalyse betrachtet.

Tabelle 29: Qualitative Übersicht der Kostenvor-/nachteile

		Vorteile	Nachteile
Elektrolyse	Onsite	<ul style="list-style-type: none"> Vermeidung von Transportkosten (Betriebs- und Investitionskosten) 	<ul style="list-style-type: none"> Anlagengröße: Anstieg der spez. Investitionskosten (Skaleneffekt) Strombezug: höhere Kosten für Strombezug aus dem Netz
	Offsite	<ul style="list-style-type: none"> Anlagengröße: Reduktion der spez. Investitionskosten (Skaleneffekt) Strombezug: Vermeidung von Umlagen und Entgelten durch Eigenstromnutzung MHKW 	<ul style="list-style-type: none"> Verfügbare Anlagenfläche: Begrenzung der max. Anlagenleistung führt zu ggf. nicht optimaler Anlagengröße / Produktionsleistung und spez. Kosten

		<ul style="list-style-type: none"> Verfügbare Infrastruktur: Nutzung verfügbarer Infrastrukturen (Verringerung Baukosten) 	
H ₂ Transport	Tube-Trailer	<ul style="list-style-type: none"> Niedrigere Investitionskosten Niedrigeres Druckniveau: Verringerung der Verdichtungskosten bei Trailerabfüllung (Betriebs- und Investitionskosten) 	<ul style="list-style-type: none"> Niedrige Transportkapazität: Erhöhung der Betriebskosten Niedrigeres Druckniveau: Erhöhung der Verdichtungskosten an der Tankstelle (Betriebs- und Investitionskosten)
	MEGC-Trailer	<ul style="list-style-type: none"> Höhere Transportkapazität: Reduktion der Betriebskosten Höheres Druckniveau: Reduktion der Verdichtungskosten an der Tankstelle (Betriebs- und Investitionskosten) 	<ul style="list-style-type: none"> Höhere Investitionskosten Höheres Druckniveau: Erhöhung der Verdichtungskosten bei Trailerabfüllung (Betriebs- und Investitionskosten)
	Pipeline	<ul style="list-style-type: none"> Günstige spez. Transportkosten (bei Volllast) Niedriges Druckniveau: Reduktion bzw. Vermeidung der Verdichtungskosten am Produktionsort (Betriebs- und Investitionskosten) 	<ul style="list-style-type: none"> Hohe Anfangsinvestitionen Niedriges Druckniveau: Erhöhung der Verdichtungskosten an der Tankstelle (Betriebs- und Investitionskosten)

4.2.4. Betreibermodelle

Im Rahmen der finanziellen Betrachtung des Projektes wurden folgende drei Betreibermodelle berücksichtigt:

- **Basisfall:** **Konsortium**
- **Sensitivität 1:** **Konsortium + Energieversorger (Mainova)**
- **Sensitivität 2:** **Konsortium + strategischer Partner**

Die folgenden Schaubilder visualisieren die drei berücksichtigten Betreibermodelle:

Basisfall

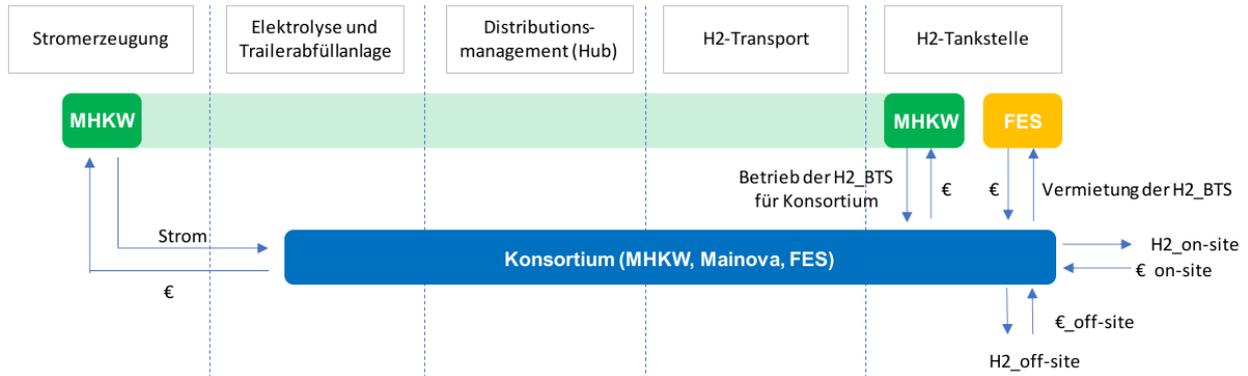


Abbildung 46: Betreibermodell Basisfall

Der Basisfall zeichnet sich dadurch aus, dass das Konsortium (bestehend aus der MHKW-Betreiber-Gesellschaft, Mainova sowie der FES) alle betrachteten Infrastrukturen besitzt und betreibt (inkl. Betrieb der Trailer und der Sattelzugmaschinen) bis auf die Stromerzeugung. Letztere verbleibt beim MHKW. Die FES ist Eigentümerin der MHKW-Wasserstoff-Betriebstankstelle (H2_BTS, „on-site“), das MHKW betreibt diese im Namen und auf Rechnung des Konsortiums. Die externe Tankstelle („off-site“) gehört dem Konsortium und wird von diesem betrieben. Entsprechend ergeben sich folgende Zahlungsflüsse:

- zwischen Konsortium und MHKW für die Belieferung mit Strom
- zwischen Konsortium und FES für die Vermietung der H2_BTS
- zwischen Konsortium und MHKW für den Betrieb der H2_BTS
- zwischen Endkunden und Konsortium für den Verkauf des Wasserstoffs an der H2_BTS (on-site) und an der externen Tankstelle (off-site)

Sensitivität 1: Konsortium + Energieversorger

Als Variante kommt in der Sensitivität 1 dem Energieversorger (Mainova) eine größere Rolle zu. Hier besitzt und betreibt das Konsortium nur die Elektrolyse- und die Trailerabfüllanlage. Die Mainova besitzt und betreibt den Distributionsstützpunkt (Hub), das Distributionsmanagement, die Trailer, die Sattelzugmaschinen sowie die externe Tankstelle. Die FES ist Eigentümerin der MHKW-Wasserstoff-Betriebstankstelle (H2_BTS), das MHKW betreibt diese im Namen und auf Rechnung der Mainova.

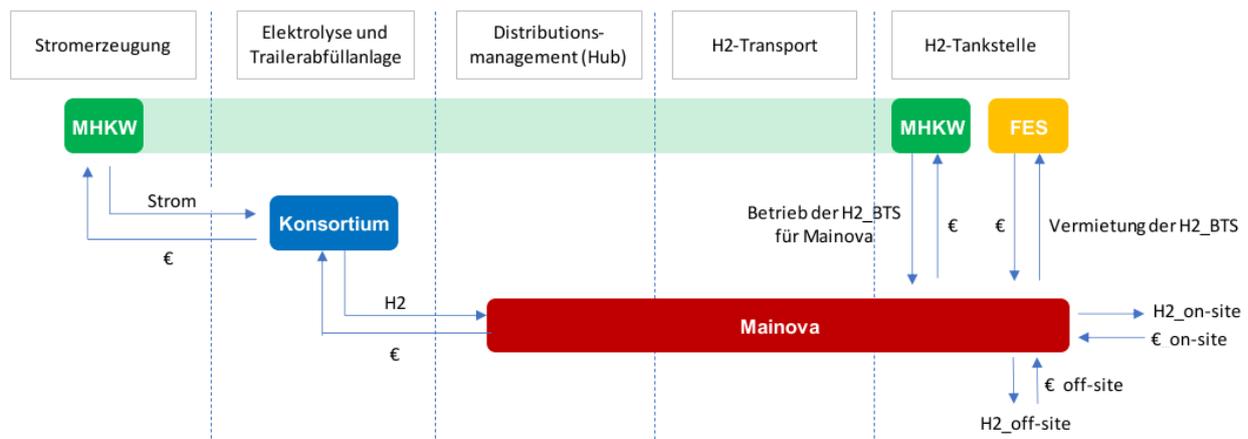


Abbildung 47: Betreibermodell Sensitivität 1

Entsprechend ergeben sich hier die folgenden Zahlungsflüsse:

- zwischen Konsortium und MHKW für die Belieferung mit Strom
- zwischen Mainova und dem Konsortium für die Bereitstellung des Wasserstoffs am MHKW
- zwischen Mainova und FES für die Vermietung der H2_BTS
- zwischen Mainova und MHKW für den Betrieb der H2_BTS
- zwischen Endkunden und Mainova für den Verkauf des Wasserstoffs an der H2_BTS (on-site) und an der externen Tankstelle (off-site)

Sensitivität 2: Konsortium + strategischer Partner

Die Struktur des Betreibermodells in der Sensitivität 2 ist identisch mit der in der Sensitivität 1, nur dass hier der zentrale Akteur nicht die Mainova, sondern ein strategischer Partner ist. Der wesentliche Unterschied liegt in der erwarteten Eigenkapitalrendite: Während die Ziel-EK-Rendite der Mainova als öffentliches Unternehmen mit 6,5% angenommen wird, wird die des strategischen Partners mit 12% angenommen, was zu höheren Margen und entsprechend höheren Endabnehmerpreisen führen wird.

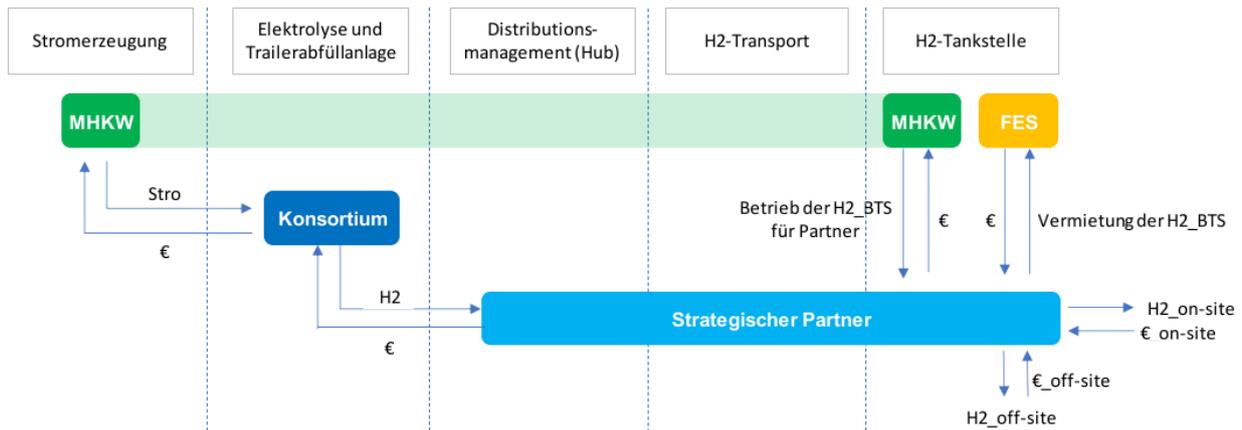


Abbildung 48: Betreibermodell Sensitivität 2

4.2.5. Kostenermittlung

Im Rahmen der Gesamtsystemmodellierung wurde das Szenario 2a+ als das wirtschaftlichste Szenario im optimistischen Nachfrageszenario ermittelt. Das Szenario 2a+ wurde daher als Basisszenario für die technische Auslegung in (siehe Abschnitt 4.3) sowie für die Wirtschaftlichkeitsrechnung (siehe Abschnitt 4.2.6) ausgewählt.

Für das ausgewählte Szenario werden im Folgenden die Gesamtinfrastrukturkosten dargestellt. Im Gegensatz zu den im Rahmen des Optimierungsmodells betrachteten Kosten, wurden für das ausgewählte Szenario zusätzliche Kosten ermittelt, die im Rahmen der technischen Anlagenauslegung in Abschnitt 4.3 ermittelt wurden. Die in Abschnitt 4.2.3 ermittelten Kosten umfassen zusätzlich zu den im Optimierungsmodell betrachteten Hauptanlagen ebenfalls Nebenanlagen sowie Kosten für Anlagenbau, -installation und -planung. Somit wurde die Genauigkeit der Kostenermittlung erhöht. Hierzu wurden die mit dem Optimierungsmodell ermittelten Anlagenkapazitäten überprüft, mit herstellertypischen Leistungsgrößen abgeglichen und die Auslegung der Nebenanlagen bestimmt.

Die Kostenermittlung für die Anlagentechnik basiert auf Kostendatenbanken sowie aktuellen Preisinformationen von Anlagenherstellern. Zur Bestimmung der Baukosten wurden die erforderlichen Kostengruppen gemäß DIN 276 auf Basis der Aufstellungsplanung mithilfe von Einheitskosten ermittelt. Anlagennebenkosten (Lieferung, Installation, Planung, Inbetriebnahme, Ersatzteile) wurden auf Basis industrietypischer Kostenfaktoren berücksichtigt.

Zum derzeitigen Planungsstand des Projekts wurde eine Kostengenauigkeit von +/- 40 % angegeben. Die Kostermittlung ist in nachfolgenden Planungsphasen weiter zu detaillieren.

Die Übersicht der erwarteten Investitionskosten je Standort ist in folgender Tabelle dargestellt.

Eine erweiterte Übersicht nach Kostenkategorien befindet sich im Anhang.

[Tabelle Kostenstruktur Szenario 2a+](#)

Tabelle 30: Übersicht Investitionskosten Szenario 2a+

Standort / Anlage	Kosten
MHKW – Elektrolyse & Trailerabfüllung	17.706.000 €
MHKW – Betriebs-Wasserstofftankstelle	3.224.000 €
Externe Wasserstofftankstelle	4.386.000 €
Distributionsstützpunkt	4.465.000 €

4.2.6. Wirtschaftlichkeitsberechnung

4.2.6.1. Anmerkungen zur Wirtschaftlichkeitsberechnung

Zum Zeitpunkt der Berichterstellung lagen keine verbindlichen Zusagen (Absichtserklärungen o.ä.) der Wasserstoffanwender vor, zukünftig Wasserstoff aus dem Projekt MH2Regio abzunehmen. Dies ist einerseits darin begründet, dass zum Projektende in vielen Anwendungsbereichen (z.B. Logistik, Fernverkehr) kein ausreichendes Angebot an Brennstoffzellen-Fahrzeugen vorliegt, andererseits in anderen Anwendungsbereichen wie dem ÖPNV der Wettbewerbsdruck beim Umstieg auf Wasserstoffantriebe zum derzeitigen Zeitpunkt noch zu hoch wäre.

Die theoretischen Nachfragemengen der Wasserstoffanwender, welche im Rahmen der Partnergespräche und Fragenkataloge sowie der Quellen-Senken-Analyse ermittelt wurden, sind hingegen in den Nachfragezeitreihen berücksichtigt und gehen als Eingabeparameter der Gesamtsystemmodellierung explizit ein.

Die Nachfragezeitreihen bilden somit die theoretische Grundlage für die Wirtschaftlichkeitsrechnung, stellen jedoch keine Zusagen der Wasserstoffanwender dar.

4.2.6.2. Gesamt- und Teilwirtschaftlichkeitsberechnung entsprechend den Wertschöpfungsstufen

Für die Gesamt- und Teilwirtschaftlichkeitsberechnung wurde ein Finanzmodell erstellt, das die finanziellen Auswirkungen des Projektes für jeden einzelnen Akteur berücksichtigt. Hierbei ist der Verkaufspreis des einen Akteurs gleich dem Einkaufspreis eines anderen Akteurs.

Bei der Berechnung der Transferpreise wurde darauf geachtet, dass jeder einzelne Akteur seine erwartete Ziel-EK-Rendite erreichen kann. Diese wird für alle Akteure mit öffentlicher Beteiligung (MHKW, FES, Mainova) mit 6,5% angenommen, die des strategischen Partners mit 12%.

Es wurde eine reine Eigenkapitalfinanzierung ohne Fremdkapitalmittel berücksichtigt (WACC 6,5%). Da die Finanzierung jedoch einen wesentlichen Einfluss auf die Wasserstoffgestehungskosten hat, wird zusätzlich noch der Fall gezeigt für eine 70% Fremdkapitalfinanzierung (Laufzeit 20 Jahre, keine tilgungsfreie Anlaufzeit, FK-Zins 1,5%, WACC 2,8%).

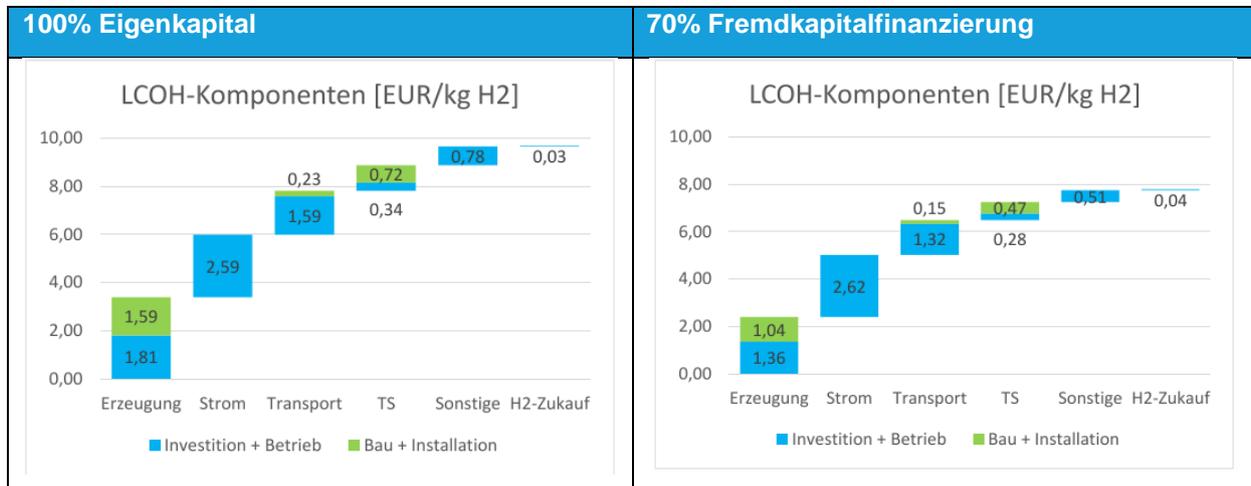
In der folgenden Graphik sind die Wasserstoffbereitstellungskosten des Gesamtsystems (Szenario 2a+) dargestellt, aufgliedert nach Wertschöpfungsstufe sowie nach Kosten für

- (i) Investition und Betrieb (CAPEX und OPEX für alle Anlagen außer Bau und Installation)
- (ii) Bau und Installation (sämtliche Baukosten an allen Standorten [MHKW, MHKW Betriebs-tankstelle, externe Tankstelle sowie Distributionsstützpunkt] sowie die Kosten für die Installation und Planung an allen Standorten).

Diese Unterteilung wurde gewählt, um den großen Einfluss der Bau und Installationskosten auf den LCOH zu visualisieren. Insgesamt betragen im Fall der **100% EK-Finanzierung die Wasserstoffbereitstellungskosten 9,68 EUR/kg H₂**. Der größte Anteil hiervon entfällt auf die Erzeugung (35%), gefolgt von den Stromkosten für die Elektrolyse (27%). Auf den Wasserstoff-Transport entfallen 19%. Insgesamt machen die Kosten für den Bau und Installation einen Anteil von 26% aus. Bezogen nur auf die Erzeugung betragen diese 47%.

Für den Fall einer **70% Fremdkapitalfinanzierung betragen die Wasserstoffbereitstellungskosten lediglich 7,79 EUR/kg H₂**.

Tabelle 31: Zusammensetzung des LCOH in der Gesamtsystemlösung



4.2.7. Förderbedarfsermittlung

Für die Förderbedarfsermittlung wurden folgende Key Performance Indicators (KPI) definiert:

Tabelle 32: Definition der KPI Zielwerte

	Einheit	Zielwert
Interner Wasserstoffverkaufspreis	EUR/kg H ₂	5,50
Externer Wasserstoffverkaufspreis	EUR/kg H ₂	5,50
Eigenkapitalrendite	%	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 6,5% für Akteure mit öffentlicher Beteiligung ▪ 12% für den strategischen Partner

Der Zielwert für den Wasserstoffverkaufspreis (interner Preis = MHKW Betriebstankstelle, externer Preis = externe Wasserstofftankstelle) wurden auf Basis der in den Partnergesprächen ermittelten Preisspanne (5-6 EUR/kg) definiert. Als Zielwert wurde der Mittelwert i.H.v. 5,50 EUR/kg ausgewählt. Der Zielwert für die Eigenkapitalrendite (EK-Rendite) wurde in Absprache mit der Mainova AG festgelegt.

Als weiteren KPI kann der Wasserstoffpreis bei H2-MOBILITY angesehen werden. Dieser liegt bei 9,50 EUR/kg H₂.

4.2.7.1. GAP Analyse zum KPI Erfüllungsgrad

Für den Basisfall sowie die Sensitivität 1 ergeben sich folgende Werte zur Erfüllung der festgelegten KPIs:

Tabelle 33: Differenzen zu KPI Zielwerten

KPI	KPI-Zielwert	Berechneter Wert	Erfüllungsgrad	Differenz
Interner Wasserstoffverkaufspreis	5,50 EUR/kg H ₂	7,18 EUR/kg H ₂	69,5%	1,68 EUR/kg H ₂ (30,5%)
Externer Wasserstoffverkaufspreis	5,50 EUR/kg H ₂	8,89 EUR/kg H ₂	39,4%	3,39 EUR/kg H ₂ (30,5%)
EK-Rendite	6,5%	6,5%	100%	

Die Differenz im H₂-Preis an der MHKW-Betriebstankstelle und der externen Tankstelle liegt an der unterschiedlich starken Nutzung des Distributionsmanagements. Während die externe Tankstelle komplett von der Versorgung mit H₂ von der Belieferung mit Trailern abhängt, benötigt die MHKW-Betriebstankstelle diese im Normalbetrieb nicht. Nur im Falle einer Revision des MHKWs oder anderer Störfälle, die eine direkte Belieferung vom Elektrolyseur (inkl. Speicherung) nicht möglich machen, wird auch die MHKW-Betriebstankstelle über die vollen Trailer (strategische Reserve) beliefert.

Folglich wurden die Kosten für die Distribution entsprechend den Nachfragen von MHKW-Betriebstankstelle und externer Tankstelle aufgeteilt.

Damit ist der interne Wasserstoffverkaufspreis an der MHKW-Betriebstankstelle mit 7,18 EUR/kg H₂ um 30,5% höher als der Zielpreis von 5,50 EUR/kg H₂. An der externen Tankstelle liegt der Verkaufspreis bei 8,89 EUR/kg H₂ und ist folglich um 60,6% höher als der Zielpreis von 5,50 EUR/kg H₂.

Im Vergleich zum H₂-MOBILITY-Preis von 9,50 EUR/kg H₂, sind die Verkaufspreise sowohl an der MHKW-Tankstelle (-2,32 EUR/kg H₂) als auch an der externen Tankstelle (-0,61 EUR/kg H₂) niedriger. Insofern ist der Erfüllungsgrad hier jeweils größer als 100% und beträgt 124,4% bzw. 106,4%.

Da das Ziel von 5,50 EUR/kg H₂ Verkaufspreis an der externen Tankstelle das restriktivste darstellt, wird dieses im Rahmen der Fördermittelbedarfsberechnung als relevantes Ziel betrachtet.

4.2.7.2. Mittel zur Schließung/Reduzierung von Finanzierungslücken

Im Folgenden werden verschiedene Möglichkeiten zur Reduzierung der Wasserstoffverkaufspreise und ihre Wirkungsweise aufgezeigt und deren finanzieller Nutzen quantifiziert:

- Durch die direkte **Subvention von Investitionskosten** in die Elektrolyseanlage und/oder Tankstelleninfrastruktur könnte der Gesamtinvestitions- und damit Finanzierungsbedarf gesenkt werden. Dadurch müssten durch den Wasserstoffverkauf weniger Einnahmen erzielt werden, um die geforderte EK-Rendite zu erreichen. In der Folge würde hierfür ein geringerer Verkaufspreis ausreichen.
- Durch eine **Befreiung** der Wasserstoffproduktion und/oder des -verkaufs **von der Gewerbesteuer** würden geringere Verkaufserlöse und ein geringerer Verkaufspreis ausreichen, um die avisierte EK-Rendite zu erzielen.

- Durch das **Einbringen von Fremdkapital** in die Finanzierung könnte der EK-Bedarf verringert und die EK-Rendite entsprechend gehebelt werden, da der FK-Zins unter der erwarteten EK-Rendite liegt. Dies wäre vor allem interessant für den Fall des strategischen Partners. Dadurch müsste insgesamt weniger Marge erwirtschaftet werden, wofür in Folge ein geringerer Verkaufspreis ausreichen würde.
- Im Falle einer **Teilfinanzierung durch FK** könnten vergünstigte Finanzierungsbedingungen dazu führen, dass weniger FK-Zinsen gezahlt werden müssen, die entsprechenden Verkaufserlöse und damit der Verkaufspreis geringer sein dürften. Gegeben dem gegenwärtigen Zinsniveau ist hier allerdings nur von einem geringen Effekt auszugehen.
- Elektrolyseure sind nach EEG 2021 ab 01.01.2022 bei weniger als 5.000 h Betrieb von der EEG-Umlage befreit. Dies ist allerdings nur relevant im Falle einer Onsite-Elektrolyse, die auf den Bezug von Netzstrom angewiesen ist. Hier führt die EEG-Umlagebefreiung zu einem geringeren Stromeinkaufspreis und damit zu geringeren Betriebskosten. In den Onsite-Szenarien ist dies dementsprechend schon berücksichtigt. Für den Fall der Elektrolyse am MHKW hat die EEG-Umlagebefreiung keinen Einfluss, da es sich um die Stromeigennutzung handelt, auf die ohnehin keine EEG-Umlage erhoben wird.
- Elektrolyseure sind nach § 118 Abs. 6 S. 7 EnWG für 20 Jahre von den Entgelten für die Nutzung des Stromnetzes befreit. Auch dies ist nur relevant für die Onsite-Produktion, die auf den Bezug von Netzstrom angewiesen ist. In den Onsite-Szenarien ist dies dementsprechend schon berücksichtigt. Für den Fall der Elektrolyse am MHKW hat die Netzentgeltbefreiung ebenfalls keinen Einfluss.

4.2.7.3. Berechnung des Fördermittelbedarfs

Um das Ziel zu erreichen, an der externen Tankstelle einen H₂-Verkaufspreis im Jahr 2025 in Höhe von 5,50 EUR/kg H₂ zu erreichen, wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Basierend auf den Ergebnissen der Sensitivitätsanalyse hatte sich gezeigt, dass eine alleinige Subvention der Investitionskosten von Elektrolyseur oder Tankstellen- und Belieferungsinfrastruktur nicht ausreichend ist, um das formulierte Ziel zu erreichen. Daher wurde von einer Subvention auf die gesamte Investitionssumme ausgegangen und deren Höhe gesucht, mit der das Ziel erreicht werden kann.

Die folgende Tabelle stellt die Ergebnisse der Fördermittelbedarfsermittlung für die 100% EK-Finanzierung für Basisfall und die beiden Sensitivitäten dar.

Dementsprechend wird im Basisfall als auch in der Sensitivität 1 eine Förderquote von 70% benötigt, um den Zielpreis von 5,50 EUR/kg H₂ an der externen Tankstelle zu erreichen. Es würden 20.845 TEUR an Investitionskostenförderung benötigt. Die verbleibende Investitionssumme würde 8.934 TEUR betragen.

Mit einem strategischen Partner (Sensitivität 2) wären sogar 78% nötig, um den Zielpreis von 5,50 EUR/kg H₂ zu erreichen. Die Förderung läge hier bei 23.228 TEUR, die verbleibende Investitionssumme bei 6.551 TEUR.

Tabelle 34: benötigte Investitionsförderquoten für Ziel-Verkaufspreise

Zielwert externer H ₂ Verkaufspreis	4,50 EUR/kg	5,00 EUR/kg	5,50 EUR/kg	6,00 EUR/kg	6,50 EUR/kg	7,00 EUR/kg	7,50 EUR/kg
Basisfall + Sensitivität 1 [TEUR]							
Gesamtkosten	29.779	29.779	29.779	29.779	29.779	29.779	29.779
Förderquote	91%	80%	70%	59%	49%	39%	28%
Subventionen	27.099.	23.823	20.845	17.570	14.592	11.614	8.338
Verbleibende Investitionen	2.680	5.956	8.934	12.209	15.187	18.165	21.441
Sensitivität 2 [TEUR]							
Gesamtkosten	29.779	29.779	29.779	29.779	29.779	29.779	29.779
Förderquote	95%	86%	78%	70%	62%	53%	45%
Subventionen	28.290	25.610	23.228	20.845	18.463	15.783	13.401
Verbleibende Investitionen	1.489	4.169	6.551	8.934	11.316	13.996	16.378

4.2.7.4. Beschreibung neuer Instrumente zur Marktablierung

Neue Instrumente zur Unterstützung der Marktablierung von grünem Wasserstoff im Mobilitätssektor erfordern, neben der bereits vorhandenen Investitionskostenförderung und Umlagebefreiung, eine Steigerung des Anreizes für potenzielle Anwender zum Umstieg auf BZ-Fahrzeuge im Vergleich zu Konkurrenztechnologien durch zusätzliche steuerliche Vergünstigungen und weitere Maßnahmen zur Senkung des Wasserstoffverkaufspreises.

Im Folgenden werden mögliche Instrumente aufgelistet:

- Direkte Subventionierung der H₂-Verkaufspreise während Markthochlaufphase zur Risikominde-
rung (z.B. über staatlich-subventionierte Contracts for Difference / Differenzverträge)
- Quotenregelung zur Einführung von Fahrzeugflotten auf Basis von BZ-Antrieben
- Steuerliche Ermäßigung auf die KfZ-Steuer für BZ-Fahrzeuge
- Ausgleich von Wettbewerbsnachteilen und Förderung von Green Logistik
- Verkürzte Abschreibungsdauern für BZ-Fahrzeuge
- Etablierung von Ausschreibungsverfahren zum Bau von großtechnischen Elektrolyseanlagen
- Unterstützung von H₂-betriebenen KWK Anlagen durch feste Einspeiseprämie bei Verwendung
von H₂ anstelle von Erdgas zur Erhöhung des Marktvolumens von Wasserstoff und Erhöhung
des Wettbewerbs⁶

⁶ Agora Energiewende (2021), Making renewable hydrogen cost competitive – policy instruments for support green H₂

4.3. Wasserstoffsystemelemente

Ein Wasserstoffversorgungssystem für den Verkehrsbereich (Schwerlast- und Güterverkehr) besteht im Wesentlichen aus den Wertschöpfungsstufen Wasserstofferzeugung, -verteilung und -abgabe. Jedem dieser Wertschöpfungsstufen sind Systemelemente zur Wertgenerierung untergeordnet. Jede Wertschöpfungsstufe kann in sich aber auch im Einklang mit den Vor- und Nachgelagerten Wertschöpfungsstufen optimiert werden. Einzelne Systemelemente können daher für sich betrachtet technisch-wirtschaftlich optimiert werden, aber durchaus einen Einfluss auf die benachbarten Wertschöpfungen ausüben.

Im Rahmen der Konzeptstudie wurde daher ein zweistufiges Vorgehen gewählt. Im ersten Schritt wurden die Systemelemente der einzelnen Wertschöpfungsstufen in ihren Hauptkomponenten vorausgelegt und nach dem Stand der Technik und den Vorgaben der Grundlagenermittlung dimensioniert. Im zweiten Schritt wurde das Gesamtsystem entsprechend den definierten Szenarien softwaregestützt modelliert und technisch-wirtschaftlich optimiert (siehe Kapitel 4.2).

Die Ergebnisse der Optimierung wurden wiederum in die Auslegung der Systemelemente zurückgeführt. Somit wurden zum einen ein hoher Grad an Standardisierung und Anlagenrobustheit generiert, zum anderen wurden die Einzelelemente im Zusammenspiel technoökonomisch optimiert.

Die Ergebnisse zu den einzelnen Wasserstoffsystemelementen (Elektrolyse, Verdichtung, Abfüllung, Transport, Tankstelle) sind im Einklang mit der Systemmodellierung entstanden und wurden iterativ erarbeitet. Die nachfolgend dargestellten Ergebnisse enthalten bereits die Einflüsse aus der Softwaremodellierung. Auf eine Darstellung des Erarbeitungsprozesses wurde zugunsten der besseren Lese- und Nachvollziehbarkeit verzichtet.

4.3.1. Entwicklung standardisierter Wasserstofftankstelle

Die Entwicklung einer standardisierten Wasserstofftankstelle ist ein zentrales Element zur Kostensenkung in einem hochlaufenden Wasserstoffmarkt. Anwender können sich auf die immer gleiche Betankungsumgebung verlassen und brauchen sich nicht auf abweichende Handgriffe in der Nutzung oder abweichende Funktionalitäten einstellen. Dies fördert die Akzeptanz und erhöht die Chance auf eine Marktdurchdringung.

4.3.1.1. Anlagenkomponenten

Die folgende Abbildung zeigt das Prozessfließdiagramm der standardisierten Wasserstofftankstelle.

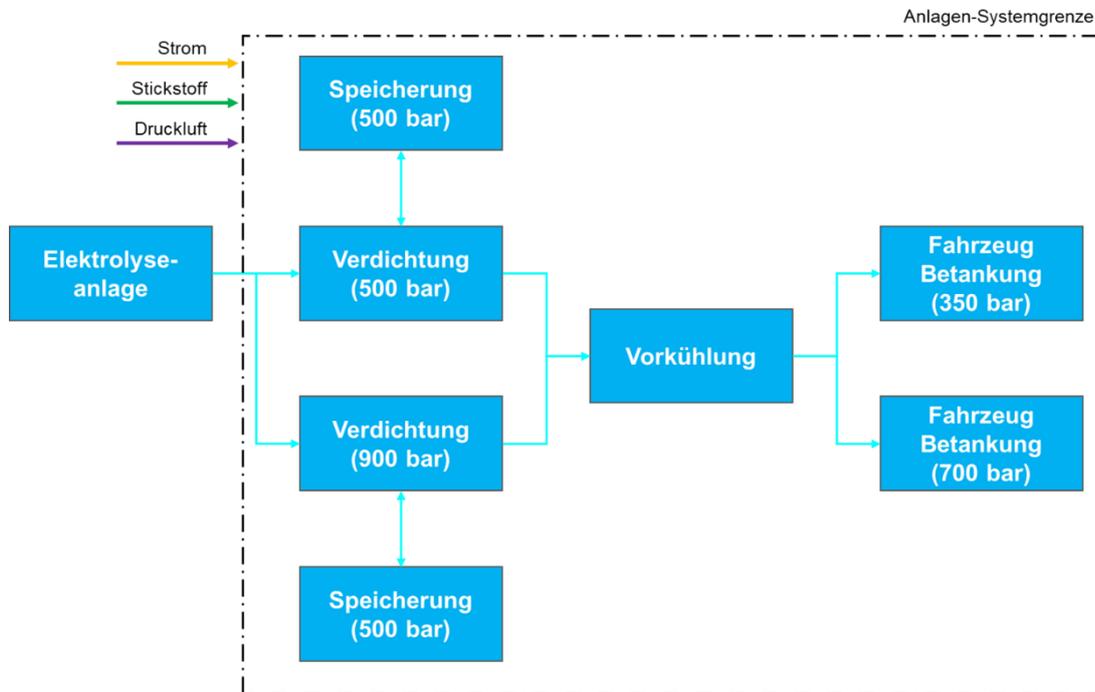


Abbildung 49: Prozessfließdiagramm der standardisierten Wasserstofftankstelle

Die standardisierte Wasserstofftankstelle soll zur Betankung von Kraftfahrzeugen (schwere Nutzfahrzeuge, Busse) mit Brennstoffzellenantrieb und einem Speicherdruck von 350 bar(e) geeignet sein.

Die Wasserstofftankstelle umfasst die folgenden fünf Hauptsysteme:

- Wasserstoffanlieferung (Tube-Trailer)
- Wasserstoffverdichtung
- Wasserstoffspeicherung
- Wasserstoffabgabe (Dispenser)
- Nebenanlagen

Für eine zukünftige Erweiterbarkeit der Wasserstofftankstelle auf Fahrzeuge mit einem Speicherdruck von 700 bar(e) ist ein Anschlusspunkt an der Sammelleitung der Trailer Entladebuchten vorgesehen.

Hinweis

Das Konzept sieht keine zusätzliche Gasaufbereitung an der Tankstelle vor. Der angelieferte Wasserstoff muss den Qualitätsanforderungen (gemäß DIN EN 17124) der zu betankenden Fahrzeugen entsprechen.

Wasserstoffanlieferung

Dieses System dient der Wasserstoffanlieferung an der Tankstelle und dem Transfer (Entladen) des unter Druck angelieferten gasförmigen Wasserstoffs aus dem Rohrbündelspeicher der Trailer in den stationären Gasdruckspeicher der Tankstelle. Die Wasserstoffanlieferung umfasst folgende Komponenten:

- Zwei (2) Tube-Trailer Entladebuchten, einschließlich:
 - Flexiblen Schlauch mit Abreißkupplung

- Erdungsverbindung
- Benutzeroberflächen-Panel

Die Wasserstoffanlieferung besteht aus zwei getrennten Entladebuchten. Im regulären Betrieb wird eine Entladebucht genutzt und der Trailer mittels einer Gasdruckregelanlage mit dem Speichersystem der Tankstelle verbunden. Eine zweite Entladebucht wird als Reserve vorgesehen. Ein dauerhafter Verbleib eines Trailers an der Tankstelle ist nicht vorgesehen.

Wasserstoffverdichtung

Dieses System umfasst die Verdichtung des Wasserstoffs auf einen Enddruck von bis zu 500 bar(e) zur Befüllung des stationären Gasdruckspeichers aus dem Trailer oder zur Befüllung der Fahrzeugtanks.

Das System beinhaltet die folgenden Teilsysteme:

- Kompressor(en), einschließlich
 - Mehrere Kompressionsstufen
 - Wärmetauscher

Wasserstoffspeicherung

Dieses System beinhaltet den stationären Gasdruckspeicher an der Tankstelle zur Zwischenspeicherung des Wasserstoffs bei einem Druckniveau von 500 bar(e). Das System besteht aus folgenden Komponenten:

- Einem (1) bis drei (3) Druckgasflaschenbündel.

Wasserstoffabgabe (Dispenser)

Dieses System dient der Abgabe (Betankung) des an der Tankstelle gespeicherten Wasserstoffs in die Kraftstofftanks der zu betankenden Brennstoffzellen-Fahrzeuge. In dieser standardisierten Lösung sind zwei Dispenser vorgesehen. Dieses System umfasst die folgenden Teilsysteme:

- Vorkühler
- Druck- und Temperaturmessung, Durchflussmengenregelung
- Hochdruckbetankungsschlauch
- Abreißkupplung
- Befüllkupplung
- Erdungsverbindung
- Steuerungs- und Anzeigeeinheit mit Bedienoberfläche

Nebenanlagen

Dieses System beinhaltet die Nebenanlagen, die für einen ordnungsgemäßen Betrieb der vier oben beschriebenen Systeme erforderlich sind. Dieses System umfasst die folgenden Teilsysteme:

- Stromversorgung
 - Netzanschluss (abhängig von Anschlussbedingungen)
 - Spannungstransformatoren (falls erforderlich)

- 400 V Wechselstrom-Anschluss für Verbraucher (anderes Spannungsniveau möglich)
- Rückkühlanlage
 - Geschlossener Kühlwasserkreislauf zum Kühlen des/der Kompressor(en)
 - Luftkühler
- Kälteversorgung
 - Geschlossener Kühlmittelkreislauf zum Vorkühlen von Wasserstoff vor der Fahrzeugbetankung
 - Kühleinheit (Kältemaschine)
 - Luftkühler
- Druckluftversorgung
 - Steuerluft zum Betrieb pneumatischer Ventile (Ein-/ Aus- und Regelventile)
 - Luftkompressor(en) bei ca. 8 bar(e)
 - Filter- und Trocknereinheit, um die erforderliche Qualität zu erreichen
 - Pufferspeicher
- Stickstoffversorgung
 - Zur Speisung von Kompressoren (Dichtungssystem), falls erforderlich, Spülung / Inertisierung von Wasserstoff-beaufschlagten Komponenten und Rohrleitungen
 - Zwei (2) Flaschen-Bündel (Normalbetrieb + Reserve) mit 9 Flaschen bei 200 bar(e) (Anzahl zu bestätigen)
- Trinkwasseranschluss
 - Zum Auffüllen des Kühlwasserkreislaufs, unter Zugabe von Frostschutzmittel & Korrosionsinhibitor (z.B. Ethylenglykol oder Propylenglykol)
- Brauchwasseranschluss
 - Zur Nutzung als Löschwasser
 - Zur Berieselung / Behälterkühlung großer Wasserstoffspeicher (z.B. Trailer) im Brandfall

4.3.1.2. Technische Auslegung

Eine tabellarische Zusammenfassung der Auslegungsparameter je Hauptkomponente ist im Anhang zu finden:

[*Übersicht Auslegungsparameter Hauptkomponenten*](#)

Hinweis:

Die Auslegungsparameter sind als vorläufig anzusehen und müssen in weiteren Planungsschritten (nicht Bestandteil der Konzeption) bestätigt werden.

Wasserstoffanlieferung

Die Wasserstoffanlieferung an der Tankstelle erfolgt über MEGC-Trailer in der Größenklasse von 20 Zoll Standard ISO Containern. Es werden zwei (2) Entladebuchten berücksichtigt, jeweils eine (1) für den Nor-

malbetrieb und eine (1) als Reserve, zur Gewährleistung eines kontinuierlichen Anlagenbetriebs. Die MEGC-Trailer verfügen über eine Brutto-Speicherkapazität von 502,2 kg Wasserstoff bei einem Betriebsdruck von 500 bar(e).

Ein Druckluftanschluss zur Ventilsteuerung (pneumatische Sicherheitsventile) ist erforderlich. Die MEGC-Trailer werden durch eine Schnellkupplung und flexible Hochdruckschlauch-Verbindung mit dem Speichersystem der Wasserstofftankstelle verbunden.

Zur Deckung der vorgesehenen Wasserstoff-Absatzmenge in Höhe von 1.200 kg/Tag sind bis zu drei Trailer-Lieferungen pro Tag erforderlich.

Wasserstoffverdichtung

Der Wasserstoff wird auf einem Druckniveau von 500 bar(e) in dem stationären Wasserstoffspeicher der Tankstelle zur Betankung der BZ-Fahrzeuge vorgehalten. Zur Entladung der MEGC-Trailer in den stationären Speicher sowie zur Direktbetankung der BZ-Fahrzeuge ist eine Kompressoranlage mit einem variablen Eingangsdruck von mindestens 20 bar(e) und einem Ausgangsdruck von mindestens 500 bar(e) erforderlich.

Weiterhin ist die Förderleistung des Kompressors bestimmt durch die Anforderungen an die Dauer des Entladevorgangs eines MEGC-Trailers innerhalb eines Zeitraums von maximal 3 Stunden. Dies führt zu einer Förderleistung von ca. 160 kg/h.

Für die Wasserstoffverdichtung werden ölfreie Kompressoren (z.B. trockenlaufende Membran- oder Hubkolbenkompressoren) vorgesehen, um eine Verunreinigung des Wasserstoffs mit Ölrückständen zu verhindern. Im betrachteten Einsatzfall handelt es sich um einen mehrstufigen Kompressor mit drei bis vier Verdichterstufen inklusive Zwischenkühlung.

Die Anlagenredundanz ist an die jeweiligen projektspezifischen Anforderungen an die Verfügbarkeit anzupassen. Dies ist in einer späteren Planungsphase des Projekts festzulegen. Im Rahmen der anwenderspezifischen Wasserstofftankstelle wird von einer Anlagenkonfiguration mit 1 x 100 % bezogen auf die max. Förderleistung ausgegangen, um die Aufstellungsfläche zu reduzieren. Im Aufstellungsplan wurde eine Erweiterungsfläche für einen zweiten Verdichter dargestellt.

Wasserstoffspeicher

Der operative Wasserstoffspeicher hat eine Netto-Kapazität von 238,5 kg zwischen 500 und 200 bar(e).

Für den strategischen Speicher werden 1.200 kg zwischen 500 und 200 bar(e) vorgesehen.

Wasserstoffdispenser

Folgende Teilsysteme sind für Wasserstoffabgabeeinrichtung vorzusehen:

- Hochdruckbetankungsschlauch
- Füllkupplung inkl. Rückschlagventil und Datenschnittstelle, standardisiert H35 T20
- Abreißsicherung (Abreißkupplung)
- Druck- und Temperaturmessung
- Erdungsverbindung

- Steuerungs- und Anzeigeeinheit mit Bedienoberfläche
- Mengenummessung (für Abrechnungszwecke)

Wasserstoffvorkühlung

Gemäß Betankungsprotokoll und gewählter Zielbetankungsgeschwindigkeit ist eine Vorkühlung des Wasserstoffs auf eine Temperatur von -20 °C erforderlich.

Nebenanlagen

Stickstoffversorgung

Zur Stickstoffversorgung werden zwei (2) Druckgasflaschen-Bündel mit neun (9) Stickstoffflaschen zu je 50 L bei 200 bar(e) vorgesehen. Die Lagermenge vor Ort entspricht 151 Nm³. Eine Gasreinheit von min. 99,5 mol.-% ist erforderlich.

Druckluftversorgung

Der Druckluftbedarf wird auf ca. 40 Nm³ abgeschätzt.

Stromversorgung

Die gesamte Anschlussleistung der Wasserstofftankstelle wurde auf etwa 550 kW abgeschätzt. Die ermittelte Anschlussleistung ist vergleichsweise hoch, bedingt durch das Anforderungsprofil.

Löschwasserversorgung

Gemäß der Technischen Richtlinien Betriebssicherheit (TRBS) müssen ortsfeste Druckgasanlagen über Einrichtungen zur sicheren Unterbrechung der Gaszufuhr im Brandfall verfügen. Es müssen Feuerlöscheinrichtungen vorhanden sein zur Brandbekämpfung und ggf. zur Umgebungs- und Behälterkühlung installiert sein.

Zur Behälterkühlung (MEGC-Trailer, stationäre Gasdruckspeicher) werden daher Sprühwasser-Löschanlagen (Berieselungsanlagen) vorgesehen. Als Richtwert für den Berieselungswasserbedarf wird gemäß NFPA 15 § 7.4.2.1 von einer spezifischen Berieselungsstromdichte von 10 l/min/m² ausgegangen. Zur Ermittlung der gesamten erforderlichen Berieselungsmenge ist dieser Wert mit der freien Oberfläche der Wasserstoffdruckbehälter zu multiplizieren. Weitere Richtwerte liefert die TRBS 3146.

Auf Basis dessen wird für Speicher- und Trailer-Entladebereiche (ca. 200 m²) eine Berieselungsmenge von 2.000 l/min abgeschätzt

4.3.1.3. Aufstellungsplan

Es wird davon ausgegangen, dass sich der theoretische Standort für die Tankstelle an / neben einer mehrspurigen Bundesstraße befindet und somit einen typischen Anlagenstandort widerspiegelt. Für den konkreten Anwendungsfall ist dieses Layout als Ausgangsbasis zu nutzen und je nach Platzbedingungen, Zufahrtswegen und umgebender Bebauung zu prüfen und ggf. anzupassen.

Der Zapfsäulenbereich ist überdacht. Die Luftkühler für den Kompressor befinden sich auf dem Containerdach. Die benötigte Gesamtfläche für die Tankstelle inkl. Rangierflächen beträgt ca. 3.300 m² (max. Ausdehnung 84 x 52 m).

Anmerkung:

Für die Aufstellungsplanung wurde ein konservativer Ansatz bzgl. des Platzbedarfes gewählt. Einige Komponenten könnten bspw. in einem einzigen Container zusammengefasst werden (z. B. Verdichter, Gasdruckregelanlage und Vorkühler); dies ist einer späteren Planungsphase, in Abhängigkeit von den gewählten Lieferanten, zu detaillieren und zu bestätigen. Es wird darauf hingewiesen, dass die Notwendigkeit von Brandschutzwänden, z.B. zwischen Anlagenkomponenten zum Schutz des Wasserstoffspeichers, während der Gefährdungsbeurteilung in der Entwurfs- und Ausführungsplanung neu zu bewerten sind, wenn die Dynamik und Dauer von Brandereignissen sowie die Brandschutzklassen der Komponenten genauer spezifiziert wurde.

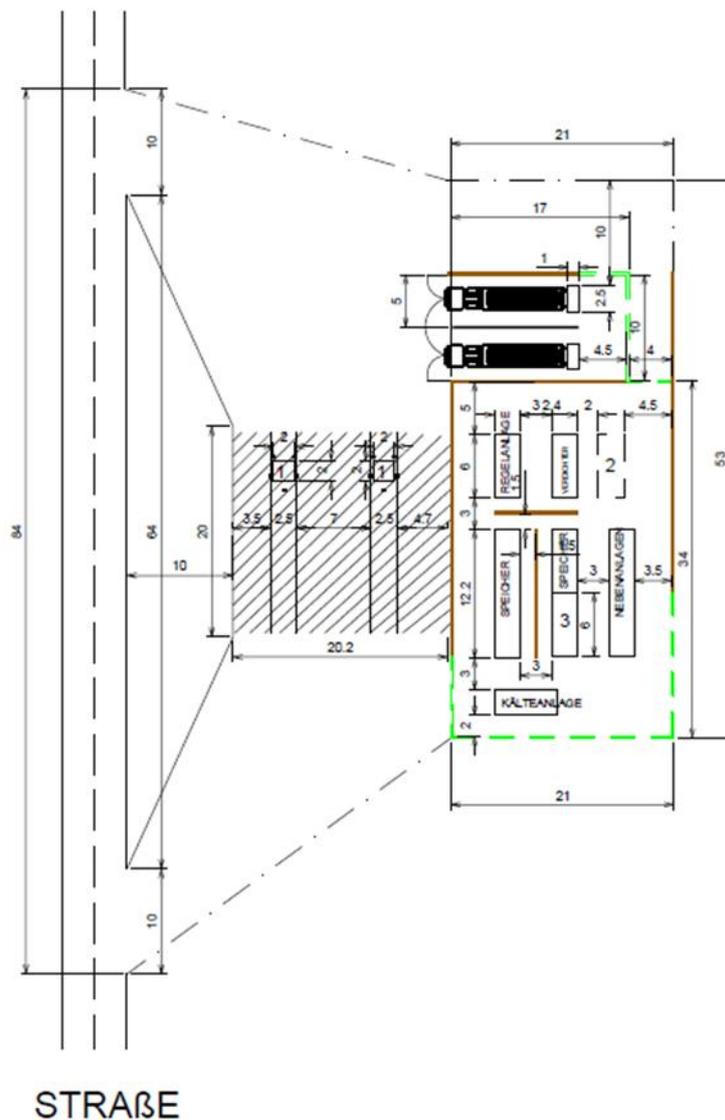


Abbildung 50: Aufstellungsplan Standard Tankstelle

4.3.1.4. Betriebsweise

Der Betrieb der Wasserstofftankstelle erfolgt im Normalbetrieb autonom und automatisiert, ohne permanentes Betriebspersonal vor Ort. Ausnahmen bilden die An- und Abkupplungsvorgänge der MEGC-Trailer an das Tankstellenspeichersystem, welche durch eine unterwiesene Person (z.B. den LKW-Fahrer) durchgeführt werden, sowie Betankungsvorgänge der Brennstoffzellen-Fahrzeuge, welche durch den Fahrer des Fahrzeugs durchgeführt werden.

Gemäß dem Betankungsprotokoll (entsprechend DIN EN 17127 und SAE-2601), wurde eine Betankungsgeschwindigkeit der Fahrzeuge von 3,6 kg/min je Zapfsäule berücksichtigt. Die Fahrzeugtanks vom Typ III oder IV werden mit einem nominalen Betriebsdruck von 350 bar(e) bei 15°C betrieben. Die maximale

Wasserstoffmenge je Tankvorgang wird mit 35 kg angenommen. Dies entspricht einer vollständigen Tankfüllung, als Referenz wird hier von einem 12 m Solobus als typischem Fahrzeugtyp ausgegangen.

Die maximale tägliche Wasserstoff-Absatzmenge der Tankstelle beträgt 1.200 kg. Das stündliche Betankungsprofil für eine Referenzwoche ist wie folgt definiert:

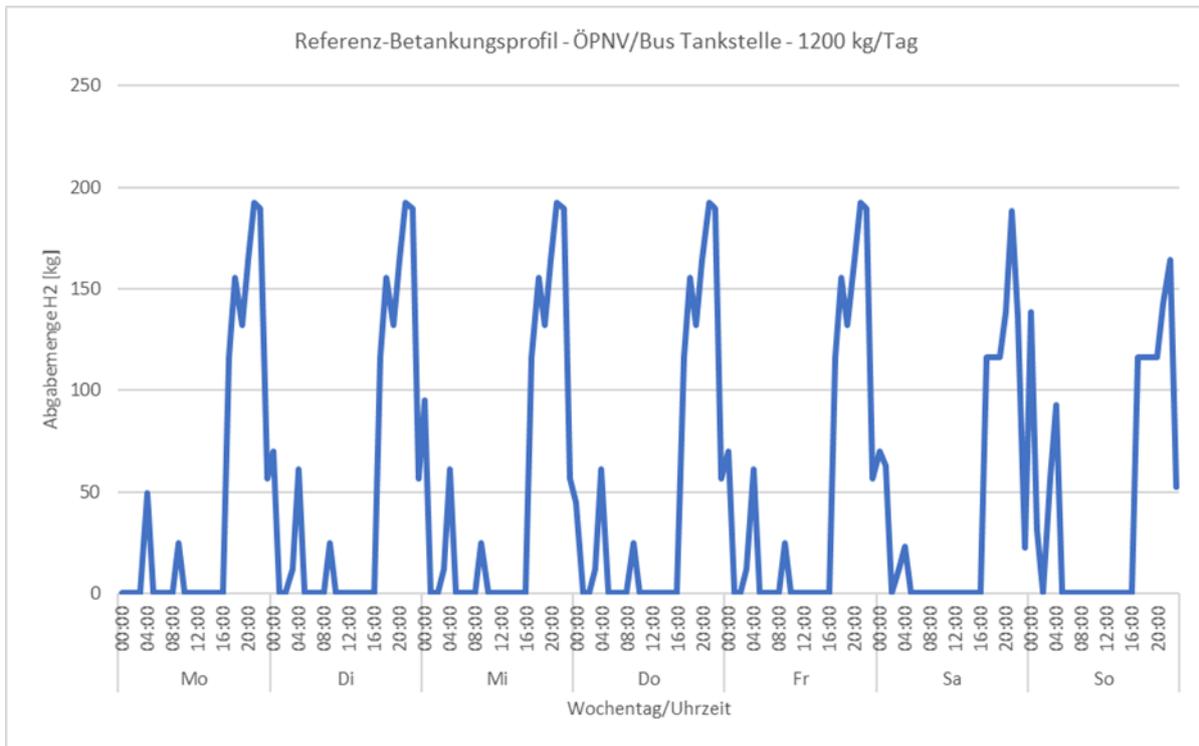


Abbildung 51: Betankungsprofil einer Referenzwoche

4.3.2. Entwicklung anwenderspezifischer Tankstellen

Die Anforderungen an die standardisierte Wasserstofftankstelle sind ausreichend für Anwender aus dem Bereich ÖPNV (Solo- und Gelenkbusse) und in weiten Teilen auch für Anwender in der Logistik einsetzbar. Für Anwender aus den Bereichen der Binnenschifffahrt oder spezifischen Logistikanforderungen (Bsp. Betriebstankstellen) sind Anpassungen der Tankstellenkomponenten notwendig und können mit vergleichsweise wenig Aufwand vom Standarddesign abgeleitet werden.

4.3.2.1. Anwendertankstelle Logistik (MHKW)

Um die Ableitung der standardisierten Wasserstofftankstelle und Anwendung auf anwenderspezifische Anforderungen zu demonstrieren, wurde als repräsentatives Anwenderbeispiel an dieser Stelle die Betriebstankstelle am MHKW ausgewählt.

Anforderungen

Die funktionalen Anforderungen sind angelehnt an die standardisierte Wasserstofftankstelle, jedoch mit leichten Abweichungen. Als Referenzjahr für die Tankstellenauslegung wurde das Jahr 2030 ausgewählt. Die Nachfrageprofile entsprachen dem Szenario 2a+ (optimistische Nachfrageentwicklung, geglättete

Nachfragenspitzen). Als Mindestanforderungen für die technische Auslegung der Tankstelle wurden die Ergebnisse der Gesamtsystemmodellierung für das Jahr 2030 zugrunde gelegt.

Die Wasserstofftankstelle soll zur Betankung von Kraftfahrzeugen mit Brennstoffzellenantrieb und einem Speicherdruck von 350 bar(e) (ÖPNV-Busse) sowie Abfallsammelfahrzeugen und leichten LKW mit einem Speicherdruck von 700 bar(e) geeignet sein. Für die Betankung von 350 bar und 700 bar Fahrzeugen werden zwei verschiedene Verdichteranlagen bei einem Druckniveau von bis zu 500 bar und 900 bar vorgesehen.

Die Wasserstoffanlieferung an die Tankstelle erfolgt von der Elektrolyseanlage, welche in räumlicher Nähe zur Tankstelle geplant ist. Der in der Elektrolyseanlage produzierte und auf Produktqualität aufgereinigte Wasserstoff wird über eine Rohrleitung bei einem Ausgangsdruck von ca. 29 bar(e) an die Tankstelle geliefert. Im betrachteten Anwendungsfall wurde eine gemeinsame Nutzung der 500 bar Verdichteranlage der MHKW-Trailerabfüllanlage für den Betrieb der Trailerabfüllung und der MHKW-Wasserstofftankstelle vorgesehen. Dies ist möglich durch das gleiche Betriebsdruckniveau von MEGC-Trailer und stationärem Wasserstoffspeicher der Tankstelle.

Ergänzend zum Aufstellungsplan wurden die Ergebnisse der Schleppkurvenanalyse dargestellt. Die Schleppkurvenanalyse stellt auch hier eine vorläufige Einschätzung der Fahrt- und Rangierwege dar, welche zur Anfahrt von Fahrzeugen an die Wasserstofftankstelle zu berücksichtigen sind und müssen in weiterführenden Planungsphasen bestätigt werden.

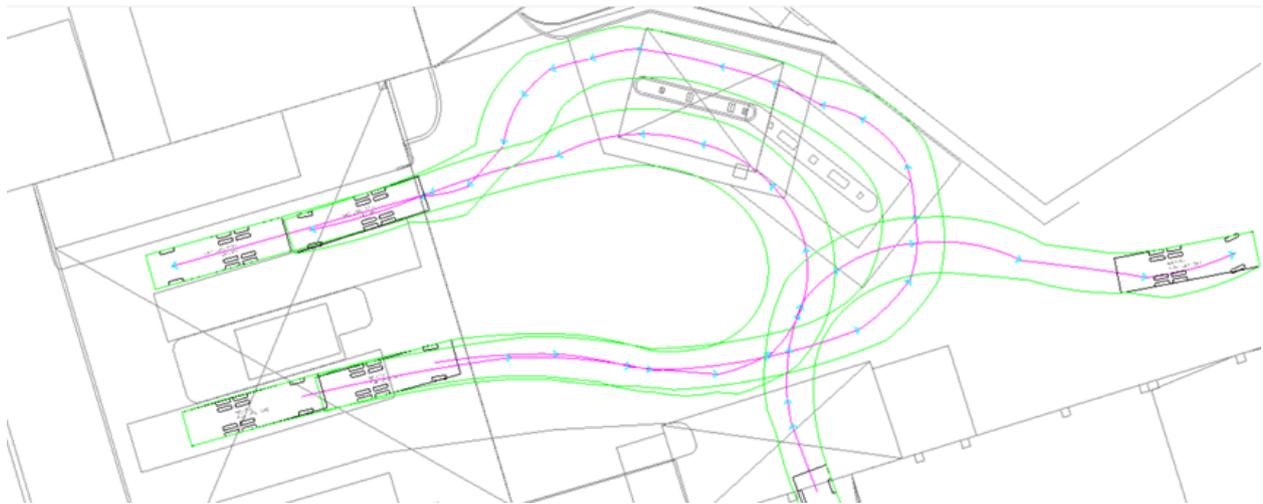


Abbildung 52: Schleppkurvenanalyse bei Anfahrt der MHKW-Tankstelle (Abfallsammelfahrzeug)

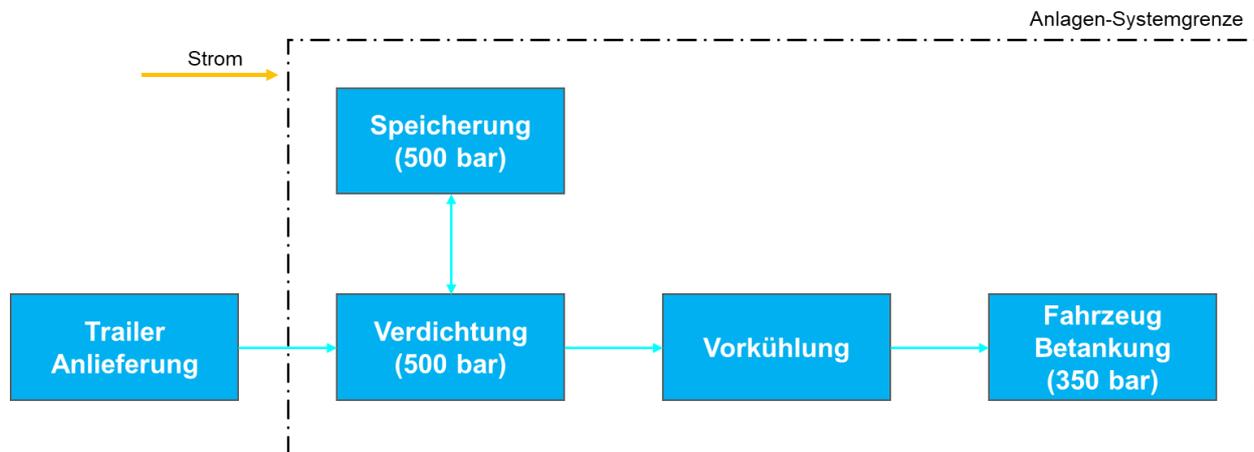


Abbildung 53: Prozessfließdiagramm der anwenderspezifischen Tankstelle

Auf Basis der Auslegung für die Elektrolyse- und Trailerabfüllanlage wurden abweichend von den in Abschnitt 4.3.2 definierten Anforderungen zwei 500 bar Kompressoren mit einer Förderleistung von jeweils 50 kg/h berücksichtigt. Somit konnte eine Anlagenkonfiguration mit 2 x 58 % bezogen auf die max. Förderleistung erreicht werden.

Aufstellung

Es wird davon ausgegangen, dass die bestehende MHKW-Betriebstankstelle zur Wasserstoffbetankung erweitert wird. Die Betriebstankstelle soll, wenn möglich, weiterhin zur Betankung von Dieselfahrzeugen genutzt werden. Somit ist das Tankstellenkonzept nicht nur speziell, sondern auch im öffentlichen Raum anwendbar.

Der Zapfsäulenbereich ist überdacht. Die Luftkühler für die Kompressoren befinden sich auf dem Containerdach.

Insgesamt kann festgestellt werden, dass die zur Verfügung stehende Aufstellungsfläche zur Installation der Anlagenkomponenten durch die kombinierte Nutzung mit der Trailerabfüllanlage stark eingeschränkt ist. In der Aufstellungsplanung muss daher auf eine möglichst kompakte Bauweise der Anlagenkomponenten geachtet werden. Ausbauflächen für eine Erweiterung von Speicher- oder Kompressorkapazitäten sind nicht vorhanden. Durch die kompakte Aufstellung der Anlagenkomponenten, insbesondere der raumbestimmenden Speicher- und Kompressoreinheiten, können Sicherheits- und Schutzabstände nicht eingehalten werden, so dass Brandschutzwände zwischen den Anlagenkomponenten sowie zu umgebenden Bauwerken vorzusehen sind.

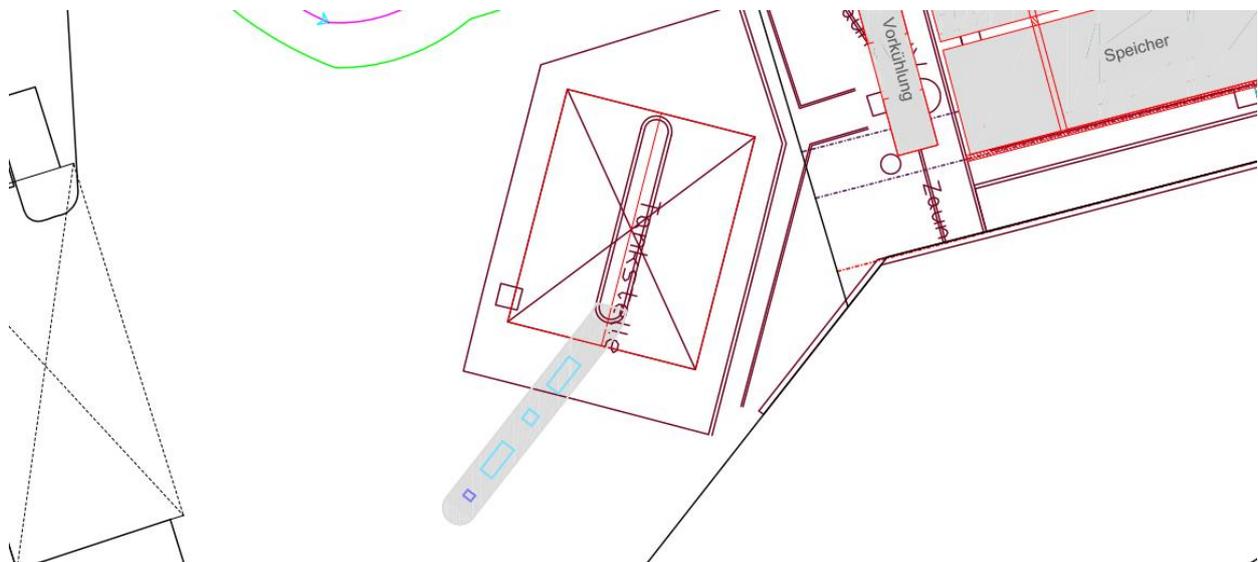


Abbildung 54: Aufstellungsentwurf MHKW-Tankstelle

4.3.2.2. Anwendertankstelle Binnenschifffahrt

Betrachtet wurde die Fahrzeugflotte eines Projektpartners, der über eine Flotte von fünf Binnenfahrgastschiffen verfügt, welche derzeit mittels Dieselantrieb betrieben werden. Mittelfristig ist die Umrüstung bzw. Neuanschaffung eines oder mehrerer Fahrgastschiffe mit Brennstoffzellenantrieb mit Wasserstoff als Kraftstoff denkbar. Für diesen Anwendungsfall wird folgendes Betankungskonzept dargestellt.

Fahrzeugflotte

Der theoretische Wasserstoffbedarf der Fahrzeugflotte wurde auf Basis des derzeitigen Dieserverbrauchs abgeleitet. Dazu wurden die folgenden Annahmen getroffen:

- Bei einer Umrüstung oder Neuanschaffung werden Niedertemperatur-Brennstoffzellenantriebe mit Wasserstoff als Kraftstoff eingesetzt.
- Der Wirkungsgrad des Brennstoffzellenantriebs wurde mit 40 % angenommen (bezogen auf den Heizwert).
- Der Wirkungsgrad des Dieselmotorantriebs wurde mit 35 % angenommen, bezogen auf einen Heizwert von 42,7 MJ/kg und einer Dichte von 840 kg/m³.

Die folgende Tabelle beschreibt den Kraftstoffverbrauch (Diesel und Wasserstoff) der Fahrzeugflotte sowie die erforderlichen Kapazitäten des Fahrzeugtanks für zwei Tankreichweiten (in Tagen):

Tabelle 35: Theoretische Wasserstoffverbräuche der Fahrzeugflotte

Parameter		Schiff 1	Schiff 2	Schiff 3	Schiff 4	Schiff 5
Dieserverbrauch pro Betriebsstunde	l/h	50	50	22,5	50	22,5
Durchschnittliche tägliche Betriebsstunden	h/Tag	10	10	10	10	10
Dieserverbrauch pro Tag	l/Tag	500	500	225	500	225
Wasserstoffverbrauch pro Tag	kg/Tag	148,6	148,6	66,9	148,6	66,9
Fahrzeugtankkapazität für 20 Tage	kg	2972	2972	1337	2972	1337
Fahrzeugtankkapazität für 1 Tag	kg	149	149	67	149	67

Anforderungen

Die gewünschte Autarkie bzw. Tankreichweite hat einen direkten Einfluss auf die erforderliche Kapazität des Wasserstoffspeichers an Bord des Fahrzeugs. Zudem beeinflusst die Tankreichweite indirekt die erforderliche Betankungsgeschwindigkeit, da die betrieblichen Anforderungen einen Betankungszeitraum von maximal zwei (2) Stunden vorgeben.

In Bezug auf die Betankungsgeschwindigkeit wurde im Rahmen der Konzeptentwicklung von einer Begrenzung auf 60 g/s ausgegangen, um die erforderliche Vorkühlung des Wasserstoffs zu begrenzen. Die Betankungsgeschwindigkeit bildet somit zusammen mit der Zieltankreichweite die Auslegungsgrundlage für die Dimensionierung der Betankungsinfrastruktur.

Basierend auf den festgelegten Parametern für die Betankungsgeschwindigkeit (60 g/s) und den Betankungszeitraum (2 Stunden) können die maximalen Tankreichweiten je Fahrzeugtyp angegeben werden, wie in nachfolgender Tabelle dargestellt.

Tabelle 36: Realisierbare Tankreichweite (geschätzt)

Parameter		Schiff 1	Schiff 2	Schiff 3	Schiff 4	Schiff 5
Tankreichweite	Tage	2,8	2,8	6,1	2,8	6,1

Betankungskonzept

Als Auslegungsgrundlage wurde eine Betankungsgeschwindigkeit von 60 g/s bei einer Vorkühlung des Wasserstoffs auf -20 °C berücksichtigt. Für die Berechnung wurde vereinfacht davon ausgegangen, dass Fahrzeugtank und Trailertank über das gleiche Druckniveau und die gleiche Speicherkapazität verfügen. Die Auslegungstemperatur beträgt 45 °C.

Für die Auslegung der Betankungsinfrastruktur sind grundsätzlich drei Varianten zu unterscheiden:

1. Mobile Tankstelle auf LKW-Trailer
 - a. Mobile Betankung mit Direktbefüllung aus 20' 500 bar(e) MEGC Trailer
 - b. Mobile Betankung mit Direktbefüllung aus 40' 500 bar(e) MEGC Trailer
2. Stationäre Tankstelle inkl. festinstallierter Anlagentechnik
3. Teil-stationäre Tankstelle mit Wasserstoffanlieferung per LKW-Trailer und Direktbefüllung

Mobile Tankstellen eignen sich vor allem für kleine bis mittlere Bedarfsmengen (300-400 kg/Tag) zur Betankung von Straßenfahrzeugen (350 bar) sowie als Backup-Lösung zur Überbrückung kurzfristiger Ausfallzeiten bspw. einer stationären Tankstelle. Mobile Tankstellen bieten zudem den Vorteil, dass keine permanente Aufstellungsfläche erforderlich ist. LKW-basierte mobile Tankstellenlösungen für Straßenfahrzeuge sind derzeit am Markt verfügbar bzw. befinden sich in der Markteinführungsphase.

Bezogen auf die Anforderungen der Binnenfahrgastschiffe erscheint eine mobile Betankung grundsätzlich möglich. Aufgrund der hohen Betankungsmengen je Tankvorgang und der damit verbundenen hohen Betankungsgeschwindigkeit ist jedoch zu prüfen, ob die Integration der erforderlichen Anlagentechnik auf einem Standard-Trailer realisierbar ist.

Für das Betankungskonzept für Binnenschiffe wurden mobile Tankstellen daher als zum heutigen Zeitpunkt noch nicht geeignet betrachtet.

Demgegenüber stellen stationäre Tankstellensysteme eine geeignete Lösung hinsichtlich der Betankungsleistung dar. Im vorliegenden Fall soll jedoch keine permanente Anlageninstallation im Hafensbereich vorgesehen werden, weshalb stationäre Tankstellen nicht weiter betrachtet wurden.

Als Kompromisslösung zwischen mobilen und stationären Tankstellensystemen wurde eine teil-stationäre Tankstellenlösung vorgeschlagen. In diesem Fall erfolgt die Betankung vergleichbar einer mobilen Tankstelle durch Direktbefüllung aus einem LKW-Hochdrucktrailer ohne Nachverdichtung. Die stationären Anlageninstallationen im Hafengebiet wurden dadurch auf ein Minimum beschränkt und umfassen Nebenanlagen zur Wasserstoffvorkühlung, Gasdruckregelung und Steuerung. Eine permanente Lagerung von Wasserstoff im Hafengebiet ist nicht erforderlich, zudem konnte die notwendige elektrische Anschlussleistung auf ein Minimum reduziert werden, da kein Verdichter erforderlich ist. Hierdurch ist eine Wasserstoffanlieferung mit Standard-Wasserstofftrailern, bspw. 500 bar MEGC-Trailern, unter der Annahme eines ortsfesten Betankungspunkts, möglich.

Um eine direkte Betankung vom Hochdrucktank des MEGC-Trailers ohne Nachverdichtung zu ermöglichen, muss das Druckniveau in den MEGC-Trailern den Speicherdruck im Fahrzeugtank (an Bord des Schiffs) übersteigen. Durch die Ausnutzung der Druckdifferenz findet ein Überströmvorgang von Trailer-Tank in den Fahrzeugtank bis zum Druckausgleich statt. Der Betriebsdruck im Fahrzeugtank soll 350 bar(e) betragen.

Für den Betankungsvorgang wurde davon ausgegangen, dass kein vollständiger Druckausgleich erreicht wird, sondern der Betankungsvorgang bei einem minimalen Betriebsdruck der MEGC-Trailer von 370

bar(e) beendet wird. Somit findet keine vollständige Entleerung des Wasserstofftrailers statt und es verbleibt eine hohe Restmenge Wasserstoff in den Trailern zur weiteren Verwendung.

Die maximale Tankreichweite, die im Referenzfall (Betankungsgeschwindigkeit = 60 g/s) innerhalb von zwei Stunden erreicht werden kann, beträgt ca. 6,1 Tage. Die erforderliche Betankungsmenge beträgt 411 kg. Die Brutto-Speicherkapazität des Fahrzeugtanks beläuft sich auf 457 kg und hat ein Speichervolumen von 20 m³. Um diese Betankungsmengen zu erreichen, ist die Wasserstoff-Anlieferung durch mehrere MEGC-Trailer erforderlich. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über den Betankungsvorgang und die benötigte Anzahl von Trailern.

Tabelle 37: Direktbefüllung 20'-MEGC-Trailer

	Fahrzeugtank				MEGC-Trailer	
	Speicher- stand Be- ginn	Speicher- druck Be- ginn	Speicher- stand Ende	Speicher- druck Ende	Speicher- stand Ende	Speicher- druck Ende
Einheit	kg	bar(e)	kg	bar(e)	kg	bar(e)
Trailer 1	46	30	296	223	252	223
Trailer 2	313	223	431	342	368	342
Trailer 3	431	342	457	350	476	468

Für die vollständige Füllung des Fahrzeugtanks ist die Anlieferung von drei 20' MEGC-Trailern erforderlich. Die Berechnung zeigt, dass nach Ende des Betankungsvorgangs jeweils eine hohe Wasserstoff-Restmenge in den Trailern verbleibt. Die nicht genutzte Kapazität beträgt je nach Druckniveau zwischen 50 % (Trailer 1) und 95 % (Trailer 3) der Brutto-Speicherkapazität.

Aufgrund der hohen Traileranzahl ergeben sich zudem Herausforderungen an die Trailer-Logistik (Kapazitäts-Vorhaltung im Hub, Stellplätze im Hafengebiet), welche gesondert zu betrachten sind. Durch Reichweitenverzicht könnte der Trailer 3 entfallen und somit die Anliefersituation entspannt werden.

Technische Auslegung

Basierend auf einer maximalen Betankungsgeschwindigkeit von 60 g/s beträgt die theoretische Betankungsdauer für eine vollständige Tankfüllung ca. 1 Stunde 40 Minuten. Ausgehend von einer maximal zulässigen Dauer des gesamten Tankvorgangs von 2 Stunden, verbleiben 20 Minuten für An-/Abkupplung sowie Rangiervorgänge während der Traileranlieferung. Der Platzbedarf für den Fahrzeugtank entspricht etwa einem 20' ISO Container (in nachfolgenden Planungsphasen zu bestätigen).

Ein Druckluftanschluss zur Ventilsteuerung (pneumatische gesteuerte Sicherheitsventile) ist erforderlich. Die MEGC-Trailer werden durch eine Schnellkupplung und flexible Hochdruckschlauch-Verbindung mit dem Speichersystem des Binnenfahrgastschiffs verbunden.

Vor der Ankupplung ist aus Sicherheitsgründen eine Spülung der wasserstoffführenden Verbindungsleitungen mit Stickstoff erforderlich. Hierzu wird eine Entlüftungsleitung vorgesehen, welche bspw. am Dispenser installiert werden kann (zu bestimmen in nachfolgenden Planungsphasen).

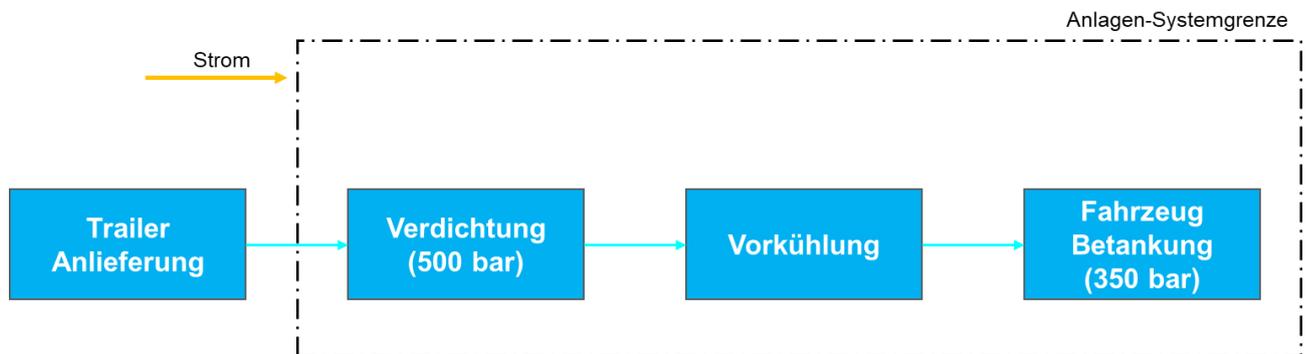


Abbildung 55: Prozessfließdiagramm der Binnenschifffahrts-Wasserstofftankstelle

Im Folgenden wird der vorläufige Aufstellungsplan der Wasserstoff-Tankstelle für Binnenschiffe dargestellt. Der dargestellte Aufstellungsplan umfasst die ortsfest installierten Anlagenkomponenten sowie den Stellplatz für einen 20' MEGC Trailer inklusive Zugmaschine.

Die benötigte Gesamtfläche für die Tankstelle ohne Rangierflächen beträgt ca. 241 m² (14,2 x 17 m). Bei Planung einer Wasseranlieferung mit 40' MEGC-Trailer vergrößert sich die Gesamtfläche auf 327 m² (14,2 x 23 m).

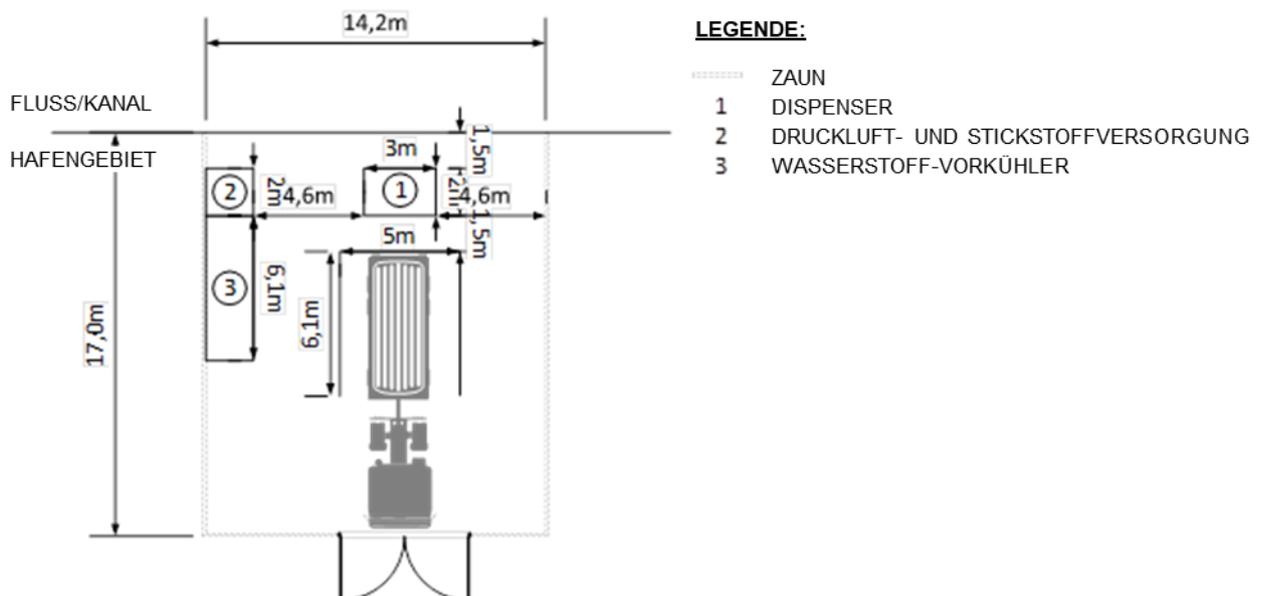


Abbildung 56: Aufstellungsplan der Binnenschifffahrts-Wasserstofftankstelle

4.3.3. Entwicklung Wasserstofferzeugungs- und Abfüllanlage

Als Standort für die Erzeugung von Wasserstoff und dessen Abfüllung wurde das MHKW ausgewählt (vgl. Abschnitt 4.1.1.1). Eine Betankung von BZ-LKW und BZ-Bussen soll sowohl in unmittelbarer räumlicher Nähe der Elektrolyseanlage an der MHKW-Betriebstankstelle erfolgen als auch an externen Tankstellen an sonstige Endabnehmer, nach Lieferung des erzeugten Wasserstoffs per LKW-Trailer. Aus den beschriebenen Einsatzfeldern ergaben sich somit grundsätzliche Anforderungen in Bezug auf die Produktionsmenge, Druckniveau, Gasreinheit, Anlagenverfügbarkeit und Betriebsweise der Elektrolyse- und Trailerabfüllanlage.

Darüber hinaus waren standortspezifische Anforderungen zu berücksichtigen, da die Elektrolyse- und Trailerabfüllanlage auf einer Bestandsfläche des MHKW Nordweststadt geplant werden und vom MKHW aus mit Strom aus der Eigenverbrauchsschiene sowie mit VE-Wasser versorgt werden soll. Durch die vorgegebene begrenzte Standortfläche, bestehende Infrastrukturen, umgebende Bebauung sowie die erforderliche prozess- und leittechnische Integration und Schnittstellen mit dem MHKW ergaben sich zusätzliche Anforderungen in Bezug auf die elektrische Anschlussleistung, Produktionsmenge, Sicherheit, Anlagenverfügbarkeit und Betriebsweise der Elektrolyse- und Trailerabfüllanlage.

Die Anwender- und Standortanforderungen stellen somit die wesentlichen Rahmenbedingungen für die technische Auslegung der Elektrolyse- und Trailerabfüllanlage dar, welche in den folgenden Kapiteln beschrieben werden.

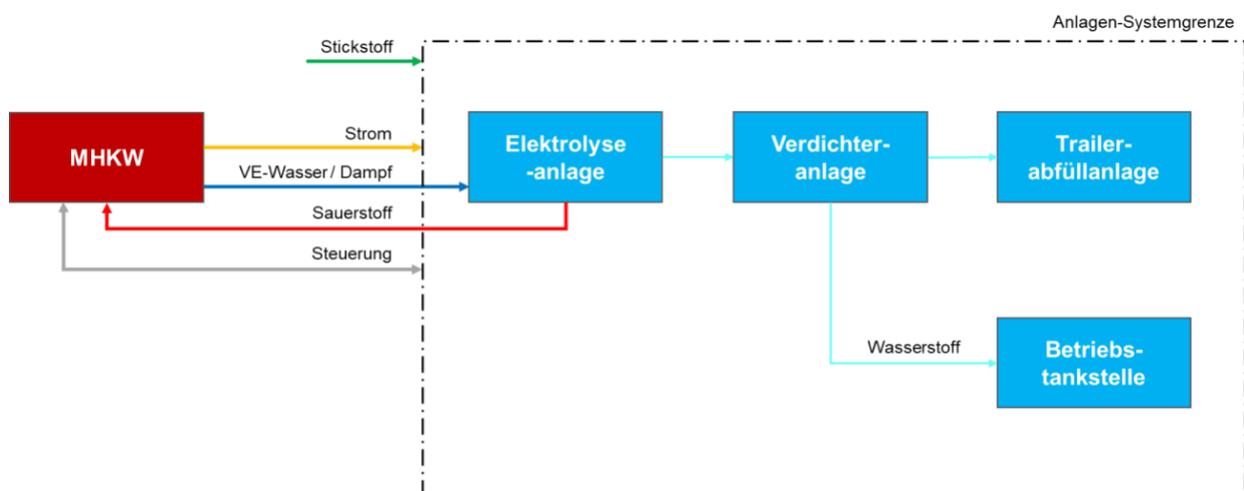


Abbildung 57: Schematische Darstellung der Gesamtanlage MHKW

4.3.3.1. Anlagenkomponenten

Die geplante Elektrolyse- und Trailerabfüllanlage wird gemäß Funktionalität in die folgenden Teilanlagen untergliedert:

- Elektrolyseanlage mit den Teilsystemen:
 - Elektrolyseur inkl. Gas-Wasser-Abscheider
 - Wasserstoff Reinigungs- und Trocknungsanlage (RTA)
 - Wasseraufbereitung

- Kühlsystem
- Trailerabfüllanlage mit den Teilsystemen:
 - Verdichteranlage
 - Wasserstoffspeicher

Übergeordnete Anlagensysteme umfassen:

- Stromversorgung inkl. Transformator-Gleichrichter-System
- Nebenanlagen
- Brandschutzeinrichtungen

Eine detaillierte Übersicht zu Anlagenteilen und Bauwerken am MHKW ist im Anhang zu finden:

[*Übersicht Anlagenteile und Bauwerke*](#)

4.3.3.2. Elektrolyse

Betriebsweise

Die Betriebsweise der Elektrolyseanlage ist abhängig von der Stromverfügbarkeit sowie der Wasserstoff-Nachfrage von Wasserstofftankstelle und Trailerabfüllanlage. Während die Stromversorgung vom MHKW während Normalbetrieb durchgehend, d.h. zeitlich konstant verfügbar ist, stellt sich die Wasserstoffnachfrage zeitabhängig dar, mit Schwankungen innerhalb des Tages- sowie Wochengangs.

Insbesondere in den Anfangsjahren des Projektzeitraums, der sog. Markthochlaufphase, übersteigt die mögliche Produktionskapazität des Elektrolyseurs die erwartete Nachfragemenge. Es ist überwiegend von einem Teillastbetrieb mit zeitweisem Vollastbetrieb zur Deckung von Nachfragespitzen und Pufferung von Ausfallzeiten auszugehen. Die erwartete Schwankungsbreite der Nachfrage innerhalb eines Tages wird zwischen 0-100 % angenommen, mit Stillstandszeiten von wenigen Stunden. Die Elektrolyseanlage muss in diesem Zeitraum bedarfsgerecht gesteuert werden, da kein Niederdruck-Speicher zum Ausgleich von Nachfrage und Produktion zur Verfügung steht.

Im späteren Verlauf des Projektzeitraums, nach erfolgtem Markthochlauf der Wasserstoffnachfrage im Raum Frankfurt a.M., ist von einer Vollaustastung der Elektrolyseanlage auszugehen. Die Elektrolyseanlage wird auch in diesem Zeitraum bedarfsgerecht gesteuert. Da die erwartete Wasserstoff-Nachfrage der Produktionsleistung entspricht, bzw. je nach Szenario die maximale Produktionsleistung übersteigt, stellt sich ein Grundlastbetrieb der Elektrolyseanlage bei Vollast ein.

Ein Teillastbetrieb zur kurzfristigen Reduktion der Produktionsleistung kann bei Verzögerungen der Trailerabfüllung erforderlich sein. Eine Abregelung und vorübergehende Abschaltung erfolgt im Normalbetrieb nicht, sondern ist nur für Instandhaltungs- und Revisionsarbeiten zu erwarten.

Die Betriebsweise der Elektrolyseanlage ist somit nachfragegeführt.

Technische Auslegung

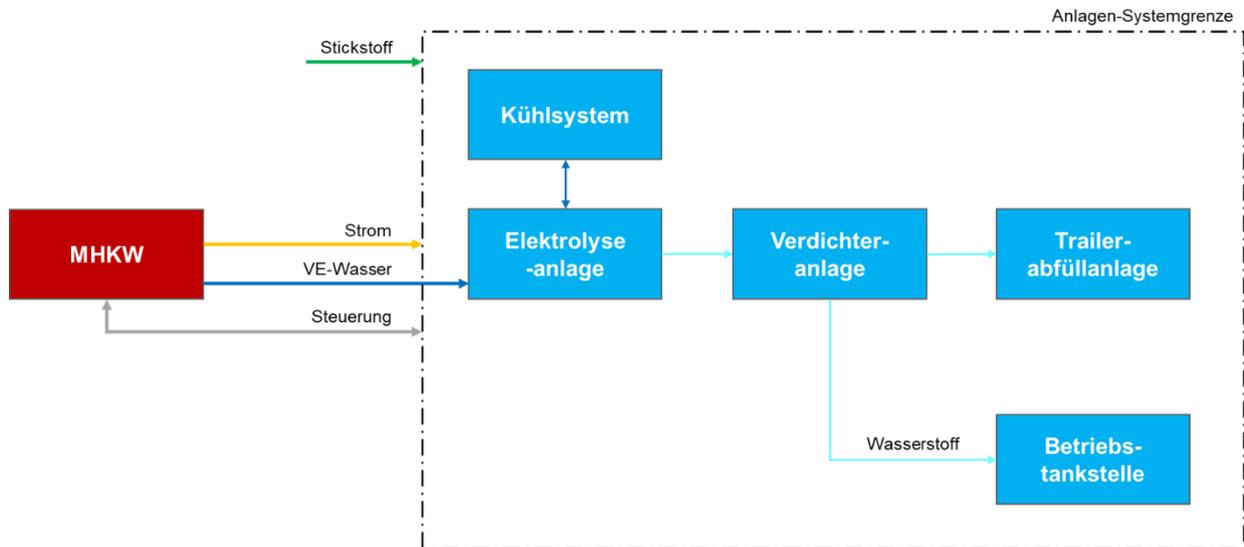


Abbildung 58: Prozessfließdiagramm Elektrolyseanlage

Auf Basis der am MHKW verfügbaren elektrischen Anschlussleistung ist der Betrieb einer Elektrolyseanlage mit einer elektrischen Eingangsleistung von bis zu 5 MW (Gleichstrom) möglich. Die verbleibende verfügbare Anschlussleistung von bis zu 1 MW ist für den Betrieb von Nebenanlagen der Elektrolyse- und Trailerabfüllanlage sowie der Wasserstofftankstelle vorzuhalten.

Die Platzverhältnisse am identifizierten Standort A erfordern eine kompakte Bauweise der Elektrolyseanlage. Ziel war die optimale Ausnutzung der vorhandenen Aufstellungsfläche bei maximaler Wasserstoffproduktionsleistung. Gleichzeitig sollte ein modularer Aufbau der Elektrolyseanlage möglich sein, um, in Abhängigkeit der Optimierungsergebnisse, die Produktionsleistung der Elektrolyseanlage dem Markthochlauf der Wasserstoffnachfrage anzupassen.

Basierend auf den beschriebenen Anforderungen wurde eine druckaufgeladene PEM-Elektrolyseanlage (**P**roton-**E**xchange-**M**embrane) als geeignete Elektrolysetechnologie vorgeschlagen. Gegenüber alkalischen Elektrolyseuren benötigen PEM-Elektrolyseure eine geringere Aufstellungsfläche, bedingt durch die höhere Zell-Leistungsdichte sowie verringerte Anzahl benötigter Nebenanlagen. Zudem liegt der Betriebsdruck der PEM-Elektrolyseure üblicherweise höher als bei alkalischen Elektrolyseuren, sodass der Systemwirkungsgrad verbessert wird und die Baugröße der Verdichteranlage verringert werden kann.

Die beschriebenen Aspekte – Aufstellungsfläche und Ausgangsdruck – bildeten somit die wesentlichen Entscheidungskriterien für die Auswahl der Elektrolysetechnologie unter den projektspezifischen Rahmenbedingungen.

Für die Elektrolyseanlage wurden die folgenden Auslegungsparameter bestimmt:

Tabelle 38: Auslegungsparameter Elektrolyseanlage

Parameter	Wert
Technologie	PEM
Elektrische Anschlussleistung (Stack, DC)	5.000 kW
Max. Wasserstoffproduktionsleistung pro Stunde	100,5 kg/h
Max. Wasserstoffproduktionsleistung pro Tag	2.412 kg/Tag
Max. Sauerstoffproduktion pro Tag	804 kg/Tag
VE-Wasserbedarf pro Stunde	Ca. 1,1 m ³ /h
Ausgangsdruck Wasserstoff	30 bar(e)
Reinheit Wasserstoff	> 99,9 vol. %

Der modulare Aufbau von Elektrolyseanlagen auf Basis mehrerer Elektrolysezellen-Stacks (im Folgenden „Stacks“) erlaubt den modularen Ausbau der Wasserstoffproduktionsleistung. Die Ausbaustufen sind demnach abhängig von der Stack-Leistung sowie der maximalen Elektrolyseur-Modulgröße inklusive Nebensysteme (engl.: Balance-of-Stack, BoS). Diese sind herstellereinspezifisch und daher in späteren Planungsphasen zu bestimmen. Typische Stack-Leistungen für PEM Elektrolyseure betragen derzeit zwischen 1 und 2,5 MW mit Modulgrößen von 1 bis 10 MW.

Es ist zu beachten, dass für die Elektrolyseanlage ein modularer Ausbau technisch möglich ist, während dies für die nachgeschalteten Nebenanlagen, wie Gasaufbereitung und Verdichtung, nicht gleichermaßen zutrifft. Für die Nebenanlagen ist daher ein redundanter Anlagenaufbau oder eine Anlagenüberdimensionierung zu Beginn zu berücksichtigen.

Am Ausgang der Elektrolyseanlage liegt Wasserstoff gasförmig als Rohgas mit einer Reinheit von 99,95 vol.-% vor. Der Wasserstoff ist wassergesättigt. Gasförmige Verunreinigungen umfassen Sauerstoff und Stickstoff, welche in einer nachgeschalteten Reinigungs- und Trocknungsanlage (RTA) entfernt werden, um Wasserstoff in Produktqualität gemäß ISO 14687 zu erzeugen.

Die Rückkühlung der im Elektrolyseur erzeugten Abwärme erfolgt über einen geschlossenen Kühlkreislauf mittels Luftkühlern. Der primäre Kühlkreislauf des Elektrolyseurs erfolgt mit dem Kühlmedium VE-Wasser, welches die Abwärme des Elektrolyseprozesses aufnimmt und diese über einen Wärmetauscher an den sekundären Kühlkreislauf abgibt. Die Vorlauftemperatur des primären Kühlkreislaufs ist in Abhängigkeit der Nennlast zu regeln und sollte einen Temperaturbereich von 35°-45°C nicht überschreiten. Als Kühlmedium im sekundären Kühlkreislauf wird zum Frostschutz ein Wärmeträgerfluid (50/50 % Mischung Wasser / Ethylenglycol bzw. Propylenglycol) eingesetzt. Die Abwärme wird über einen Luftkühler an die Umgebungsluft abgegeben. Die Installation der Luftkühler ist aus Platzgründen auf dem Gebäudedach der Elektrolyseanlage vorgesehen. Die kontinuierliche Umwälzung des Kühlwassers in Primär- und Sekundärkreislauf erfolgt über Kühlwasserumwälzpumpen.

Neben dem Hauptkühlkreislauf zur Rückkühlung des Elektrolyseprozesses ist ein Nebenkühlkreislauf zur Bereitstellung von Kühlwasser für die Gas-Wasser-Abscheidung erforderlich. Die Kühlwasserversorgung erfolgt über eine zentrale Kälteanlage, welche Kühlwasser bei einem Temperaturniveau von 10-15 °C bereitstellt.

4.3.3.3. Wasserstoffreinigungs- und Trocknungsanlage

Zur Aufreinigung des in der Elektrolyseanlage erzeugten Rohgases auf Produktgasqualität (Reingas) ist eine der Elektrolyseanlage nachgeschaltete Reinigungs- und Trocknungsanlage (RTA) erforderlich.

Die Funktion der RTA ist die Trocknung des wassergesättigten, feuchten Rohgases und die Entfernung gasförmiger Verunreinigungen, insbesondere Sauerstoff, zur Erreichung einer Produktgasreinheit von > 99,999 vol.-% Wasserstoff (sogenannter Wasserstoff 5.0).

Die RTA umfasst folgende wesentliche Verfahrensschritte:

- Kühlung des Rohgases (indirekte Wärmeübertragung) und Kondensation des Wasserdampfs
- Katalytische Reduktion (DeOxo) des Restsauerstoffs im Rohgas
- Trocknung (Adsorptionstrocknung) zur Entfernung der Reaktions- und Restfeuchte

Die verwendete Trocknertechnologie ist herstellerabhängig. Technologieoptionen umfassen Druckwechseladsorption (PSA) oder Temperaturwechseladsorption (TSA) in unterschiedlicher Anlagenkonfiguration (Reaktorschaltung). Im Rahmen der vorliegenden Studie wurde von einer TSA mit zwei Trocknerreaktoren ausgegangen. Die Kühlwasserversorgung der RTA erfolgt über eine zentrale Kälteanlage, welche Kühlwasser bei einem Temperaturniveau von 10-15 °C bereitstellt.

4.3.3.4. Verdichteranlage

Der in der Elektrolyseanlage produzierte und aufgereinigte Wasserstoff wird zum Weitertransport in LKW-Trailern auf ein Druckniveau von 500 bar(e) verdichtet. Für den Wasserstofftransport per LKW-Trailer wurden MEGC-Trailer mit einem Betriebsdruck von 500 bar(e) ausgewählt. Der Eingangsdruck für die Verdichteranlage entspricht dem Ausgangsdruck der RTA abzüglich hydraulischer Druckverluste in der Rohrleitung, welche im Rahmen der Studie vernachlässigt wurden. Der Eingangsdruck der Verdichteranlage wurde daher mit 29 bar(e) angenommen.

Der verwendete Verdichtertyp und dessen Ausführungsweise sind herstellerabhängig. Für den im Rahmen der Studie betrachteten Anwendungsfall mittlerer Förderleistungen bei hohem Verdichtungsverhältnis wurden Membranverdichter ausgewählt. Für die erforderliche Druckerhöhung sind zwei bis drei Verdichterstufen (herstellerabhängig) inklusive Zwischenkühlung erforderlich. Aufgrund der Förderleistung wurde auf Basis von Herstellerangaben eine Ausführung der Verdichteranlage in zwei Aggregaten mit jeweils 50 % der Gesamtförderleistung vorgesehen.

Die Rückkühlung der erzeugten Abwärme erfolgt über eine Kühlanlage mit geschlossenem Kühlwasserkreislauf und Luftkühlern, welche üblicherweise bei Containerausführung auf dem Containerdach oder als Tischkühler auf einer Grundfläche neben dem Container ausgeführt werden. Im vorliegenden Fall wurde aus Platzgründen eine Installation auf dem Containerdach berücksichtigt.

4.3.3.5. Stationärer Wasserstoffspeicher

Für den Normalbetrieb der Elektrolyse- und Trailerabfüllanlage ist kein stationärer Wasserstoffspeicher erforderlich. Es wurde davon ausgegangen, dass für einen unterbrechungsfreien Anlagenbetrieb jederzeit ein leerer Trailer an einer der Ladebuchten der Trailerabfüllanlage zur Verfügung steht. Dies ist betrieblich

sicherzustellen. Durch die gleichmäßige Strombereitstellung vom MHKW ist ebenfalls keine Zwischenspeicherung der Wasserstoffproduktionsmenge erforderlich – im Gegensatz beispielsweise zu Projekten mit Elektrolyseanlagen, die über eine Direktanbindung an eine Erneuerbare Energie-Anlage (EE-Anlage) mit intermittierender Stromerzeugung betrieben werden.

Zur Überbrückung kurzzeitiger Nichtverfügbarkeiten der Trailer, z.B. durch verkehrsbedingt verzögerte LKW-Anlieferung vom Distributionsstützpunkt, kann jedoch der Wasserstoffspeicher der Wasserstofftankstelle als Pufferspeicher genutzt werden. Als Zeitraum für eine verzögerte Traileranlieferung wurde im Rahmen der Stresstestszenarien eine Dauer von bis zu zwei Stunden berücksichtigt. Basierend auf einem Vollastbetrieb der Elektrolyseanlage beträgt die zwischenzuspeichernde Wasserstoffmenge 201 kg. Die Speichermenge kann durch Abregelung der Elektrolyseanlage weiter verringert werden, bei 30 % Teillast ergibt sich eine Speichermenge von 60 kg.

Die Vorhaltung freier Speicherkapazitäten ist durch die Speicherbewirtschaftung betrieblich sicherzustellen. Im Rahmen der Anlagenauslegung in dieser Studie wurde keine explizite Speicherkapazität als Reserve vorgesehen.

4.3.3.6. Wasserstofftrailer

Zum Wasserstofftransport wurden Multi Element Gas Container (MEGC) Trailer ausgewählt. Bei MEGC-Trailern handelt es sich containerbasierte Transportmodule zum Transport von Industrie- und Prozessgasen.

Die Transportmodule bestehen aus Gasdruckzylindern des Typs III / IV, welche in ISO-genormten Containerrahmen montiert werden. Die Gasdruckzylinder verfügen über ein hydraulisches Volumen von 350 Litern, vergleichbar mit den im Schwerlastverkehr verwendeten BZ-Tanksystemen. Durch die Containerbasierte Bauweise (10' bis maximal 45') sind MEGC Trailer in unterschiedlichen Transportkapazitäten realisierbar.

Im Gegensatz zu Rohrbündel-Trailern (engl.: Tube Trailer) aus Stahl ermöglicht der höhere Betriebsdruck in MEGC-Trailern mit Typ III / IV Zylindern eine höhere Lade- und Transportkapazität je LKW. Für den vorliegenden Anwendungsfall wurden 20' MEGC-Trailer mit einem Betriebsdruck von 500 bar(e) vorgesehen.

4.3.3.7. Trailerabfüllanlage

Die Trailerabfüllanlage bildet die Schnittstelle zwischen der Verdichteranlage und der externen Verteilinfrastruktur. Um einen unterbrechungsfreien Anlagenbetrieb zu ermöglichen sind zwei redundante Trailer-Ladebuchten geplant. Die Ladebuchten sind parallel zueinander angeordnet und räumlich durch Brand-schutzwände getrennt. Beide Ladebuchten verfügen über jeweils ein Trailer-Ladepanel zur Druckregelung und Steuerung des Befüllvorgangs. Die Verbindung des Trailerspeichers mit der Verdichteranlage erfolgt über eine Schnellkupplung inkl. Abreißsicherung und eine flexible Hochdruckschlauchverbindung. Um einen bi-direktionalen Betrieb der Ladebuchten zu ermöglichen, ist die Installation eines zusätzlichen Trailer-Entladepanels in einer Ladebucht vorgesehen. Im Normalbetrieb ist es vorgesehen, dass ein Trailer in Ladebucht 1 befüllt wird, während ein zweiter, leerer Trailer in Ladebucht 2 bereitsteht.

Anmerkung:

Der bi-direktionale Betrieb eines Panels zu Be- und Entladung ist in nachfolgenden Planungsphasen mit Anlagenherstellern zu prüfen.

Die Dauer für die vollständige Befüllung eines Trailers wurde im Rahmen der Gesamtsystemmodellierung auf drei Stunden festgelegt. Auf Basis der Netto-Speicherkapazität der MEGC-Trailer (474 kg) ergab sich eine erforderliche Betankungsgeschwindigkeit von 158 kg/h bzw. 2,6 kg/min. Zur Begrenzung des Temperaturanstiegs in den Gasdruckzylindern während des Befüllvorgangs wurde von einer Wasserstoffvor-kühlung auf 0 °C und einer max. Füllrate von 1,8 kg/min (je Zylinder) ausgegangen. Dementsprechend ist eine parallele Befüllung von min. zwei Zylindersektionen erforderlich, welche zu einer effektiven Betankungsgeschwindigkeit von bis zu 3,6 kg/min (2 x 1,8 kg/min) führt.

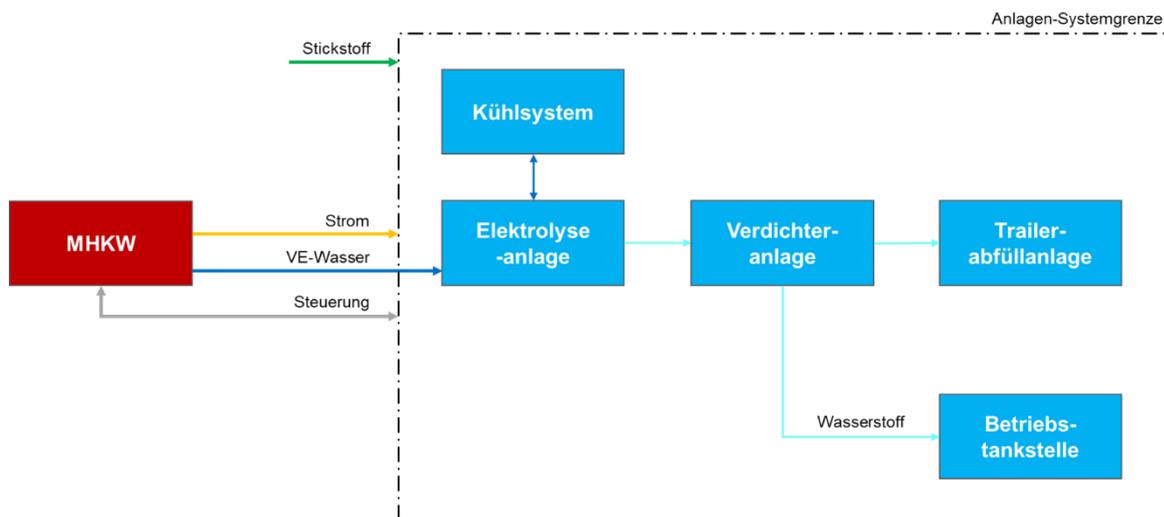


Abbildung 59: Prozessflussdiagramm Trailerabfüllanlage

4.3.3.8. Kühlsystem

Die Rückkühlung der prozessbedingten Abwärme aus der Elektrolyseanlage und den Gleichrichtern erfolgt in einem geschlossenen Kühlwasserkreislauf. Die Wärmeabgabe erfolgt über Luftkühler an die Umgebungsluft. Als Kühlmedium im sekundären Kühlkreislauf wird zum Frostschutz ein Wärmeträgerfluid (50/50 % Mischung Wasser / Ethylenglycol bzw. Propylenglycol) eingesetzt. Die Umwälzung erfolgt über Kühlwasserumlaufpumpen. Aus Platzgründen wurde eine Installation der Luftkühler auf dem Dach des Anlagegebäudes berücksichtigt. Der Kühlkreislauf ist modular aufgebaut und erweiterbar.

4.3.3.9. Druckluftversorgung

Eine Druckluftversorgung ist für die Ansteuerung pneumatischer Ventile der Elektrolyse-, Kompressor- und Trailerabfüllanlage erforderlich. Im Rahmen der Grundlagenermittlung wurde festgestellt, dass eine Anbindung an die bestehende Druckluftversorgung des MHKW nicht möglich ist. Daher wurde im Rahmen der Anlagenauslegung ein neu zu installierendes Druckluftsystem (Druckluftkompressor, inklusive Luftfilter, Trocknung und Pufferbehälter) im Innenbereich des Elektrolysegebäudes berücksichtigt.

4.3.3.10. Stickstoffversorgung

Zur Inertisierung der wasserstoffführenden Apparate und Rohrleitungen vor Instandhaltungs- und Wartungsarbeiten und während längerer Stillstandszeiten ist eine Spülung mit dem Inertgas Stickstoff erforderlich. Ein kontinuierlicher Stickstoffbedarf während des Anlagenbetriebs besteht nicht. Für kleinere bis mittlere Anlagengrößen werden zur Stickstoffversorgung Flaschenbündel eingesetzt.

4.3.3.11. Wasseraufbereitung

Erforderliche Menge

Zur Produktion von 1 Nm³ Wasserstoff wird 1 Liter vollentsalztes Wasser (VE-Wasser) benötigt. Die konzipierte 5 MW Elektrolyseanlage wird max. 100,5 kg/h Wasserstoff produzieren. Damit errechnet sich ein Eingangswasserstrom von 1,1 m³/h.

Erforderliche Wasserqualität

Gemäß Herstellerinformationen muss das Prozesswasser eines PEM-Elektrolyseurs den Anforderungen der Norm ASTM D1193 Type III genügen, um ohne weitere Aufbereitungsschritte den Elektrolysezellen zugeführt werden zu können. Abweichungen von der Norm ergeben sich bei Einzelwerten, welche im Folgenden gegenübergestellt sind. Bei abweichenden Wasserqualitäten sind zusätzliche Aufbereitungsschritte vorzusehen.

Tabelle 39: Anforderungen Wasserqualität für Elektrolyseure

Parameter	ASTM D1193 Type III	Typische Anlagenanforderung
Leitfähigkeit ($\mu\text{S}/\text{cm}$) bei 25°C, max.	0,25	0,25
Widerstand ($\text{M}\Omega\text{cm}$), min.	4,0	4,0
pH @ 25°C	-	-
TOC ($\mu\text{g}/\text{l}$), max.	200	50
Natrium ($\mu\text{g}/\text{l}$), max.	10	5
SiO_2 ($\mu\text{g}/\text{l}$), max.	500	3
Chloride ($\mu\text{g}/\text{l}$), max.	10	5

Verfügbare Wasserqualität und Menge

Das MHKW besitzt eine im Jahr 2020 erneuerte und um 50 % erweiterte Vollentsalzungsanlage zur Versorgung des Wasser-Dampf Kreislaufs des MHKW mit einem VE-Wasserspeicher von 280 m³ Kapazität. Nach Information des MHKW Betreibers kann davon maximal 2 m³/h für die Wasserstofferzeugungsanlage zur Verfügung gestellt werden. Es kann bei Anfahrvorgängen des MHKW über einen Zeitraum von 12 Stunden zu einer eingeschränkten Verfügbarkeit der VE-Wasser Bereitstellung kommen. Es wird davon ausgegangen, dass die Speicherkapazität des VE-Wassertanks des MHKW ausreicht, um in solchen Fällen eine kontinuierliche Belieferung der Elektrolyseanlage sicherzustellen.

Die VE-Anlage des MHKW besteht aus zwei Produktionslinien, jeweils bestehend aus Filtrationsstufe, Kationenaustauscher, Membrantagaser zur CO₂ Entfernung, Anionenaustauscher und Mischbett-austauscher. Die VE-Wasserqualität entspricht bereits den Anforderungen der ASTM D1193, Type III, allerdings konnte für TOC nur ein einzelner Wert angegeben werden, der genau dem Grenzwert entspricht. Gemäß Herstellerangaben gelten abweichend von ASTM D1193 niedrigere Eingangswerte für SiO₂ (3 $\mu\text{g}/\text{l}$) und TOC (50 $\mu\text{g}/\text{l}$). Daher wurde eine zusätzliche Filtrationsstufe vorgesehen, um diese Anforderungen sicher einzuhalten.

Um die im Wasser gelösten makromolekularen Schwebstoffe (TOC) sowie kolloidales SiO₂ zu entfernen und sicher die geforderte Reinheit zu erreichen, wurde das vom MHKW zur Verfügung gestellte VE-Wasser nochmals mit Ultrafiltrations-Membranmodulen (UF) gereinigt. UF ist ein sehr effektives Verfahren, welches alle Schwebstoffe bis zur Größe von Viren aus dem Wasser entfernt.

Wasseraufbereitung im Elektrolyseur Bypass

In der Elektrolyseanlage wird ein Teil des Prozesswasser im Kreislauf geführt von den Elektrolysemodulen zu den Gas-Wasser-Abscheidern der Wasserstoff und Sauerstoff Teilströme und wieder zurück zu den Elektrolysemodulen. Damit die Wasserqualität dabei über einen längeren Zeitraum konstant bleibt, wird ein Teil des Kreislaufstroms in einer Bypass-Filtration durch Feinfilter und Mischbett-Ionenaustauscher-Module behandelt, um feine Korrosionsprodukte und Salzionen während des Betriebes kontinuierlich zu entfernen. Die Ionenaustauscher-Module werden durch extern frisch regenerierte ersetzt, wenn deren Kapazität erschöpft ist.

4.3.3.12. Abwasserbehandlung

Folgende Abwässer fallen in der Elektrolyseanlage an:

- UF-Rückspülabwasser
- Abwasser aus den geschlossenen Kühlkreisläufen, wenn dieses bei Bedarf ausgetauscht werden muss.

Das Rückspülabwasser der Ultrafiltrationsanlage wird in den Neutralisationstank geleitet. Dort wird das gesammelte Abwasser mit Salzsäure bzw. Natronlauge neutralisiert und von dort in den Sanitärabwasserkanal geleitet. Eine Schutzschaltung bestehend aus kontinuierlicher pH-Messung und magnetgesteuertem Auslassventil gewährleistet, dass dies nur dann möglich ist, wenn der pH-Wert des Abwassers im neutralen Bereich von pH 6 – 9 liegt. Die Neutralisationschemikalien werden abhängig vom aktuell gemessenen pH-Wert von der gemeinsamen Dosierstation über separate Dosierpumpen zugeführt. Das Kreislaufwasser der geschlossenen Kühlkreisläufe enthält ca. 50 % Ethylenglykol als Frostschutzmittel und kann daher nicht in die Kanalisation abgegeben werden. Es wird während der jährlichen Revision der Anlage per Tankwagen der externen Behandlung/Entsorgung zugeführt.

4.3.3.13. Stromversorgung

Spannungsebenen

Die Stromversorgung der Elektrolyseanlage erfolgt über die Eigenverbrauchsschiene des MHKW. Die verfügbaren Spannungsebenen betragen 6,3 kV und 0,4 kV. Folgende Spannungsebenen sind für die Elektrolyseanlage vorzusehen:

- 6,3 kV: die Anbindung an die 6,3 kV Schiene des MHKW erfolgt über ein freies Abgangsfeld in der Schaltanlage.
- 0,4 kV: die Niederspannungsversorgung wird durch Umspannung von der 6,3 kV Spannungsebene sichergestellt. Eine 0,4 kV Anbindung wird vom MHKW nicht bereitgestellt. Daher ist ein Hilfstransformator 6,3 kV / 0,4 kV erforderlich. Eine zusätzliche, redundante 0,4 kV Anbindung an das MHKW soll benutzt werden als Hilfeinspeisung während Wartung- und Instandhaltung sowie in Notfällen. Ein Reserveschalter mit bis zu 800 kW steht hierfür zur Verfügung. Ein Hauptverteiler und ein Unterverteiler sind vorgesehen.
- 0,4 kV (Notstrom): eine 0,4 kV Notstromversorgung ist zur Versorgung kritischer Lasten (wie Mess-, Regel- und Steuerungstechnik, Lüftung, Beleuchtung, Umwälzpumpen) im Black-Out-Fall sowie zur sicheren Abschaltung der Anlage erforderlich. Die BMA Notstromschiene des MHKW ist für zusätzliche Lasten nicht ausgelegt, weshalb ein separater Dieselgenerator mit einer Nennleistung von 120 kVA vorgesehen wird.
- 230 V (USV): eine unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) wird für die Versorgung kritischer Lasten wie Mess-, Regel- und Steuerungstechnik, Lüftung, Beleuchtung, Umwälzpumpen vorgesehen.

Transformator-Gleichrichter-Einheit

Der Gleichrichter zur Umwandlung von Wechsel- in Gleichstrom ist ein leistungselektronisches Betriebsmittel und erzeugt als nichtlineare Last Oberschwingungen mit Rückwirkung auf das Versorgungsnetz. Die

Nennleistung der Gleichrichter beträgt 5 MW, welche in etwa der bisherigen Eigenbedarfsleistung des MHKW (4,5-5 MW) entspricht. Nach IEEE 399 ist eine Systemanalyse erforderlich, wenn eine große Anzahl nichtlinearer Lasten (typischerweise größer als 25–30 % der Gesamtlast eines Busses oder des Systems) vorhanden sind oder voraussichtlich hinzukommen. Daher wird empfohlen, in der Realisierungsphase des Projekts eine Systemanalyse durchzuführen.

Zur Begrenzung der Oberschwingungsverzerrung im Versorgungsnetz und zur Sicherstellung des ordnungsgemäßen Betriebs der MHKW Betriebsmittel, wird die Verwendung einer der folgenden Gleichrichtertypen empfohlen:

- 24-Puls-Thyristor-Gleichrichter
- 24-Puls-Diodengleichrichter
- 6-Puls-IGBT-Gleichrichter

Auf Basis von Herstellerinformationen sind die genannten Gleichrichtertypen geeignet und erfüllen die Anforderungen der IEEE 519. Für die vorliegende Planung wurde ein 24-Puls-Thyristor-Gleichrichter berücksichtigt.

Es ist zu beachten, dass beim 24-Puls-Thyristor-Gleichrichter der 24-Puls-Betrieb durch den Betrieb von zwei 12-Puls-Gleichrichtermodulen mit je 2,5 MW Nennleistung erreicht wird. Der 24-Puls-Betrieb wird durch Phasenverschiebung in der Primärwicklung des Transformators erreicht. Durch den Betrieb von zwei 12-Puls-Gleichrichtermodulen wird dadurch effektiv ein 24-Puls-Betrieb erreicht. Bei Auswahl einer phasengesteuerten Ausführung ist zu prüfen, ob die Oberschwingungsaussendungen im 12-Puls Betrieb eines 2,5 MW Gleichrichtermoduls die Betriebsanforderungen des MHKW erfüllen. Für die 2,5-MW Gleichrichtermodulen wird je ein 3-Wicklungs-Transformator benötigt.

Die Ausführung des Kühlsystems der Gleichrichter ist herstellerabhängig und kann als Wasser- oder Luftkühlung erfolgen sowie für verschiedene Temperaturniveaus ausgelegt werden. In der vorliegenden Planung wurde eine Wasserkühlung (geschlossener Kreislauf) berücksichtigt. Die Anbindung an das Hauptkühlsystem der Elektrolyseanlage erfolgt über einen Wärmeübertrager.

Der gewählte Transformatortyp ist ein Gießharztransformator. Aufgrund der beengten Platzverhältnisse wurde die trockene Ausführung bevorzugt, da keine besonderen Brandschutzmaßnahmen (wie Brandschutzwände) oder Öleinschlüsse erforderlich sind. Für die Aufstellungsplanung der Elektrolyseanlage wurden typische Anlagendimensionen auf Basis von Herstellerinformationen berücksichtigt.

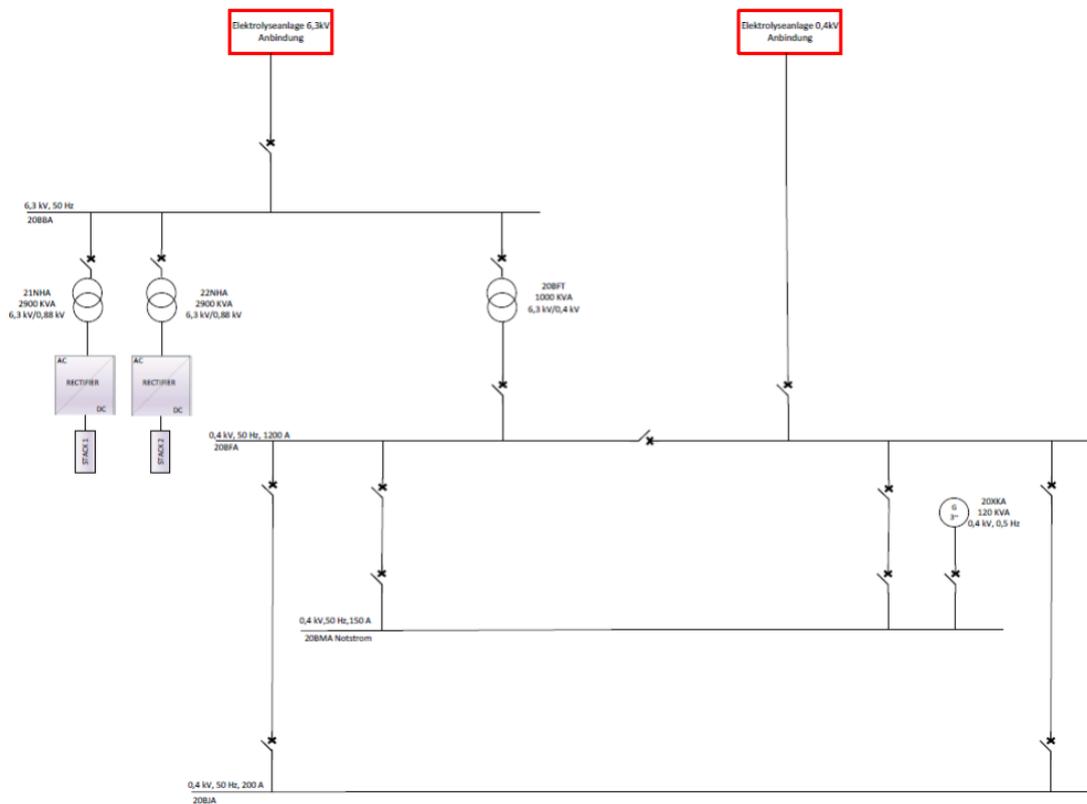


Abbildung 60: Übersichtsschaltbild Elektrolyseanlage

4.3.3.14. Aufstellungsplanung

Im Rahmen der Grundlagenermittlung wurde als bevorzugter Standort für die Elektrolyse- und Trailerabfüllanlage auf dem Gelände des MHKW Nordweststadt der Bereich des Salzlagers und der freien Betriebsfläche nördlich davon identifiziert.

Der bevorzugte Standort liegt innerhalb des Zauns des Kraftwerkgeländes zwischen dem Umspannwerk Heddernheim im Westen und Gebäuden (Bildungswerk der Hessischen Wirtschaft und anderen Einrichtungen) auf dem Nachbargrundstück im Osten. Im Süden, dem Platz des gegenwärtigen Salzlagers, grenzt der Standort an eine bestehende Dieseltankstelle (mit einem oberirdischen 10 m³ AdBlue-Fülltank und zwei unterirdischen 50 m³ und 100 m³ Dieseltanks), welche durch einen Zaun und einen gemauerten Höhengsprung getrennt ca. 0,5 m höher als das Salzlager liegt (siehe Abbildung 61, Abbildung 62).

Im Osten und getrennt durch die Zufahrtsstraße grenzt der Standort an den Zaun des Umspannwerkes (UW) Heddernheim. Die Hochspannungstransformatoren des UW sind zur Zufahrtsstraße hin ausgerichtet und stehen in einem Abstand von ca. 10-11 m von den Standortflächen östl. der Zufahrtsstraße.

Die Größe des geplanten Standorts zwischen Grenzzaun im Norden, dem Nachbargrundstück im Osten, der Straße entlang des Umspannwerkes im Westen und dem Zaun zwischen Salzlager und Dieseltankstelle beträgt knapp 1.200 m² (1.153 m²).

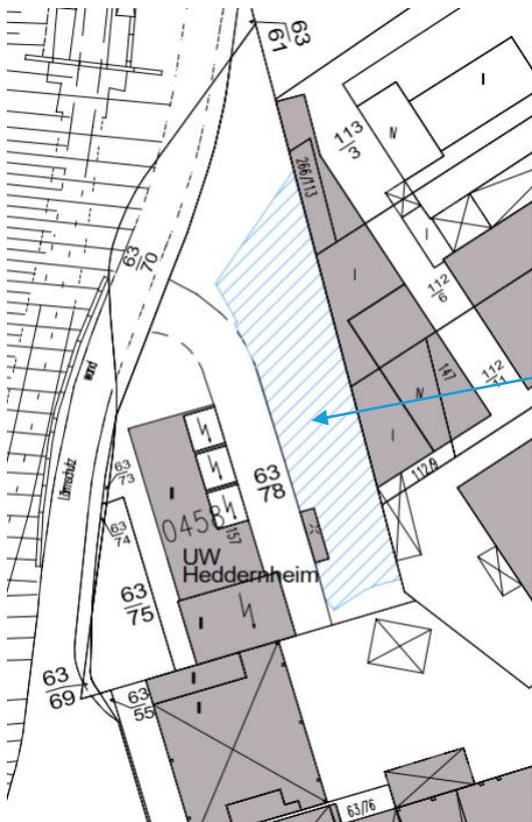
Die leicht abfallende Zufahrt zum Standort erfolgt über das Haupttor des MHKW. Die lichte Durchfahrts- höhe des Torbaus beträgt 4,2 m. Die Zufahrtstraße im Bereich des Standorts ist durch ein Tor und Zaun

vom Kraftwerksbereich und vom Umspannwerk getrennt. Dieser Zaun kann als äußere betriebliche Trennung des H₂-Produktionsstandortes vom restlichen Kraftwerksbereich beibehalten bzw. baulich modifiziert werden. Aus Gründen der betrieblichen Sicherheit ist das Zufahrttor im Regelfall geschlossen zu halten.

Die Ausfahrt für die LKW-Sattelschlepper (Wasserstoff-Trailer) aus den Trailer-Boxen erfolgt über die mind. 4 m (4,4 m) breite Straße entlang des Umspannwerkes durch ein Neben-Tor im Norden des Grenzzauns des Kraftwerksgeländes. Die Straße mündet dort in eine Nebenstraße zur Rosa-Luxemburg-Straße, welche weiter zur Heddernheimer Landstraße führt.

Unterirdische Anlagen wie Leitungen und Schächte sind an der Oberfläche durch Kanaldeckel und Schachtabdeckungen gekennzeichnet. Bekannte bestehende unterirdische Leitungen am Standort sind Abwasserrohre unterhalb des südlichen Teils der Zufahrtstraße zum Standort und im Bereich der Zufahrt vom Haupttor zwischen Dieseltankstelle und dem MHKW.

Maßgebend für den Platzbedarf und die Aufstellungsplanung der Wasserstoff-Produktionsanlage ist die Zufahrt und Abfahrt der Sattelschlepper mit den Trailern zum Transport des hochverdichteten Wasserstoffs in Hochdruckbehältern. Die Abmessungen dieser drei-achsigen Trailer betragen typischerweise 12,7 m Länge, 2,5 m Breite und 3,6 m Höhe. Zur Simulation der Schleppkurven für das Rangieren der Sattelschlepper zur Überprüfung der Aufstellungsplanung wurde der Standard-Sattelzug gemäß FGSV Publikation 287 (2001) „Bemessungsfahrzeuge und Schleppkurven zur Überprüfung der Befahrbarkeit von Verkehrsflächen“ (FGSV-2001) verwendet, welcher die maximale Abmessung für Sattelzüge entsprechend StVZO besitzt (max. Länge 13,6 m). Die Simulation der Schleppkurven mit dem genannten Standard-Sattelzug erfolgte mittels dem Online-Tool „AutoTURN“, der Firma Transoft Solutions. Mit diesem Tool wurden Schleppkurven für vorwärts- und rückwärtsfahrende Fahrzeuge gemäß StVZO erzeugt und in CAD-Zeichnungen oder auch Satelliten-Bildern integriert.



Geplanter Standort Wasserstoff-Produktionsanlage

Abbildung 61: Lage geplanter Standort

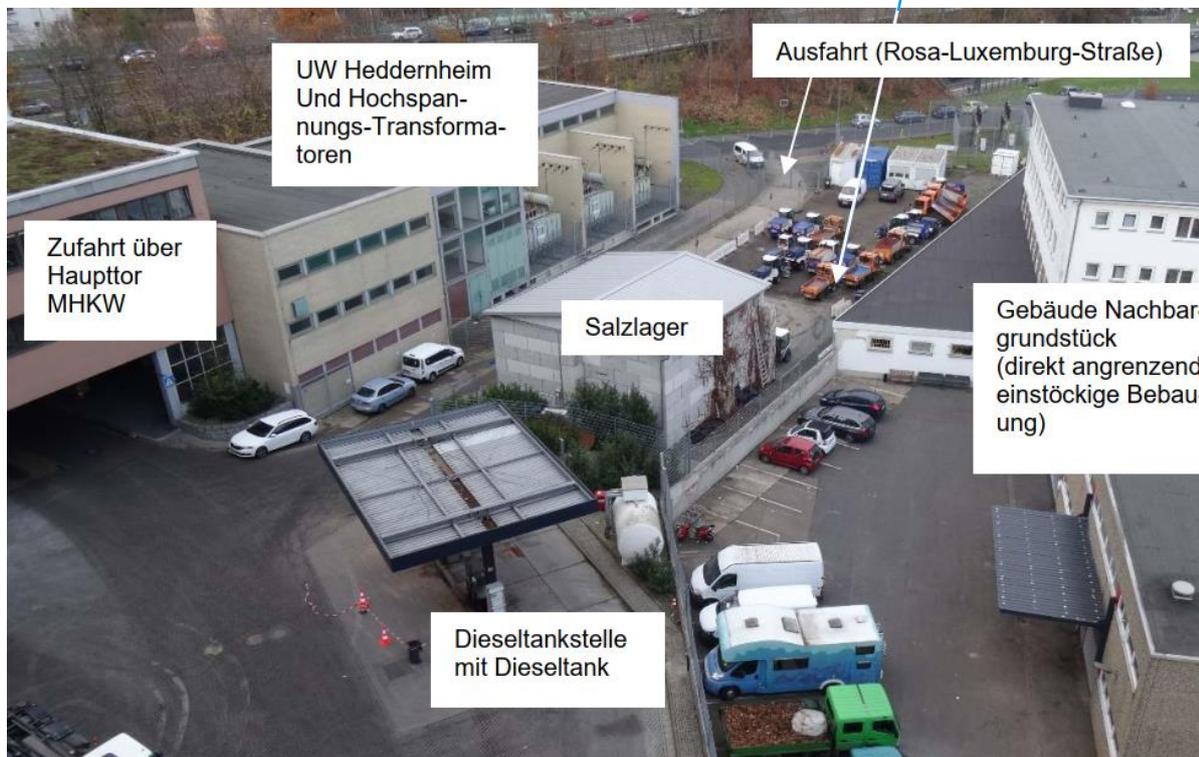


Abbildung 62: Überblick geplanter Standort am MHKW und bestehende Bebauung

Der Abstand der bestehenden Tankstelle (Verkehrinsel) zum nächsten Gebäude der MHKW beträgt mind. 18 m. Der Abstand der aufgekanteten Tankstellenfläche beträgt mind. 12 m. Der Abstand von der Tankstellenfläche bis zur Schleppkurve der aus dem MHKW-Kesselhaus herausfahrenden Müllfahrzeuge beträgt ca. 4-5 m (Abbildung 63).

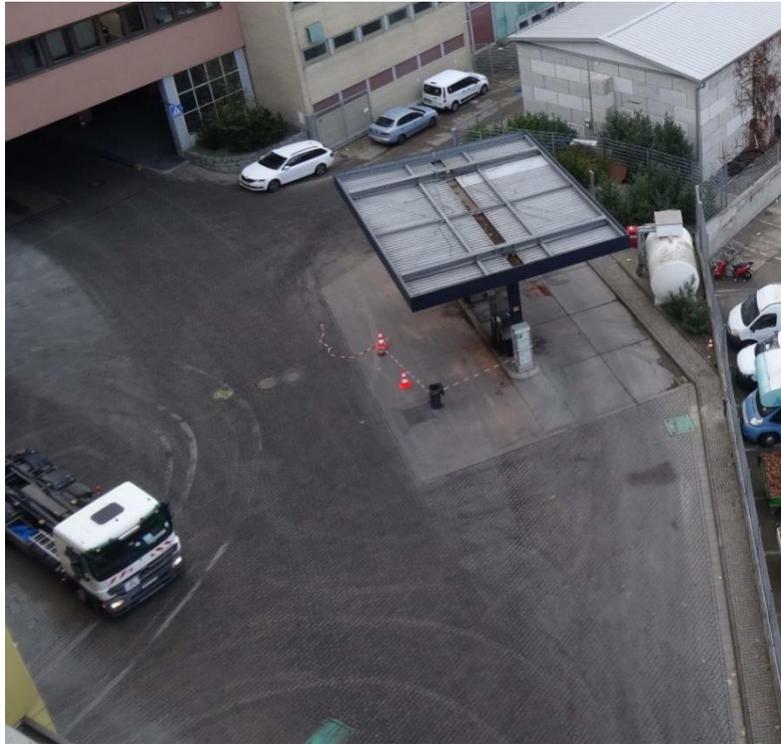


Abbildung 63: Zufahrt zur bestehenden Dieseltankstelle

Die gegenwärtige Situation ist in obiger Abbildung zu sehen. Die Reifenspuren der Wendekreise der Müllfahrzeuge mit Anfahrt der Tankstelle sind dabei auf dem Boden zu sehen. Für die Betankung an den vorgesehenen Wasserstoff-Zapfsäulen neben den bestehenden Zapfsäulen der Dieseltankstelle wurden die Schleppkurven für ein 3-achsiges 9,9 m langes Müllfahrzeug und einen 2-achsigen 12,0 m langen Linienbus untersucht. Alternativ wurde für die Busse auch ein Gelenkbus mit einer Länge von 18,0 m untersucht. Für 3-achsige 18 m lange Busse stehen keine programmierten Schleppkurven zur Verfügung. Generell ist demnach davon auszugehen, dass Busse >12 m (bis 18 m Länge) die bestehende Tankstelle erweitert um zwei neue Wasserstoff-Zapfsäulen nur von der Südseite der Zapfsäulen anfahren können. Aufgrund der nötigen Abstände der Zapfsäulen und zum Erhalt der Zufahrt durch Abfallsammelfahrzeuge und kleine LKW's auf der Nordseite der Tankstelle ist gegenüber der bestehenden Insel mit den Diesel-Zapfsäulen eine nach Süden gedrehte (abgeknickte) Anordnung der Wasserstoff-Zapfsäulen erforderlich. Dies behindert jedoch für die Busse ein paralleles Halten an der verlängerten Verkehrinsel zum Tanken auf der Südseite der Zapfsäulen (größerer Abstand Zapfsäule-Fahrzeug).

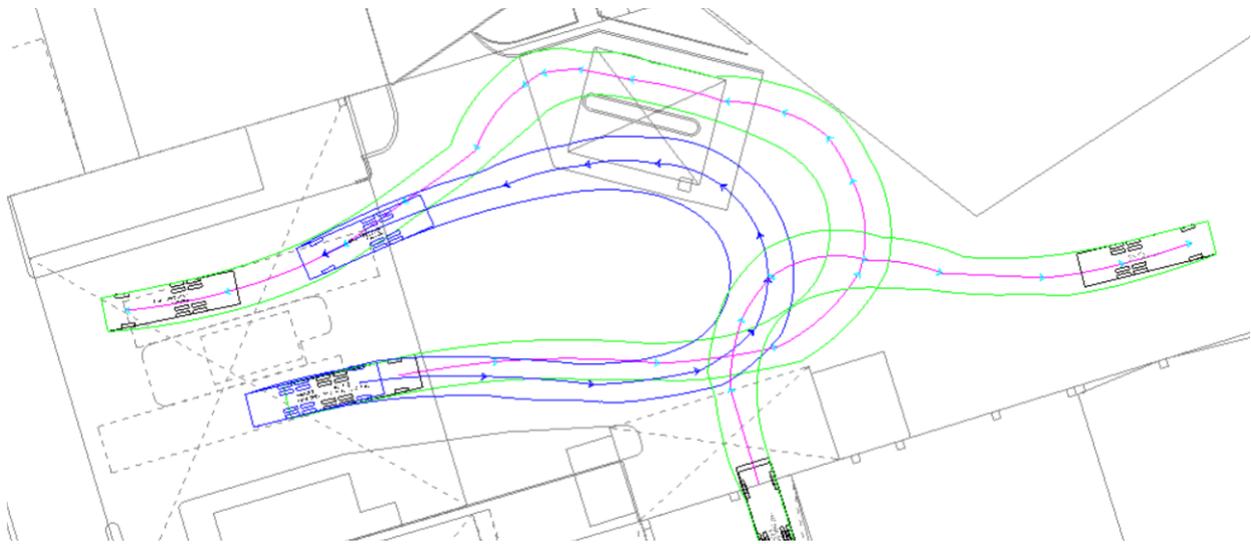


Abbildung 64: Schleppkurve Müllfahrzeug 9,9 m lang, 3-achsig

Sicherheitstechnische und baurechtliche Mindestabstände

Mindestabstände der Anlagenteile der H₂-Produktionsanlagen untereinander und zu bestehenden Gebäuden und Anlagen ergeben sich aus den Technischen Regeln für Betriebssicherheit und Gefahrstoffe (TRBS/TRGS) auf Grundlage der Betriebssicherheits-Verordnung (BetrSichV) bzw. der Gefahrstoff-Verordnung (GefStoffV), dem örtlichen Baurecht (Hessische Bauordnung HBO), der Muster-Industriebau-Richtlinie – MIndBauRL, den Anforderungen für die Feuerwehr und den einschlägigen Richtlinien des Arbeitsschutzes (siehe Rechtliche Analyse).

Maßgebendes Regelwerk für die Wasserstoff-Produktionsanlage (= Gasfüllanlage für Trailer) ist aus Sicht der Betriebssicherheit die Richtlinie TRBS 3151 (TRGS 751) „Vermeidung von Brand-, Explosions- und Druckgefährdungen an Tankstellen und Gasfüllanlagen zur Befüllung von Landfahrzeugen“, welche neben Schutz- und Sicherheitsabständen auch Explosionsschutz zonen definiert. Diese TRBS-Richtlinie ist neuer als das VdTÜV-Merkblatt 514 „Anforderungen an Wasserstofftankstellen“ und es ist davon auszugehen, dass letzteres durch die TRBS-Richtlinie ersetzt ist. Bei der bestehenden Diesel-Tankstelle und dem zugehörigen oberirdischen Diesel-Tank südlich des geplanten Standortes ist davon auszugehen, dass es sich hierbei um eine Lagerung und Abfüllung von „Betriebsstoffen“ (Diesel: entzündbare Flüssigkeit mit Flammpunkt >55°C) in räumlicher und betrieblicher Nähe zur Wasserstoff-Gasfüllanlage (mit Lagertanks) gemäß TRBS-3151 handelt. Aufgrund des geringen Gefährdungspotentials des Dieselmotorkraftstoffes geht jedoch von der Tankstelle gemäß TRBS 3151 keine Explosionsgefahr aus, welche besondere Explosionsschutzmaßnahmen erforderlich machen würde. Für ortsfeste und ortsbewegliche Druckbehälter gelten zudem generell auch TRBS 3145 und TRBS 3146.

Bei den sicherheitstechnischen Abständen ist zwischen Schutzabständen und Sicherheitsabständen zu unterscheiden:

- Schutzabstände: Abstände zum Schutz der H₂-Anlagenteile von umgebenden Brandlasten und mechanischen Einwirkungen (i.d.R. Anprall von Fahrzeugen), aber nach TRBS 3151 auch allgemein Abstände zu benachbarten Grundstücken und öffentlichen Verkehrsflächen.

- Sicherheitsabstände: Abstände von H₂-Anlagenteile zu Einrichtungen, Gebäude und Anlagen mit regelmäßigem Aufenthalt von betriebsfremden Personen.

Durch bauliche oder brandschutztechnische Maßnahmen können vorgegebene Schutz- oder Sicherheitsabstände auch reduziert werden. Dies ist für die Entwurfs- und Genehmigungsphase durch eine gutachterliche Gefährdungsbeurteilung zu analysieren.

Als relevante Brandlasten für den Ansatz von Schutzabständen im MHKW sind nach TRBS 3151 folgende zu berücksichtigen: Parkflächen für Fahrzeuge, Verkehrsflächen auf Betankungsanlage / Dieseltankstelle (auch für An- und Abfahrt zu betankender Fahrzeugen), Gebäude, gelagerte oder abgestellte brennbare Stoffe.

Zudem sind Mindestabstände zur Dieseltankstelle im Süden (Abstand zwischen Südwand des Salzlagers und der erhöhten Verkehrsfläche der Tankstelle beträgt mind. 8 m) und zum UW Heddernheim im Osten (Abstand zwischen Zaun des UW und Grenze des Standortes auf der gegenüberliegenden Straßenseite am Salzlager beträgt mind. 4,4 m, Abstand zu Transformatoren beträgt mind. 10 m) einzuhalten.

Dort wo die Mindestabstände (Schutz- und Sicherheitsabstände) nach TRBS 3151 aufgrund der beschränkten Platzverhältnisse am Standort trotz optimierter Platzierung der Anlagenteile zur Wasserstoffproduktion nicht eingehalten werden können, sind zusätzliche brandschutztechnische bzw. Sicherheitsmaßnahmen wie Brandschutzisolierungen bzw. -wände vorzusehen.

Aufstellungsplan

Im Rahmen der Aufstellungsplanung wurden verschiedene Varianten für die Aufstellung der Elektrolyse- und Trailerabfüllanlage am Standort A am MHKW untersucht (basierend auf Layoutskizzen):

1. Elektrolyseanlage im nördlichen Standortbereich, Trailerabfüllung im südlichen Standortbereich, Trailer rangieren rückwärts gerade
2. Elektrolyseanlage im nördlichen Standortbereich, Trailerabfüllung im südlichen Standortbereich, Trailer rangieren vorwärts gerade ein und aus (Überfahung Tankstellenbereich)
3. Elektrolyseanlage im südlichen Standortbereich, Trailerabfüllung im mittleren Standortbereich, Trailerladebuchten diagonal, Trailer rangieren rückwärts diagonal

In Absprache mit dem MHKW wurde die Variante 1 als bevorzugte Variante ausgewählt und die Aufstellungsplanung für diese Variante fortgeführt. Der vorläufige Aufstellungsplan ist in nachfolgender Abbildung dargestellt. In weiteren Planungsphasen ist die Aufstellung zu präzisieren und zu verfeinern.

4.3.4. Entwicklung Zentrale Wasserstoffspeicherung und –verteilung

4.3.4.1. Auslegung

Im Rahmen der Standortanalyse wurde der Standort Osthafen, Peter-Behrens-Straße, Frankfurt a.M. als bevorzugter Standort für den Distributionsstützpunkt identifiziert.

Der Distributionsstützpunkt soll als zentraler Speicher- und Verteilungsstandort für Wasserstoff im Rahmen des Projekts MH2Regio dienen. Der Distributionsstützpunkt bildet somit den zentralen Umschlagplatz für den am MHKW produzierten und in Trailer abgefüllten Wasserstoff und zum bedarfsgerechten Weitertransport an die im Stadtgebiet Frankfurt a.M. gelegenen potenziellen Wasserstoffabnehmer. Der Wasserstoff wird vom MHKW mittels LKW-Trailern angeliefert, am Distributionsstützpunkt zwischengelagert und mittels LKW-Trailer zu den Standorten der Wasserstoffabnehmer geliefert. Die Zwischenlagerung des Wasserstoffs erfolgt in den LKW-Trailern, welche am Distributionsstandort als Sattelzug abgesetzt und von LKW-Sattelzugmaschinen auf der Straße transportiert wurden. Es findet keine Umladung oder Nachverdichtung am Distributionsstützpunkt statt.

Die am Distributionsstützpunkt gelagerte Wasserstoffmenge wird wie im Fall der Wasserstofftankstellen in einen operativen und einen strategischen Speicher unterschieden. Der operative Speicher dient der Bedarfsdeckung der Wasserstofftankstellen im Normalbetrieb, während der strategische Speicher als Reserve zur Überbrückung kurzzeitiger Produktionsausfälle am MHKW vorgehalten wird.

Zur Erfüllung dieser Funktion verfügt der Distributionsstützpunkt über mehrere Trailer-Stellplätze sowie über Rangier- und Zufahrtsflächen für den LKW-Transport. Die Anzahl der erforderlichen Trailer-Stellplätze ist abhängig von der Wasserstoffnachfrage, deren Verteilung und somit von den definierten Szenarien. Für die Auslegung wurde das Ziel-Szenario 2a+ betrachtet, welches als technisch und wirtschaftlich optimales Szenario für das Grundmodell ausgewählt wurde.

Basierend auf dem Modellierungsergebnissen des ausgewählten Szenarios 2a+ sowie der ausgewählten Wasserstofftrailer wurden folgende Auslegungsparameter für den Distributionsstützpunkt berücksichtigt:

Tabelle 40: Auslegungsparameter Distributionsstützpunkt

Parameter	Wert
Anzahl Trailer-Stellplätze	8
Trailer Typ	20' MEGC-Trailer, Typ III / IV Zylinder
Betriebsdruck Trailer	500 bar(e)
Netto-Speicherkapazität je Trailer (T = 45 °C)	474 kg
Brutto-Speicherkapazität je Trailer (T = 45 °C)	502 kg

4.3.4.2. Aufstellungsentwurf

Das betrachtete Grundstück entspricht gemäß Planungsauskunftssystem des Stadtplanungsamts Frankfurt a.M. dem Flurstück mit der Bezeichnung Frankfurt Bez. 26 478, Flur 418, Flurstück-Nr. 42/4. Das Grundstück liegt im Industrie- und Gewerbegebiet des Osthafens, Frankfurt a.M., an der Peter-Behrens-Straße. Das Grundstück ist zum Zeitpunkt der Studiererstellung nicht bebaut.

Der Standort verfügt über eine Grundstücksfläche von ca. 1,88 ha. Die maximale Länge des Grundstücks (Nord-Süd Ausdehnung) beträgt ca. 177 m, die maximale Breite (Ost-West Ausdehnung) beträgt ca. 67 m.

Anmerkung:

Die angegebenen Maße sind ungefähre Ablesewerte.

Die benachbarte Bebauung umfasst eine Gewerbehalle der Fa. Lufthansa Technik AG an der nördlichen Grundstücksgrenze sowie eine Gewerbehalle unbekannter Nutzung an der südlichen Grundstücksgrenze. An der westlichen Grundstückseite wird das Grundstück durch die Peter-Behrens-Straße begrenzt, welche parallel zum Grundstück verläuft. An der östlichen Grundstückseite wird das Grundstück durch Schienentrassen (eingleisig) der Hafenbahn begrenzt, welche außer Betrieb ist. Weiter angrenzend an die Schienentrassen in Richtung Osten befindet sich die Hafenkante zum Kai des Osthafens, mit Zugang zum Main. Ein direkter Zugang zum Hafen ist somit nicht unmittelbar gegeben. Der Zugang zur Hafenkante muss bei beabsichtigter Nutzung des Wasserweges, bspw. für den Wasserstoff-Transport auf Binnenschiffen oder die Betankung von Binnenfahrpasschiffen, gesondert geprüft werden.

Die Zufahrt zum Grundstück erfolgt über die Peter-Behrens-Straße. Die vorgelagerte Zufahrt bildet die Hanner Landstraße, über welche ein Anschluss an die Bundesstraße B3 und Autobahn A661 möglich ist.

Für die Aufstellungsplanung wurde eine Nutzung des südlichen Grundstücksbereichs vorgesehen. Die Trailer-Stellplätze wurden in Reihe angeordnet und sind unter Berücksichtigung von Sicherheitsabständen sowie Rangierflächen in Abbildung 66 dargestellt. Die benötigte Grundstücksfläche beträgt 3.927 m² (77 x 51 m), wovon eine Fläche von 50 x 50 m als Rangierfläche für die LKW-Sattelzüge erforderlich wird. Für Ein- und Ausfahrt sind zwei separate Tore vorzusehen. Die Sicherheitsabstände zur umgebenden Bebauung sowie zu öffentlichen Verkehrswegen (Peter-Behrens-Straße) wurden berücksichtigt. Die vom Distributionsstützpunkt in Anspruch genommene Fläche beträgt ca. 21 % der gesamten Grundstücksfläche. Erweiterungsflächen zum Ausbau sind bei der vorgeschlagenen Aufstellungsplanung möglich.

Anmerkung:

Die in Abbildung 66 dargestellten Schleppkurven entsprechen Sattelzügen der Größenordnung 40' (Bemessungsfahrzeug 5, FGSV 2001) mit einer Länge von 13,61 m (ohne Zugmaschine).

Ergänzend zu den Trailer-Stellflächen wurde zusätzlich im nördlichen Grundstücksbereich der Flächenbedarf für die standardisierte Wasserstofftankstelle aus Abschnitt 4.3.1 dargestellt. Die dargestellten Maße enthalten die gesamte Anlagenfläche inklusive Fahrwege für Ein- und Ausfahrt.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der betrachtete Standort über ausreichende Flächen zur Planung eines Distributionsstützpunktes sowie einer Wasserstofftankstelle bietet. Darüber hinaus sind Erweiterungsflächen gegeben. Eine kombinierte Nutzung mit weiteren Infrastruktureinrichtungen, z.B. einer Wasserstofftankstelle zur Betankung von Binnenschiffen ist separat zu prüfen grundsätzlich aber denkbar.

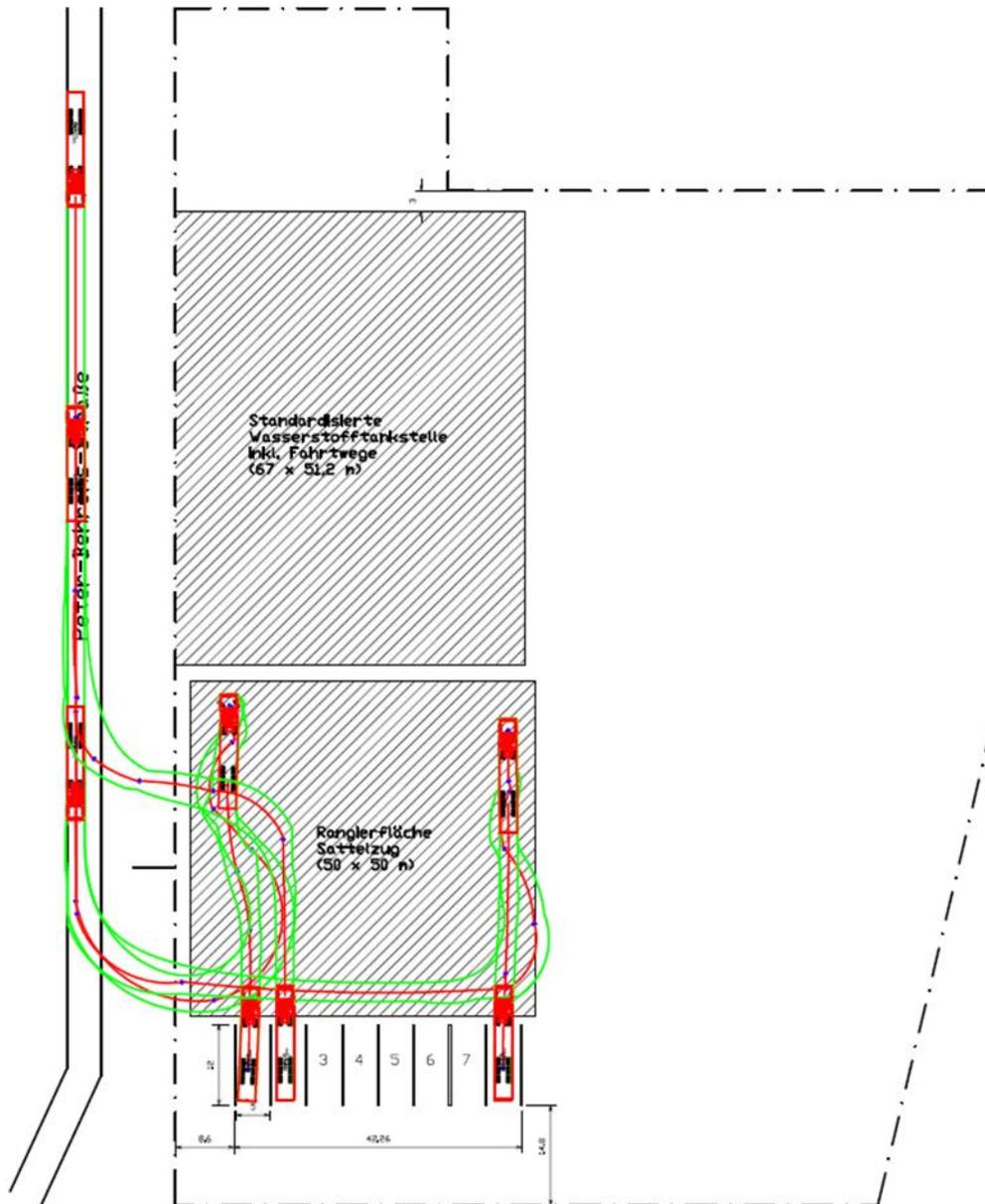


Abbildung 66: Aufstellungsplan Distributionsstützpunkt

4.3.4.3. Automatisierungskonzept zur bedarfsorientierten Distributionssteuerung

Das Automatisierungskonzept wurde auf Basis von zwei wesentlichen Schritten konzipiert:

- 1) Entwurf einer konzeptionellen Gesamtsystemarchitektur unter Berücksichtigung der verschiedenen Prozesse und Vorgänge und der für sie verantwortlichen Akteure
- 2) Definition von Anforderungen (Anforderungsmatrix) und Zuordnung der Anforderung im entsprechenden System

Als Ergebnis wurde die Anzahl der erforderlichen Systeme definiert und deren jeweilige Anforderungen beschrieben.

Konzeptionelle Gesamtsystemarchitektur

Die konzeptionelle Gesamtsystemarchitektur wurde unter Berücksichtigung folgender Kriterien entworfen:

- 1) Das bestehende Leitsystem des MHKW wurde von der Fa. Mitsubishi hergestellt. Das Leitsystem für die Wasserstoffproduktionsanlage soll an das bestehende MHKW Leitsystem angebunden werden. Hier ist besonders mit Hinblick auf die Datenübertragung auf eine standardisierte Schnittstelle zu achten.
- 2) Die Anlage muss über einen Fernzugriff zur Steuerung und Anzeige des Systems verfügen, ohne dass kritische Zustände durch das Bedienpersonal erzeugt werden können. Betriebsparameter müssen, soweit sie zur verfahrenstechnischen Steuerung gehören, in das bedarfsorientierte Leitsystem integrierbar sein. (BSI – Konformität)
- 3) Das Leitsystem zur bedarfsorientierten Steuerung von Wasserstoffproduktion und -verteilung soll über folgende Systemelemente verfügen:
 - a) Lokale Wasserstoffproduktion und Trailerabfüllung (Produktion) am MHKW,
 - b) Zentrale Wasserstoffspeicherung am Distributionsstützpunkt (zentrale Speicherung),
 - c) Dezentrale Wasserstoffspeicherung an den Wasserstofftankstellen (lokale Speicherung),
 - d) Überwachung der bedarfsorientierten Distribution der Wasserstoff-Trailer zwischen MHKW, Distributionsstützpunkt und Wasserstofftankstellen (Verteilung).

Das Steuerungssystem für die Verteilung und lokale Speicherung ist unabhängig vom Leitsystem der Wasserstoffproduktion, jedoch tauschen die Systeme Informationen aus, die für ihre Koordination erforderlich sind. Es wird davon ausgegangen, dass dieses System von einem Distributor betrieben und verwaltet wird.

- 4) Das Gesamtsystem soll über eine Funktionalität zur kommerziellen Verwaltung des Wasserstoffvertriebs, der Kapazitätsbuchung, sowie der Verteilung und Abrechnung (Software zur Abwicklung der Geschäftsprozesse) verfügen. Dieses System soll ebenfalls von einem Distributor verwaltet werden, jedoch mit Zugriffsmöglichkeit für externe Partnerunternehmen oder Kunden (Wasserstoff-Abnehmer).

Die konzeptionelle Gesamtsystemarchitektur ist in folgender Abbildung dargestellt:

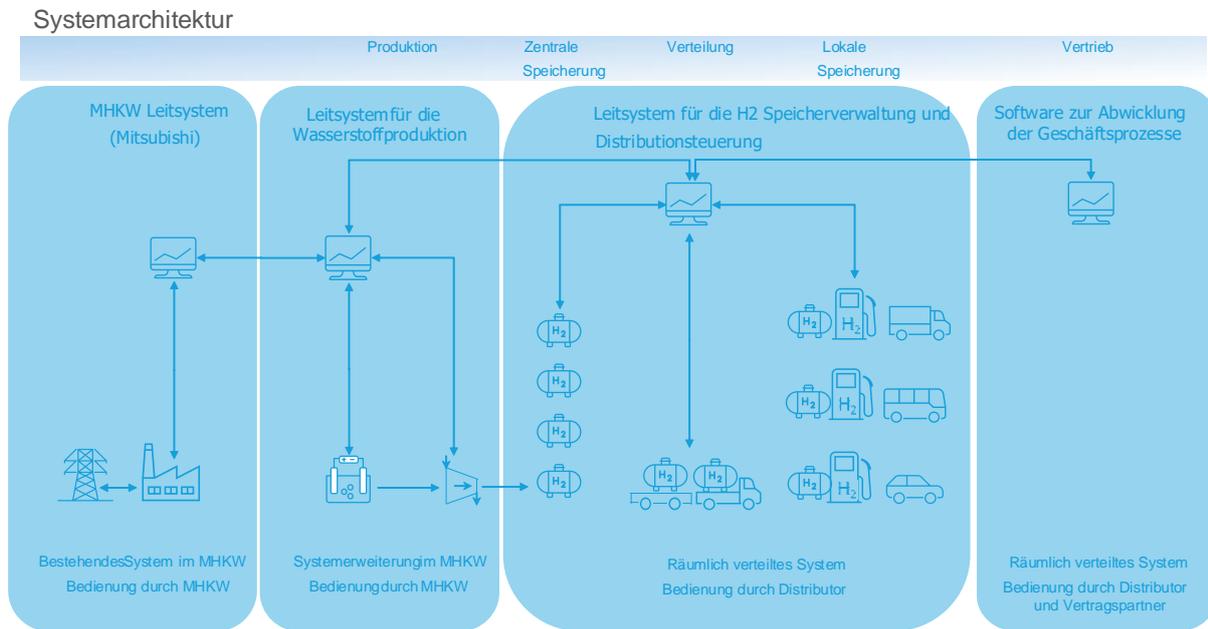


Abbildung 67: Übersichtsschema der konzeptionellen Gesamtsystemarchitektur

Automatisierungskonzept – Leitsystem Wasserstoffproduktion

Die verfahrenstechnischen Anforderungen, die Benutzeranforderungen und die Systemanforderungen des Leitsystems für die Wasserstoffproduktion werden beschrieben und die Architektur des Leitsystems wird aufgezeigt und beschrieben.

Zentrale Verbindung zwischen der Wasserstoffherzeugung, Verdichtung, Speicherung und Verteilung auf dem MHKW Gelände ist das Leitsystem der Wasserstoffproduktionsanlage. Alle Signale aus anderen Anlagenteilen, wie Verdichtung oder Speicherung werden über diese Schnittstelle an das MHKW Leitsystem durchgeleitet.

Das Leitsystem für die Wasserstoffproduktion wird zunächst als Black Box mit eigenem Bedienplatz in der Leitwarte installiert. Für die Verriegelungen und Austausch von Steuerungsbefehlen mit dem MHKW-Leitsystem werden festverdrahtete Signale verwendet. Eine Industrial Ethernet (oder OPC) Verbindung soll für den Informationsaustausch und die Synchronisierung mit dem Leitsystem des MHKWs verwendet werden. Eine Integration ist möglich während des nächsten Gesamtanlagenstillstands im Jahr 2024. Bei der Integration werden alle Grafiken und Informationen des Leitsystems für die Wasserstoffproduktion in das Leitsystem des MHKW-Leitsystems eingefügt und werden dann in den Bedienstationen des MHKW verfügbar sein.

Für die Verriegelungen und Austausch von Steuerungsbefehlen mit dem Leitsystem für die Wasserstoff-Speicherverwaltung und Distributionssteuerung werden festverdrahtete Signale verwendet. Eine zusätzliche OPC-Verbindung soll für den Informationsaustausch mit dem Leitsystem für die Wasserstoff-Speicherverwaltung und Distributionssteuerung verwendet werden.

Der Aufbau eines modernen Prozessleitsystems ist weitgehend herstellerunabhängig und standardisiert. Die Automatisierungssysteme sind gemäß der prinzipiellen Gliederung in Leit-, Automatisierungs- und Feldebene strukturiert.

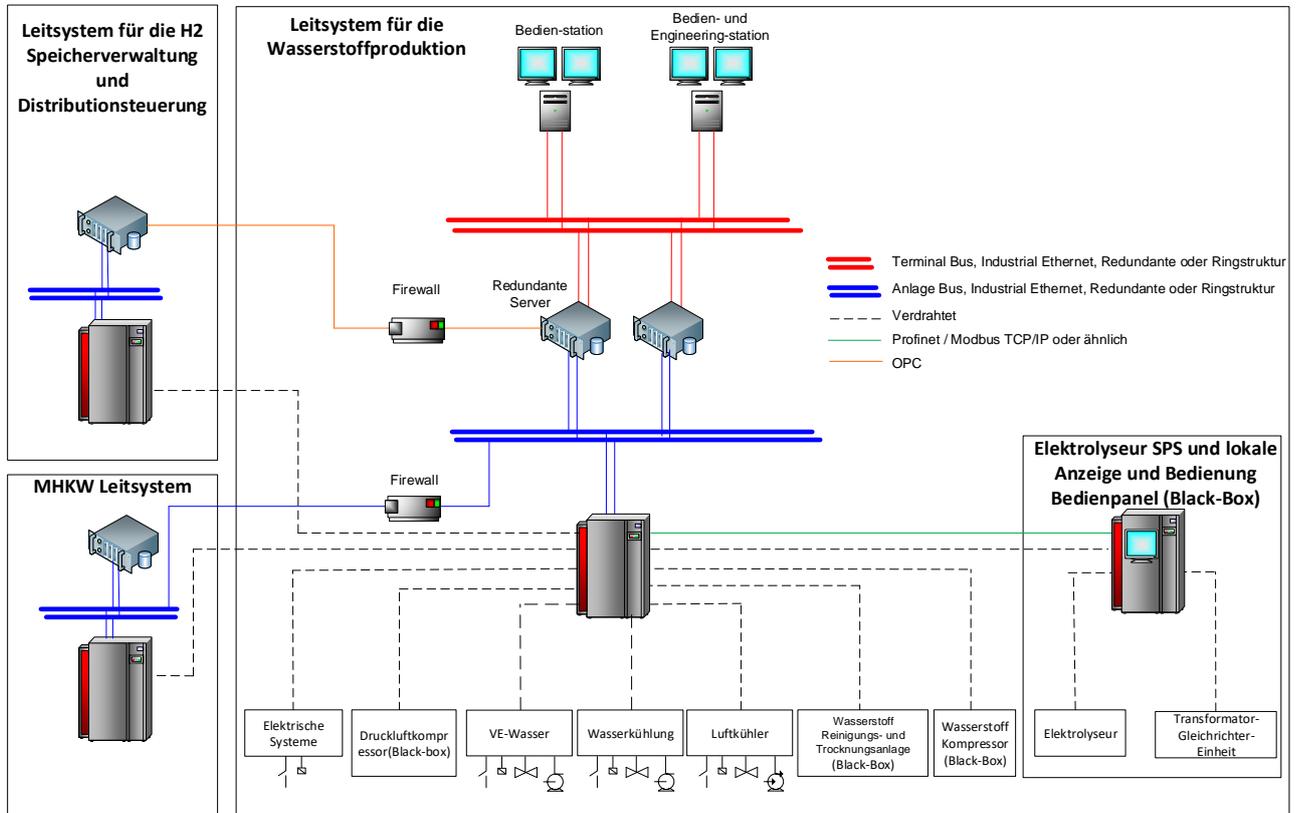


Abbildung 68: Architektur des Leitsystems für die Wasserstoffproduktionsanlage

Automatisierungskonzept – Leitsystem H₂ Speicherverwaltung und Distributionssteuerung

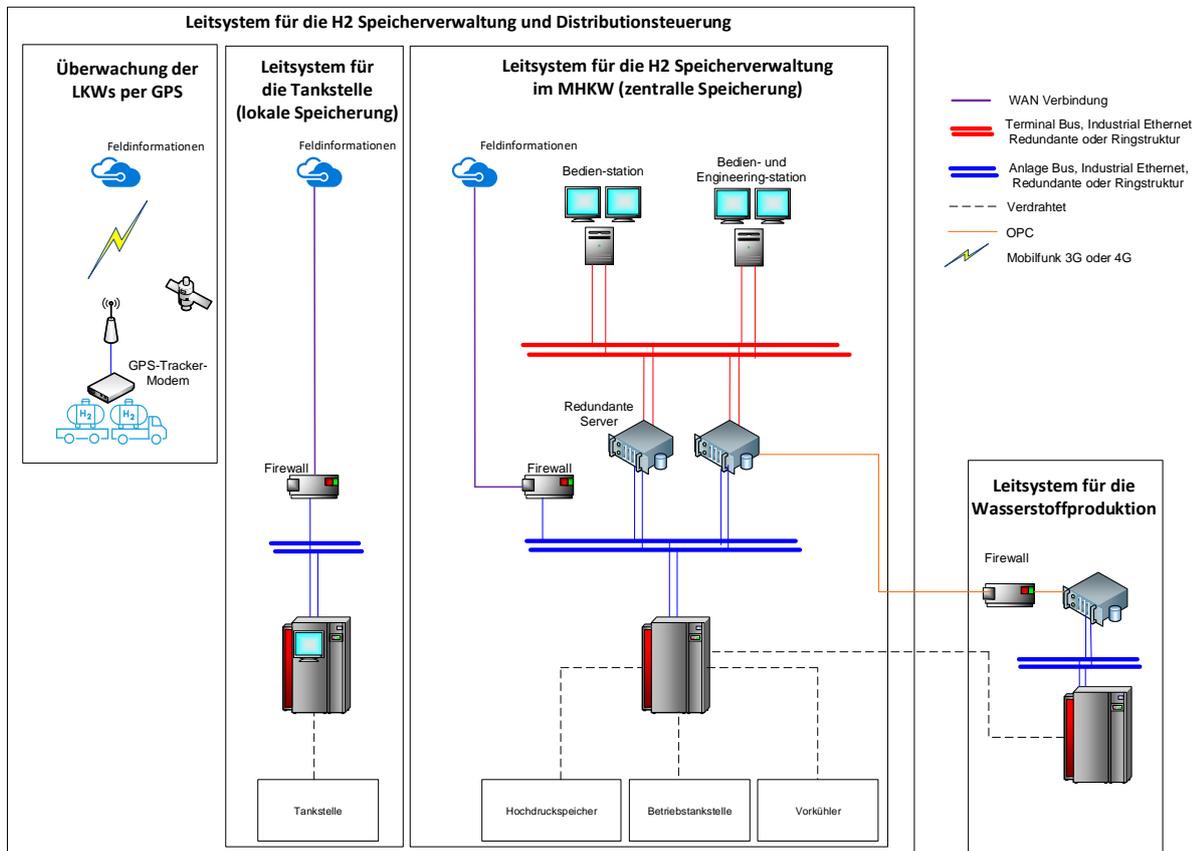


Abbildung 69: Architektur des Leitsystems für die H₂-Speicherverwaltung und Distributionssteuerung

Automatisierungskonzept – Software zur Abwicklung der Geschäftsprozesse

Die Software wird Cloud-basiert sein. Für das Hosting der Datenbank und der benötigten Dienste kann eine Cloud-Plattform wie Microsoft Azure, Amazon Web Services, IBM Cloud oder ähnliches verwendet werden.

Die Software wird folgende Funktionalitäten haben:

- Kommunikation mit dem Leitsystem für die Wasserstoff-Speicherverwaltung und Distributionssteuerung und Erfassung von Informationen über die verfügbaren Wasserstoffkapazitäten,
- Annahme von Anfragen von Kunden für den Versand von Wasserstoff-Trailern,
- Terminplanung und Erteilung des Wasserstoffversandauftrags,
- Wasserstoff Zertifizierung,
- Vertragsverwaltung,
- Abrechnung.

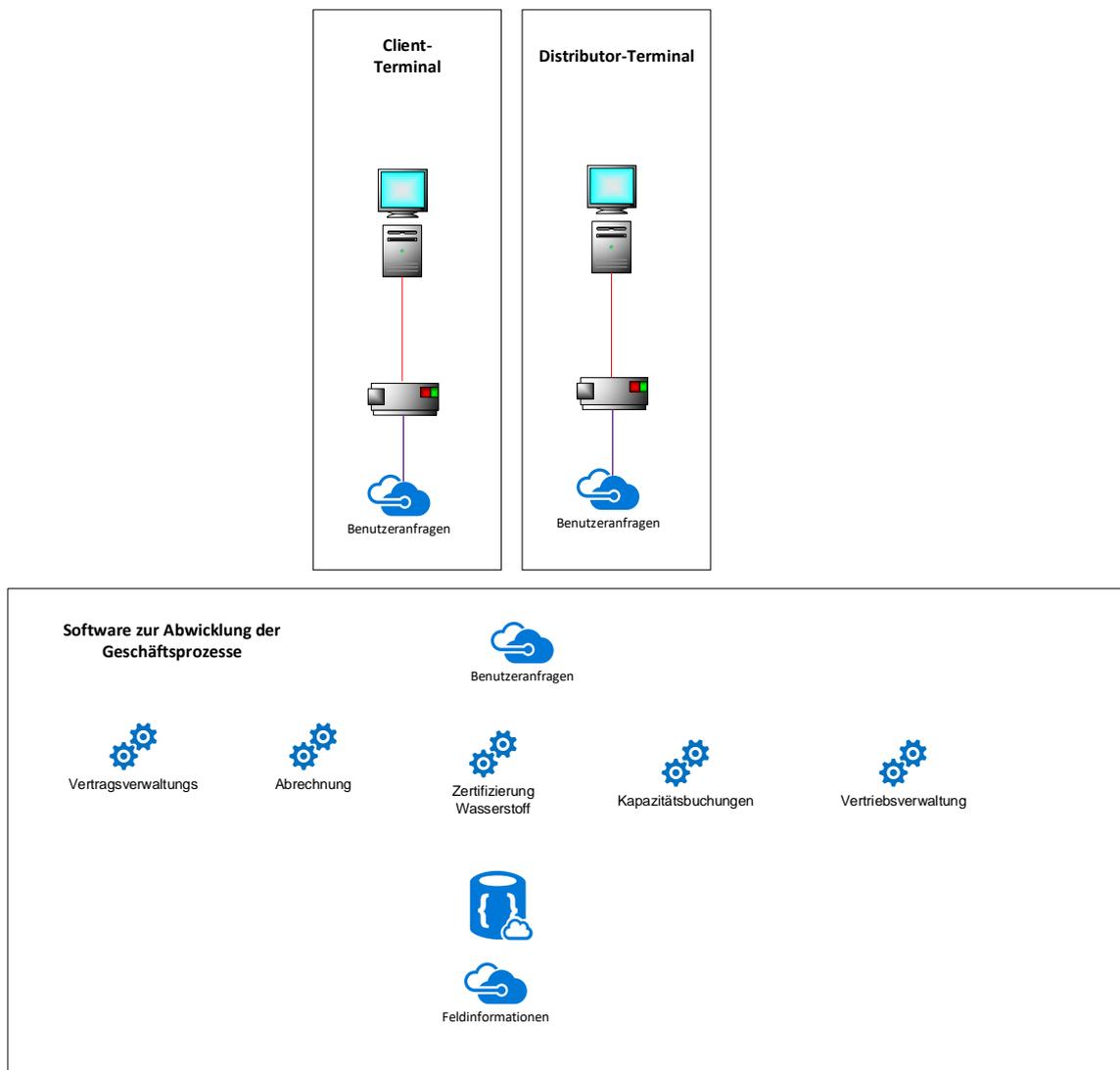


Abbildung 70: Architektur der Software zur Abwicklung der Geschäftsprozesse

Das System wird von einem Distributor verwaltet. Die Software wird dem Distributor und den Kunden auf handelsüblichen Bürocomputern zur Verfügung stehen.

Zur Erstellung eines Überblicks geeigneter und verfügbarer Softwarelösungen für das Automatisierungskonzept wurde eine Marktabfrage durchgeführt. Es wurden vier international tätige Unternehmen identifiziert, welche im Rahmen der Marktabfrage zur Angabe von Spezifikationen aufgefordert wurden. Von drei Unternehmen wurde eine Rückmeldung erhalten.

Die Ergebnisse der Marktabfrage lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Am Markt sind Produkte für die Leitsysteme für die Wasserstoffproduktion und für die H₂ Speicher- und Distributionsteuerung verfügbar. Die von den Herstellern vorgeschlagenen Lösungen basieren auf bereits entwickelten Plattformen und Produkten. Dies hat den Vorteil kurzer Implementierungszeiträume, vorhandener Erfahrung im Engineering und der Fehlersuche des Systems sowie überschaubarer Kosten.

- In Bezug auf die Softwarelösung für die Geschäftsprozesse konnte ein Hersteller ein bereits entwickeltes Produkt vorschlagen. Auf Vorschlag des Herstellers ist das System an die tatsächlichen Projektanforderungen anpassbar. Die Ausnahme ist, dass das System keine Abrechnung unterstützt, diese Funktionalität jedoch über ein unabhängiges Abrechnungssystem implementiert werden kann.
- Die von Herstellern angebotenen Gesamtsystemlösungen, sofern vorhanden, verfügen über eine erweiterte Funktionalität, die über die Anforderungen des Automatisierungskonzepts im vorliegenden Projekt hinausgeht. Zu nennen sei bspw. die Funktionalität des Energiemanagements und der optimierten Anlagensteuerung.

4.4. Sauerstoffnutzung

Im Projekt MH2Regio wurde mit diesem Abschnitt untersucht, inwieweit eine prozesstechnische Integration zwischen dem bestehenden Müllheizkraftwerk (MHKW) Nordweststadt und der geplanten Elektrolyseanlage möglich und sinnvoll sein könnte, um den als Nebenprodukt der Elektrolyse erzeugten Sauerstoff zu nutzen.

4.4.1. Methodik

Um zu untersuchen, ob und inwieweit ein produzierter Sauerstoffstrom aus der Elektrolyseanlage dem MHKW auf der Verbrennungsseite zugeführt werden könnte, wurde mit der von Tractebel Engineering (TEG) genutzten kommerziellen Software der Firma Thermoflow, Inc. ein thermodynamisches Modell des MHKW, und für diesen Fall speziell der Feuerung, nachgebildet.

Grundlage dieses Modells sind die vom MHKW zur Verfügung gestellten Daten, wie Bildschirmausdrucke aus dem Leitsystem, Übersichtszeichnungen, Anlagenschnittpläne, Feuerungsleistungsdiagramme und Prozessbeschreibungen, die auch teilweise auf der Internetpräsenz des MHKW veröffentlicht sind.

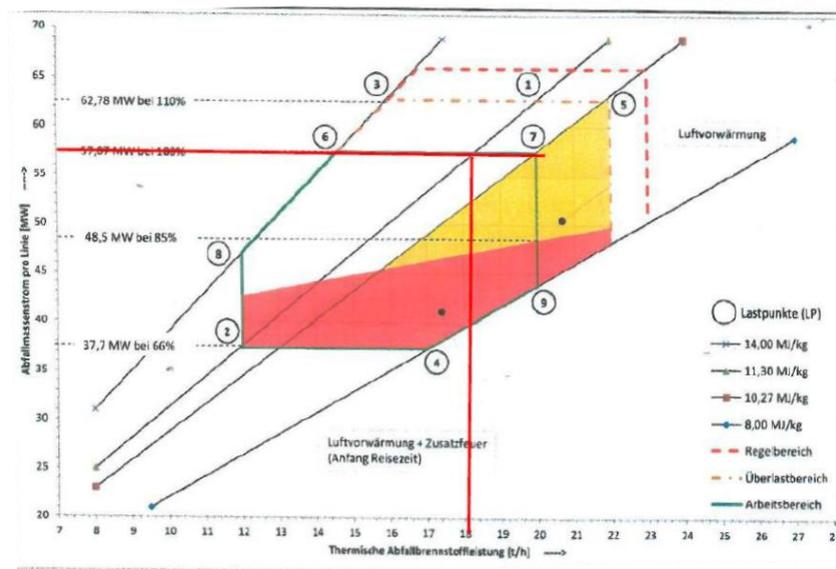


Abbildung 71: Feuerungsleistungsdiagramm des MHKW Nordweststadt

4.4.2. Berechnungsmodell

In einem ersten Schritt wurde ein Anlagen- und Feuerungsmodell erstellt, das die Berechnung der gesuchten Energie- und Massenbilanzen für den Einsatz des Brennstoffs (Müll) abbilden kann. Ziel war es, die für die Verbrennung der im nachzubildenden Fall benötigten Stoffströme zu ermitteln. Für die Modellierung wurde die Software Steam-Pro von der Softwarefirma Thermoflow, Inc. verwendet. Mit Steam-Pro wird üblicherweise ein Design der zu untersuchenden Anlage, in diesem Fall des Müllverbrennungskessels, entworfen.

Mit der softwareeigenen Datenbank für Brennstoffe wurde eine Brennstoffanalyse passend zu der vom MHKW bereitgestellten Heizwertangabe ausgewählt, angepasst und als Inputenergieträger verwendet.

Eine genaue Brennstoffanalyse des MHKW's lag nicht vor. Daher ist die u.g. Brennstoffanalyse mit vergleichbarem Heizwert zugrunde gelegt worden. Die leichte Abweichung des Heizwertes wird in dieser Betrachtung als nicht ausschlaggebend angesehen.

Tabelle 41: Genutzte Brennstoffanalyse

Festbrennstoff	Wert	Einheit
Brennstoffname: FFM Heddernheim		
Brennstofftyp: Abfälle--MSW		
Brennstoffzufuhr-Temperatur	10	° C
Gesamt Heizwert (untere) + Wärme @ 10 °C	8.277	kJ/kg
Gesamt Brennstoffenthalpie bezogen auf 0° C	9.630	kJ/kg
Heizwerte (@ 25C)		
Untere Heizwert (Feuchtigkeit und Asche beinhaltet)	8.306	kJ/kg
Obere Heizwert (Feuchtigkeit und Asche beinhaltet)	9.593	kJ/kg
Elementaranalyse (Gewicht %)		
Feuchtigkeit	25	%
Asche	27	%
Carbon	22.5	%
Wasserstoff	3.1	%
Stickstoff	0.3	%
Chlor	0.4	%
Schwefel	0.2	%
Sauerstoff	21.5	%
Gesamt	100	%
Unmittelbare Analysis (Gewicht %)		
Feuchtigkeit	25	%
Asche	27	%
Flüchtige Bestandteile	25	%
Fester Kohlenstoff	23	%
Gesamt	100	%

Es wurde für die Modellbildung ein Brennstoffmassenstrom von 18,25 t/h mit einem Heizwert (Hu) von 8.306 kJ/kg zugrunde gelegt.

Abgebildet im Modell wurde eine Rostfeuerung mit einem Kessel mit primärer und sekundärer Verbrennungsluftzuführung. Die Kesselanlage ist ein Mehrzugkessel mit Economiser-, Verdampfer- und Überhitzer-Heizflächen zur Bereitstellung von Frischdampf mit 60 bar und 500 °C. Mit dem oben genannten Brennstoffmassenstrom berechnet das Modell eine Frischdampfmenge des Kessels von rund 57 t/h. Das Speisewasser wird dem Kessel im Modell mit rund 140 °C zugeführt.

Die zur Verbrennung benötigte Primärluftmenge wird mit 80,44 t/h (rd. 62.000 Nm³/h) und die Sekundärluftmenge mit 13,1 t/h (rd. 10131 Nm³/h) modelliert, sodass sich bei der gegebenen Brennstoffmenge und -analyse ein Luftüberschuss in der Verbrennung in Höhe von 45 % ergibt. Beide Luftmengen werden mit 22 °C angenommen (dies ist ein energetisch gemittelter Wert aus 10 °C für die Primär- und 38 °C für die Sekundärluft), da das Modell hier keine unterschiedlichen Ausgangstemperaturen für die Luftströme vorsieht. Beide Luftströme werden vor der Zugabe in die Verbrennung über Dampf-Luft-Vorwärmer vorgewärmt. Die Primärluft erreicht hierbei 99 °C und die Sekundärluft 122 °C.

Der in der Verbrennung entstehende Rauchgasstrom verlässt den Kessel hinter dem Economiser bei 235°C mit einem Massenstrom von 110,7 t/h (rund 87.759 Nm³/h) und einer Sauerstoffkonzentration (feuchtes Rauchgas) von 6,9 vol.-%.

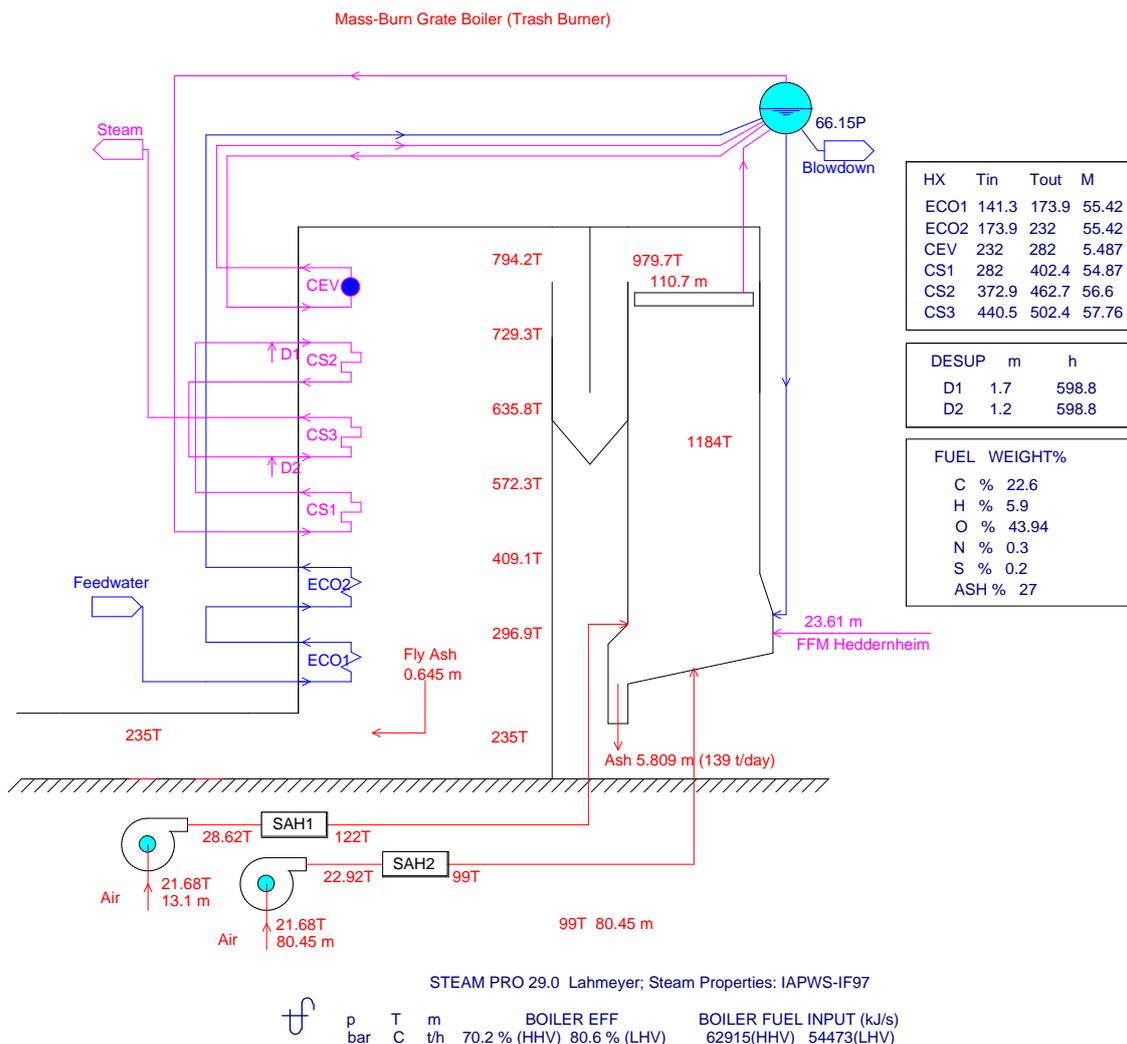
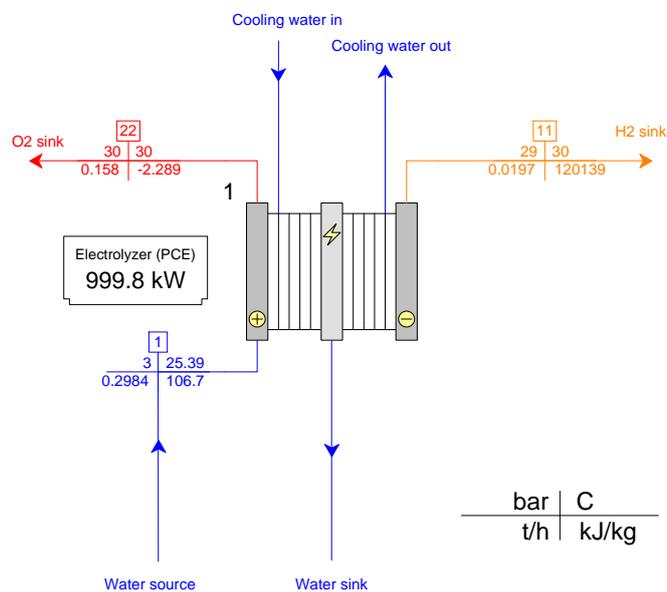


Abbildung 72: Prinzipskizze MHKW Feuerung – Detail Kessel

4.4.3. Sauerstoffverhältnis

Durch die Summierung von Primär- und Sekundärluft ergab sich eine Gesamtluftmenge von rd. 93,55 t/h. Nimmt man nun vereinfacht an, dass diese Frischluft nur aus den Anteilen Sauerstoff (O₂) und Stickstoff (N₂) besteht, mit einem hier zugrunde gelegten Massenverhältnis von 23,3 gew.-% O₂ zu 76,7 gew.-% N₂, dann ergeben sich rd. 21,79 t/h O₂ und 71,75 t/h N₂ für die Frischluftanteile im vorliegenden Modellierungsfall.

Mit einem weiteren Softwaremodul der Firma Thermoflow, Inc., Thermoflex, wurde schon mehrmals Wasserstoff-Produktionsanlagen simuliert. Eine der erstellten Simulationen modelliert eine Elektrolyseanlage mit einer elektrischen Eingangsleistung von einem 1 MW. Aus der Modellierung wird ersichtlich, dass bei dieser Elektrolyse-Größe ein Sauerstoffmassenstrom von rund 0,158 t/h O₂ produziert wird.



THERMOFLEX Version 29.0 Lahmeyer Tractebel Engineering GmbH

Abbildung 73: Prinzipskizze - 1 MW Elektrolysesystem

Legt man nun eine Elektrolyseanlage von rund 5 MW Leistung zugrunde, welche im Rahmen des Projekts MH2Regio als obere Leistungsgrenze betrachtet wird, erhält man mit einem linearen Ansatz einen Massenstrom in Höhe von $5 \times 0,158 \text{ t/h} = 0,79 \text{ t/h O}_2$ aus der Wasserstoffproduktion.

Setzt man nun den Sauerstoffbedarf einer Feuerung des MHKW's mit rund 21,79 t/h O₂ in Beziehung zu dem durch die Elektrolyse zur Verfügung stellbaren Sauerstoffmassenstrom von 0,79 t/h, dann erhält man ein Verhältnis von circa 3,5 Anteilen des vom Elektrolyseur erzeugten Sauerstoffs zu 96,5 Anteilen noch zusätzlich benötigtem Sauerstoff.

Die damit durch die zusätzliche Sauerstoffeindüsung zu erwartende Verringerung der notwendigen Luftzufuhr für die Verbrennung wird als relativ gering eingeschätzt und liegt innerhalb der Schwankungsbreite, die beim Sauerstoffüberschuss durch die Variation des Müll-Heizwerts zu erwarten ist (laut Angaben des MHKW liegt der Heizwert zwischen 8 und 14 MJ/kg und dessen Schwankungen sind damit im Verhältnis wesentlich größer).

4.4.4. Optionen zur Sauerstoffnutzung

Der in der Elektrolyseanlage erzeugte Sauerstoff könnte in der Müllverbrennung oder in der anschließenden Rauchgasreinigung zur Effizienzsteigerung eingesetzt werden.

Um die Integrität der vorhandenen MHKW-Anlagentechnik so weit wie möglich beizubehalten, sollte die Zuführung des Sauerstoffs nur über die Frischluftkanäle stattfinden. Hierbei kann der Sauerstoff über Zuführungsleitungen in den Eintritt der Frischluftkanäle in räumlicher Nähe zum Kessel erfolgen.

Für eine Nutzung in der Rauchgasreinigung sollte die Zuführung über entsprechende Gasleitungen direkt in den Sekundärluftkanal, einige Meter vor der Harnstoffeindüsung erfolgen. Ein entsprechendes Verteilungssystem aus Rohrleitungen und Düsen sollte installiert werden, um eine homogene Verteilung innerhalb des Rauchgaskanals zu gewährleisten.

In den folgenden Abschnitten wurde verschiedene grundsätzliche Einsatzmöglichkeit der Sauerstoffnutzung im MHKW beschrieben.

4.4.4.1. Sauerstoffnutzung zur Verringerung des Energieverbrauchs beim Anfahren

Es besteht die Möglichkeit den erzeugten Sauerstoff beim Anfahren einer Linie des MHKW zu nutzen, um den Kessel schneller auf die erforderliche Temperatur von 850°C aufzuheizen und damit einen Teil des Erdgases einzusparen, welches im Anfahrprozess zugefeuert wird.

Je nach Größenordnung der dafür benötigten Sauerstoffmengen könnte auch eine Zwischenspeicherung des Sauerstoffs sinnvoll sein. In weitergehenden Untersuchungen wären auch hier die zusätzlichen Installationskosten für die Sauerstoffzuführung und -speicherung den potenziellen Einsparungen an Erdgaskosten gegenüberzustellen.

4.4.4.2. Sauerstoffnutzung in der Rauchgasreinigung

Eine weitere Nutzung des in den Elektrolyseuren produzierten Sauerstoffs könnte neben der Verbrennung in der Feuerung auch die Nutzung in den Prozessen einer Rauchgasreinigung sein. Die Rauchgasreinigung im MHKW erfolgt über die zwei wesentlichen Verfahrensstufen:

- nicht-katalytische Entstickung und
- Trockenadsorption mit Abscheidung der Feststoffe (inklusive des Adsorbens) im Schlauchfilter.

Die Entstickung verwendet Harnstoff ($(\text{NH}_2)_2\text{CO}$) als Reagenz, welches mit den Stickoxiden zu gasförmigem Stickstoff (N_2), Wasser (H_2O), und Kohlendioxid (CO_2) reagiert. Bei den hohen Verbrennungstemperaturen liegen die erzeugten Stickoxide in Rauchgas zum größten Teil als Stickstoffmonoxid (NO) vor.

Daran ist Sauerstoff zwar beteiligt, aber nur in relativ geringem Maße, da die Reaktanden den benötigten Sauerstoff zur Hälfte bereits enthalten. Bei Stickoxid, welches als NO_2 vorliegt wird bei der Umsetzung mit Harnstoff noch weniger zusätzlichen Sauerstoffs benötigt.

Da der erhöhte Sauerstoffgehalt in der Verbrennungsluft hauptsächlich durch den Verbrennungsprozess selbst gebunden wird, wird der Sauerstoffgehalt im Abgas nur geringfügig erhöht. Daher ist davon auszugehen, dass ein höherer Sauerstoffgehalt in der Verbrennungsluft keinen nennenswerten Einfluss auf die Effizienz der Entstickung hätte. Wenn allerdings der Sauerstoff direkt vor der Entstickung in den Rauchgaskanal eingedüst werden würde, könnte sich die Effizienz der Entstickung dadurch etwas verbessern.

In der Trockenadsorption werden außer Flugasche hauptsächlich Schwefeldioxid (SO_2) und das nur in geringen Anteilen vorhandene Schwefeltrioxid (SO_3) gebunden und aus dem Rauchgasstrom entfernt, welches mit dem Adsorbens Calciumhydroxid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) zu Sulfitsalz (CaSO_3) bzw. Gips (CaSO_4) reagiert. Da auch hier die Reaktanden bereits viel Sauerstoff enthalten, läge der potenzielle Effekt einer höheren Sauerstoffkonzentration im Abgas hauptsächlich in einer verbesserten Oxidation von Sulfit zu Sulfat (exotherme Reaktion und in diesem Fall nicht gewünscht).

In einer Nassentschwefelungsanlage mit Gips als Hauptprodukt könnte ein höherer Sauerstoffanteil im Rauchgas von Vorteil sein, welcher das Sulfit schneller/effizienter zu Sulfat (Gips) oxidieren und evtl. die Gipsqualität verbessern würde. Dies ist aber im vorhandenen Trockenadsorptionsverfahren nicht von Nutzen, bzw. nicht relevant, da das verbrauchte, ausgeschleuste Adsorbens ohnehin entsorgt werden muss, wobei dessen Sulfit- und Sulfatanteil unkritisch ist, aufgrund der Einbindung und Abscheidung von weiteren Schadstoffen.

4.4.4.3. Sauerstoffnutzung zur Verringerung des Wasseranteils im Brennstoff

Eine durch die Sauerstoffzugabe erhöhte Brennraumtemperatur könnte (theoretisch) genutzt werden, um einen feuchteren Brennstoff zu verbrennen. Hier kommt es aber sehr stark auf den möglichen Zugabepunkt bzw. auf die Wechselwirkung zwischen der Feuerraumtemperatur und der Brennstoffschüttung auf dem Rost an, welche durch diese Temperaturen stärker getrocknet bzw. aufgeheizt werden soll.

Würde man zu dem Ergebnis kommen, dass bei diesen Überlegungen tatsächlich ein feuchterer Brennstoff eingesetzt werden kann, dann stünde theoretisch die Möglichkeit offen, flüssige Abwässer, bzw. spezielle Abwasserfraktionen, nicht mehr über die Abwasseraufbereitung, sondern über die Feuerung und den Rauchgasweg zu entsorgen, um somit zu einem abwasserfreien bzw. -reduzierten Prozess zu kommen.

4.4.4.4. Notwendigkeit einer Pufferung des erzeugten Sauerstoffs vor dessen Nutzung im MHKW

Bei Elektrolyseanlagen, die direkt an erneuerbare Energiequellen wie Windkraftanlagen oder Solaranlagen angebunden werden sollen (ohne Pufferung über das Stromnetz), wäre es sinnvoll, den erzeugten Sauerstoff vor einer Nutzung im kontinuierlichen Verbrennungsprozess des MHKW in einem Drucktank zwischenspeichern.

Dies ist im vorliegenden Fall allerdings nicht der Fall, da für die geplante Anlage eine kontinuierliche und konstante Stromversorgung aus der Eigenbedarfsschiene des MHKW zur Verfügung steht und genutzt werden soll. Dies ermöglicht eine konstante Produktionsrate von Wasserstoff und Sauerstoff, wobei Schwankungen beim Wasserstoffbedarf durch entsprechende Speicherung in Drucktanks abgepuffert werden.

Somit wird die Elektrolyseanlage im Normalbetrieb mit konstanter Last gefahren, so dass auch die Sauerstoff-Produktionsrate, über die meiste Zeit konstant bleibt. Da auch die maximale Sauerstoffmenge, die aus der Elektrolyse zusätzlich der Müllverbrennung zugeführt werden kann, recht gering ist im Verhältnis zur insgesamt zugeführten Sauerstoffmenge, wird ein Sauerstoff-Puffertank als nicht notwendig erachtet.

Wie weiter oben bereits erwähnt könnte allerdings eine O_2 Zwischenspeicherung zur Verwendung bei Anfahrvorgängen des MHKW sinnvoll sein, wenn dies zu einer relevanten Einsparung an Erdgas führen würde, welches beim Anfahren zur Stützfeuerungs eingesetzt wird.

4.4.5. Einfluss der Sauerstoffnutzung auf die Schadstoffproduktion

Eine Sauerstoffzugabe in den Kessel wird nicht nur allgemein zu einer höheren Brennraumtemperatur, sondern lokal am Zuführungspunkt möglicherweise zu einer zu hohen Temperatur führen, welche die Kesselmaterialien beschädigen bzw. auch in erhöhten Stickoxidemissionen resultieren könnte.

Die Bildung von Stickoxiden wird einerseits vom Anteil des chemisch im Brennstoff gebundenen Stickstoffs bestimmt. Die bei dessen Verbrennung freigesetzte Menge an Stickoxiden ist kaum von der Sauerstoffkonzentration in der umgebenden Verbrennungsluft abhängig, da dieser im Überschuss zugegeben wird.

Andererseits wird auch der in der Verbrennungsluft enthaltene Stickstoff (N_2) bei höheren Verbrennungstemperaturen zu Stickoxiden oxidiert, wobei sich die NO_x Bildungsrate exponentiell mit der Temperatur erhöht. Diesbezüglich könnten sich die Stickoxid Bildungsraten an Stellen mit höherer Sauerstoffkonzentration (im Vergleich zum Normalbetrieb) signifikant erhöhen und die Sauerstoffeindüsung daher in dieser Hinsicht von Nachteil sein.

Die Bildung von Schwefeloxiden wird im Wesentlichen vom Schwefelgehalt im Brennstoff bestimmt, so dass ein erhöhter Sauerstoffanteil in der Verbrennungsluft keinen nennenswerten Einfluss auf die Schwefeloxidbildung hätte, eventuell allerdings auf das Verhältnis von gebildeten SO_2 und SO_3 Mengen.

Es kann aber auch, wenn eine lokale Temperaturerhöhung vertretbar ist, dahingehend argumentiert werden, dass der zusätzliche Sauerstoff in der Verbrennung die Luftzahl reduziert und damit den gesamten Verbrennungsluft- bzw. Rauchgasvolumenstrom verringert, was zu einer Reduzierung der Strömungsgeschwindigkeit bzw. Erhöhung der Verweilzeiten führen würde. Das könnte somit zu einer besseren Oxidation von gebildetem Kohlenmonoxid (CO) zu CO_2 und dadurch zu einer geringeren CO Emissionsrate führen.

4.4.6. Quantitative Beschreibung der Sauerstoffnutzung

4.4.6.1. Elektrolyseanlage mit 5 MW Leistung

Würde man den für den eingangs kalkulierten Fall zugeführten Gesamtluftanteil (vgl. Abschnitt 4.4.3) so weit reduzieren, dass ein durch die geplante 5 MW Elektrolyseanlage erzeugter Sauerstoffstrom derart zugeführt werden könnte, dass der Sauerstoffüberschuss bei gleichem Brennstoffkonsum konstant bliebe, ergäben sich theoretisch folgende Veränderungen im Modell:

- Gesamtluftanteil sinkt um 3,4%;
- Feuerraumtemperatur steigt um 1,5%;
- Abgastemperatur beim Verlassen des Kessels sinkt um 1,3% (bei gleichbleibender Wärmeabfuhr im Kessel).
- Produzierter Dampfmassenstrom steigt um 0,5%;
- Elektrische Stromaufnahme der Frischlüfter sinkt um 4,3%;
- Elektrische Stromaufnahme des Saugzuges sollte in gleichem Verhältnis ebenfalls sinken, eine prozentuale Bezifferung wurde aber an dieser Stelle nicht vorgenommen.

Eine geringfügige Kostenersparnis ist zu erwarten durch die oben angegebene Verringerung der Stromaufnahme von Frischlüfter und Saugzug, die in möglichen weiteren Untersuchungen den zusätzlichen Installationskosten der Sauerstoffzuführung gegenüberzustellen wäre.

Aufgrund der Komplexität des Modells werden noch eine Vielzahl weiterer Parameter beeinflusst. Eine Untersuchung dieser Parameter würde aber den Rahmen, auch in Bezug auf die Aufgabenstellung und die mögliche Praxisnähe, übersteigen.

Vorgenannte Veränderungen sollten als Potentialstudie betrachtet werden, welche das Trendvorzeichen sowie die mögliche Trendhöhe darstellen, da das Modell natürlich nur limitiert die Realität abbilden kann.

4.4.6.2. Minimale Elektrolyseleistung zur sinnvollen Sauerstoffnutzung im MHKW Verbrennungsprozess

Seitens Einschätzung von Tractebel wird für eine tatsächliche Nutzung des Sauerstoffs aus der Elektrolyse und die Koppelung der beiden Prozesse, Elektrolyse und Verbrennung, ein weitergehendes Einsparpotential als das oben genannte vorausgesetzt bzw. als wirtschaftlich sinnvoll unterstellt. Nachstehend soll nun ein weiterer Fall beispielhaft betrachtet werden.

Würde man sich das Ziel setzen, im gegebenen Lastfall 15% der elektrischen Stromaufnahme der Frischlüfter einzusparen, zeigt das Modell nachstehende theoretische Veränderungen:

- Gesamtluftanteil sinkt um 12,6%;
- Feuerraumtemperatur steigt um 6,6%;
- Abgastemperatur beim Verlassen des Kessels sinkt um 4,2% (bei gleichbleibender Wärmeabfuhr im Kessel).
- Produzierter Dampfmassenstrom steigt um 1,7%.

Um nun diese Zielvorgabe zu erreichen, müssten etwa 3,3 t/h O₂ durch die Elektrolyseanlage bereitgestellt werden, was die Installation der Elektrolyseleistung von **etwa 20 MW** erfordern würde. Würde nun der Anspruch bestehen, alle drei Linien der Verbrennungsanlage gleichzeitig und im gleichen Maße zu bedienen, müsste entsprechend auch eine dreifach größere Elektrolyseur-Kapazität installiert werden.

4.4.7. Schlussfolgerung

Da der maximale Anteil des durch die 5 MW Elektrolyseanlage zusätzlich produzierten Sauerstoffs am Gesamtsauerstoffverbrauch der MHKW Verbrennung mit 3,5 % recht gering ist, sind die zu erwartenden Effekte auf den Verbrennungsprozess bzw. die Rauchgasreinigung gering und rechtfertigen aus Sicht von TEG nicht den entsprechenden zusätzlichen Installations- und Steuerungsaufwand. Die Nutzung des in der Elektrolyseanlagen produzierten Sauerstoffs im Verbrennungsprozess des MHKW Nordweststadt wird daher bei der betrachteten Größenordnung vorläufig als nicht sinnvoll eingeschätzt. Eine Nutzung des Sauerstoffs in der Verbrennung hätte erst bei einem um ein Vielfaches größeren Anteil am Sauerstoffbedarf einen merklichen Effekt. Da aber die Installation einer Elektrolyseanlage in der erforderlichen Größenordnung von 20 MW und mehr im Rahmen des Projekts MH2Regio nicht beabsichtigt bzw. aufgrund der verfügbaren Platzverhältnisse am Standort nicht möglich ist, wird auch die Sauerstoffnutzung im MHKW im Rahmen des Projekts vorläufig als nicht sinnvoll erachtet. Für die geplante Erzeugungsanlage am MHKW bleibt daher nur eine Abblasleitung in die Atmosphäre in sicherem Abstand zur Wasserstoffabfüllanlage. Dies verbessert in gewissem Maße die Luftqualität in der näheren Umgebung.

4.5. Öffentlich zugängliches Softwaretool

Die durch das Projekt erhaltenen Ergebnisse wurden interessierten Wasserstoffanwendern in einem Softwaretool zur Verfügung gestellt, um den Dialog zwischen den unterschiedlichen Marktteilnehmern zu verstärken. Ziel war die vereinfachte Berechnung von THG-Einsparpotenzialen und eine Kostenindikation beim Umstieg auf eine mit (grünem) Wasserstoff betriebene Fahrzeugflotte.

Damit soll eine infrastrukturpolitische Neuausrichtung angestoßen werden, welche durch die regionale Vernetzung technisch und wirtschaftlich vorangetrieben werden kann. Aus Gründen des Datenschutzes werden die Eingabedaten des Nutzers in das Softwaretool nicht gespeichert und die Ausgabedaten nur innerhalb des Softwaretools angezeigt, ähnlich wie beim bereits existierenden webbasierten Stromtarifrechner der Mainova.

Anmerkung:

Die im Rahmen dieses Berichts dargestellten Werte und Abbildungen stellen den aktuellen Zwischenstand der Programmierung dar. Die finale Version des Softwaretools wird nach Abschluss der Arbeiten übergeben und soll zukünftig weiterentwickelt werden.

4.5.1. Allgemeine Funktionsweise

Das Tool ist so aufgebaut, dass der Nutzer durch die Eingabe geführt wird und nach Betätigung des „Ausführen“ Feldes die Ergebnisseite geladen wird. Durch Betätigung des „PDF-Export“ Feldes werden die Ein- und Ausgabedaten des Nutzers im PDF-Format exportiert und können so durch den Nutzer auf einem lokalen Speichermedium abgespeichert werden.

Die Berechnung der Ausgabeparameter findet überwiegend nicht „live“ auf der Website statt. Stattdessen werden vorberechnete Ergebniswerte aus einer Datentabelle abgerufen und mit den Eingabeparameter verknüpft. Vereinfachte Berechnungen, wie zum Beispiel die Berechnung des Flottenverbrauchs, finden auf der Website statt.

4.5.2. Eingabeparameter

Zunächst wurden die notwendigen Eingabeparameter definiert, welche vom Nutzer auf der Startseite des Tools einzugeben sind. Um den Aufwand für den Nutzer gering zu halten und bereits mit wenigen Angaben Informationen zu erhalten, wird die Anzahl der unbedingt notwendigen auf zwei Eingaben begrenzt. Folgende Eingaben sind erforderlich:

- Fahrzeugkategorie (Auswahl über Kontextmenü)
- Anzahl Fahrzeuge

Optionale ergänzende Angaben sind möglich, wobei Default-Werte vorgegeben werden, die bei Bedarf vom Nutzer überschrieben werden können. Folgende optionale Eingaben sind möglich:

Tägliche Fahrleistung, Betriebstage pro Jahr, Kraftstoffart heute (Auswahl über Kontextmenü), Kraftstoffverbrauch heute, Druckniveau Wasserstoff, Wasserstoffverbrauch, Zieljahr, Wasserstoffpreis.

Folgende Fahrzeugkategorien wurden berücksichtigt:

LKW-Sattelzugmaschine, LKW (< 20 t zGG), Lieferfahrzeug (< 7,5 t zGG), Gelenkbus, Solobus, Reisebus, Abfallsammelfahrzeug.

4.5.3. Ausgabeparameter

Die Ermittlung der Ausgabedaten erfolgt durch automatische Umrechnung der eingegebenen Daten für den bisherigen, mit Diesel, Benzin oder CNG betriebenen Fuhrpark des Nutzers in die entsprechenden Verbrauchsdaten eines mit Wasserstoff betriebenen Fuhrparks, sowie dessen Gesamtkosten pro Fahrzeug und km und die dabei vermiedenen CO₂ Emissionen in kg/Jahr.

Zur Berechnung wurden die spezifischen Verbrauchs- und Emissionsdaten der verschiedenen Fahrzeugtypen verwendet, sowie die fahrzeugspezifischen Investitions- und Betriebskosten angesetzt. Diese werden aus mehreren integrierten Datentabellen ausgelesen. Der für die TCO-Rechnung verwendete Kraftstoffpreis (Wasserstoff) wird nicht an den Ergebnissen der Gesamtsystemoptimierung orientiert. Stattdessen wurde ein Wasserstoffpreis in Höhe von 9,50 EUR/kg angesetzt, welcher dem heutigen Preisniveau an den Tankstellen der H2 MOBILITY in Deutschland entspricht.

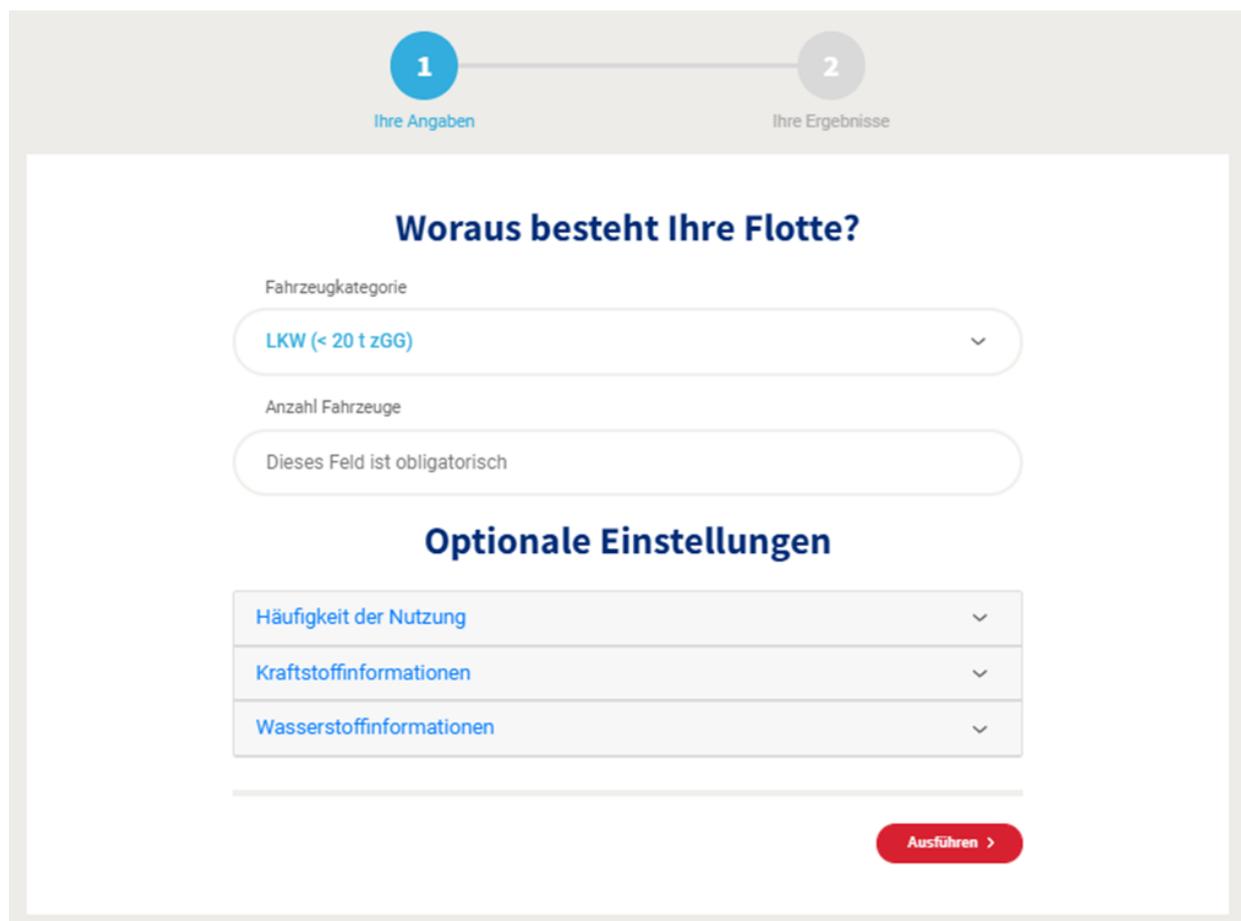
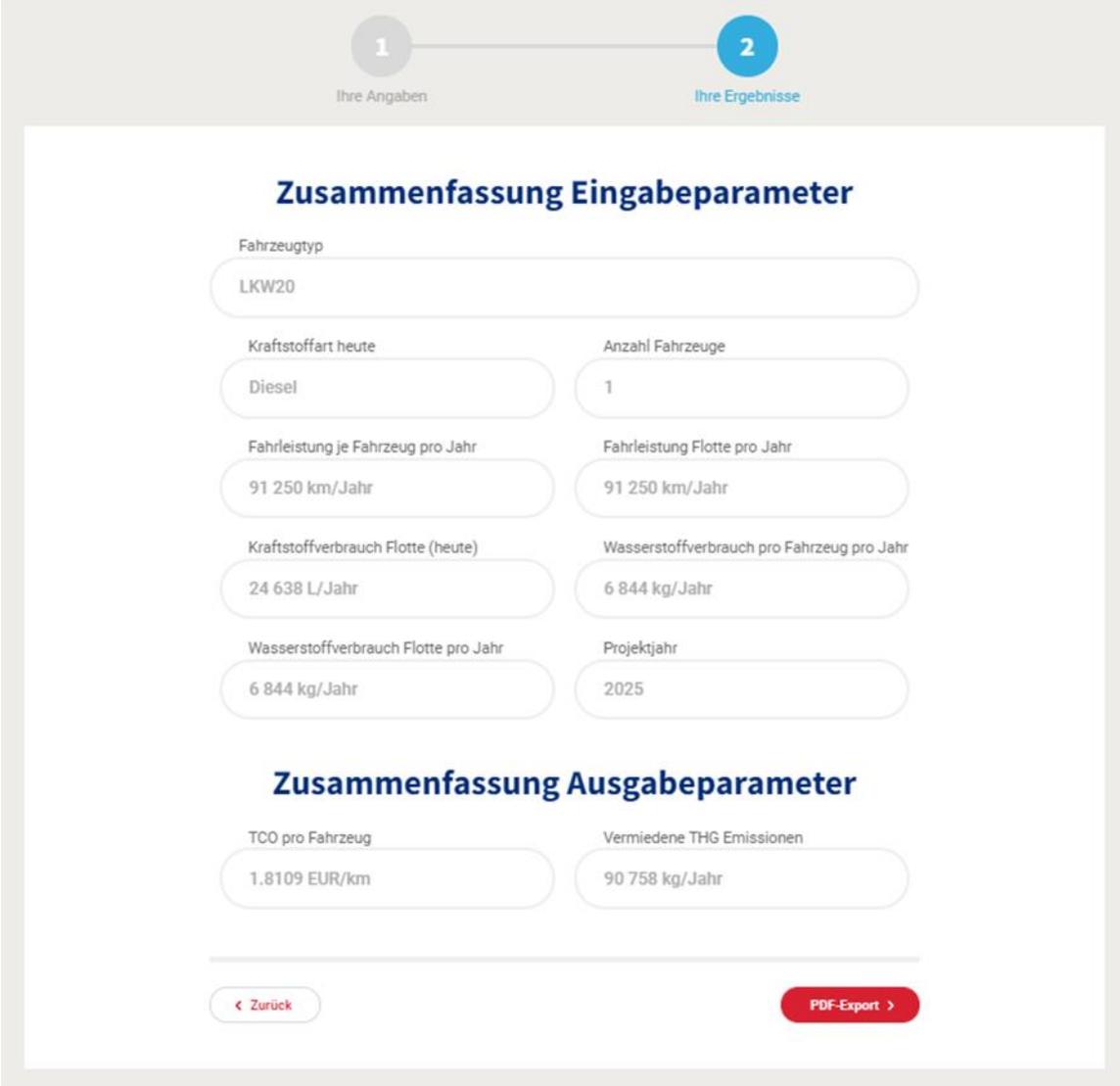


Abbildung 74: Bildschirmausschnitt Softwaretool – Eingabemaske

Die optionalen Eingabeparameter wurden gruppiert und sind standardmäßig zunächst ausgeblendet. Durch Klick auf das Kontextmenü werden die Eingabefelder expandiert und dem Nutzer werden die Default-Eingabewerte angezeigt. Die Default-Eingabewerte können bei Bedarf vom Nutzer überschrieben werden.

4.5.4. Ergebnisseite

Die folgende Abbildung zeigt die Ergebnis-Ausgabeseite des Softwaretools, welche eine Zusammenfassung der Eingaben des Nutzers und die Ergebniswerte der Berechnung enthält. Die in der Abbildung verwendeten Eingabewerte sind Beispielwerte zur Veranschaulichung.



1 Ihre Angaben ————— 2 Ihre Ergebnisse

Zusammenfassung Eingabeparameter

Fahrzeugtyp	
LKW20	
Kraftstoffart heute	Anzahl Fahrzeuge
Diesel	1
Fahrleistung je Fahrzeug pro Jahr	Fahrleistung Flotte pro Jahr
91 250 km/Jahr	91 250 km/Jahr
Kraftstoffverbrauch Flotte (heute)	Wasserstoffverbrauch pro Fahrzeug pro Jahr
24 638 L/Jahr	6 844 kg/Jahr
Wasserstoffverbrauch Flotte pro Jahr	Projektjahr
6 844 kg/Jahr	2025

Zusammenfassung Ausgabeparameter

TCO pro Fahrzeug	Vermiedene THG Emissionen
1.8109 EUR/km	90 758 kg/Jahr

< Zurück
PDF-Export >

Abbildung 75: Bildschirmausschnitt Softwaretool – Ergebnisseite

Das Tool ist unter folgender URL zu erreichen (Projektseite):

www.mainova.de/mh2regio

5. Öffentlichkeitsarbeit

Um den für das Projekt „MH2Regio“ relevanten Zielgruppen (Bürger/breite Öffentlichkeit, Wasserstoffanwender, Politik, Verbände) adäquat zu begegnen, war es wichtig, dass vor Beginn der Projektkommunikation eine Strategie festgelegt wurde, die für den gesamten Projektverlauf als Leitfaden aller Kommunikationsmaßnahmen diente. Damit wurde sichergestellt, dass die geplanten Aktionen sowohl die gewünschten Botschaften zu den Hauptprojekthemen Wasserstoff und Wasserstoffgesamtsystem transportierten als auch im Gesamten eine optische Einheit bildeten.

Dafür wurde eine inhaltliche Guideline mit dem kommunizierbaren Projekt-Content sowie ein „kleines“ Projekt-Corporate-Design-Manual entwickelt, das von der Bildsprache über die Farbigkeit bis zur Schriftart die gestalterischen Grundlagen für alle Medien legte.

Sowohl das Erklärvideo als auch die Animation sollten auf folgende aufeinander aufbauenden Kommunikationsziele einzahlen:



Abbildung 76: Öffentlichkeitsarbeit - Kommunikationsziele

5.1. Erklärvideo

Viele kennen die Filme mit den gezeichneten Illustrationen, die auf weißem Hintergrund von Händen bewegt werden und auf diese Weise komplexe Themen einfach und unterhaltsam erklären - Simpleshow.



Abbildung 77: Simpleshow Illustration

Auch fürs MH2Regio-Erklärvideo wurde dieser Filmtyp gewählt: Nach einem intensiven Briefing wurde das Thema in ein übersichtliches Textkonzept „übersetzt“, das die gewünschten Botschaften wie „Wasserstoff ist die Zukunft für den Schwerlastverkehr, ÖPNV und Binnenschifffahrt“ oder „Wasserstoff aus dem Strom von Müllheizkraftwerken ist CO₂-neutral“ beinhaltete. Dieses Konzept wurde in mehreren Runden projektintern inhaltlich abgestimmt – bis alle fachlichen Feinheiten saßen. Danach bekam der Text „ein Gesicht“ – das sogenannte Storyboard entstand. Aus einer umfangreichen Sammlung wurden gemeinsam die passenden Illustrationen gewählt. Das fehlende Bildmaterial wurde individuell und zum Projekt-Look passend erstellt. Nach der Storyboard-Freigabe startete dann die Videoproduktion des etwa zweiminütigen Erklärvideos.

Ausspielkanäle des Erklärvideos (unter anderem)

[MH2Regio \(mainova.de\)](https://www.mainova.de)

[Aus Müll wird Mobilität - YouTube](#)



Abbildung 78: Bildschirmausschnitt Erklärvideo Projekthomepage

5.2. Transportlogistik-Animation

Die ursprünglich für sämtliche MH2Regio-Kommunikationskanäle und -Medien geplanten statischen Infografiken wurden im Projektverlauf ebenfalls zu einem Bewegtbild-Medium – der Transportlogistik-Animation. Weil sich die Inhalte rund um die Wasserstoffherzeugung und den Transport einfacher und anschaulicher in einem animierten Medium den interessierten Zielgruppen vermitteln lassen. Es wurde ein passender Grafikstil entwickelt, der sowohl zum Projekt-Corporate-Design (z. B. Farbigkeit, Schriftart) als auch zu den zu transportierenden Inhalten passte. Auf dieser gemeinsam erarbeiteten Basis wurde dann durch das Drees & Sommer-Kreations-Team die Animation erstellt.

Ausspielkanäle der Transportlogistik-Animation (unter anderem):

[MH2Regio \(mainova.de\)](https://www.mainova.de)

[MH2Regio Transportlogistik - YouTube](#)

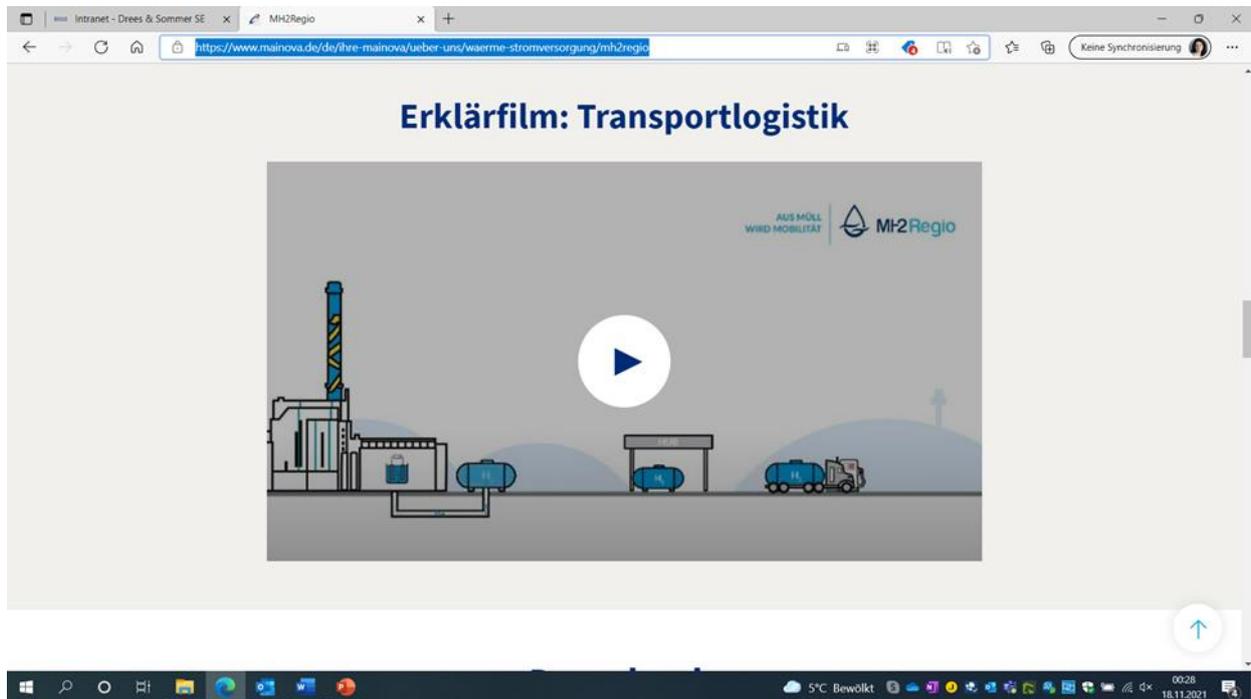


Abbildung 79: Bildschirmausschnitt Animation Transportlogistik

5.3. Veröffentlichungen

Die im Projekt erzielten Ergebnisse wurden unter anderem in zahlreichen Online-Meetings in Form von Projektvorstellungen, Teilergebnisberichten, Impulsvorträgen oder Fachartikel in die (Fach)-Öffentlichkeit getragen.

Eine Übersicht der wichtigsten Veröffentlichungen können der nachfolgenden Tabelle entnommen werden.

Tabelle 42: Übersicht Veröffentlichungen

Medium	Datum	Titel	Autoren
Internationales Verkehrswesen (IV)	08/2021 (Ausgabe 03/2021)	Wasserstoffbedarfsprognose für die Region Frankfurt	Janina Erb, Dr. Roman Flatau, Dr. Thorsten Sickenberger, Kristian Junker
ZfK – Sonderthema „Grüner Wasserstoff“)	09.08.2021	Prognose des zukünftigen Wasserstoffbedarfs in Frankfurt am Main und Region	Janina Erb, Dr. Roman Flatau, Dr. Thorsten Sickenberger, Kristian Junker
20. Brennstoffzellenforum Hessen-Festschrift	28.10.2021	Status Quo und Ausblick auf die Umsetzung in Hessen	Wortwahl – Agentur für Unternehmens- und Onlinekommunikation
Thüga – Kampagne		#Vorortwende – Wir meistern die Energiewende kommunal, praxisnah und innovativ	https://www.thuega.de/vorortwende/

6. Zusammenfassung

Das Projekt MH2Regio hat sich als erstes seiner Art mit der Erstellung einer regionalen Wasserstoffherstellungs- und -verteilinfrastruktur für den Schwerlast-, Güter- und Binnenschiffsverkehr beschäftigt. Ausgangspunkt ist eine zentrale Wasserstoffherzeugung an einem grundlastfähigen Müllheizkraftwerk, welches den grünen Stromanteil zur Erzeugung von Wasserstoff nutzt. Von hier aus wird mittels moderner MEGC-Trailer der Wasserstoff zu den Tankstellen in der Nähe der Wasserstoffanwender bedarfsgerecht transportiert. Alle Anlagenkomponenten wurden hierfür zunächst separat vordimensioniert und abschließend per Softwaremodellierung dem Gesamtsystem technoökonomisch zuträglich ausgelegt.

Das Konzept zeigt auf, dass eine Startinfrastruktur bestehend aus einer Wasserstoffherstellungs- und Abfüllanlage, zwei Tankstellen in räumlicher Nähe zu großen Fuhrparks und ein zentrales Wasserstofflager bereits wirtschaftlich betrieben werden können.

Mittels Softwaresimulation wurde das Zielszenario auf seine Resilienz gegenüber äußeren planbaren und unplanbaren Einflüssen getestet und weiter optimiert. Auch die Wahl der anlagenspezifischen Parameter im Gesamtsystem wurden wirtschaftlich optimiert und ausgewählt. Das Gesamtsystem ist mit den wenigen heute vorhandenen Wasserstofftankstellen konkurrenzfähig – bietet dabei aber ein höherwertiges Produkt an, da es 100% grünen Wasserstoff bereitstellt.

Im Vergleich zu den Anwenderanforderungen und einer damit verbundenen Marktdurchdringung, können die Ziel-Preis-Vorstellungen der Anwender nur mit Fördermitteln und Subventionierungsmodellen bzw. Preissteigerungen in der fossilen Mobilität erreicht werden. Das gewählte Szenario und damit verbundene Anlagensetting zahlt auf diese Anforderungen bereits ein und bildet die Basis für Skalierung durch Standardisierung.

Neben diesem Ergebnis wurde auch ein methodischer Ansatz entwickelt zukünftige Wasserstoffpotenziale im Rhein-Main Gebiet zu identifizieren und Infrastrukturelemente unter Einbeziehung der Verkehrsflüsse und -dichte klug zu platzieren.

Das Projekt dient in seiner Gesamtheit als Blaupause für andere Regionen und kann, angewandt als methodischer Leitfaden, auch in anderen Regionen wesentlich zur Entwicklung einer regionalen Wasserstoff-Infrastruktur beitragen.

7. Anhang

Online Links:

Projektseite mit Softwaretool

<https://www.mainova.de/de/ihre-mainova/ueber-uns/waerme-stromversorgung/mh2regio#>

uMap Marktaktivitäten und -potenziale

https://umap.openstreetmap.de/en/map/projeke-und-marktaktivitaten-wasserstoff_10718

uMap Wasserstoffbedarfsanalyse und Verkehrsaufkommen Analyse

https://umap.openstreetmap.de/en/map/bedarfsanalyse-wasserstoff_10950

Excel Dateien:

- *MH2Regio_AP1.2_Parameterliste.xlsx*
- *MH2Regio_AP1.3_Nachfrageprofile je Anwender und Jahr.xlsx*
- *MH2Regio_AP3.1_Wasserstoffaktivitäten.xlsx*
- *MH2Regio_AP3.2_Wasserstoffbedarfsrechnung.xlsx*
- *MH2Regio_AP3.3_Verkehrsaufkommen_Analyse.xlsx*

PDF-Dateien:

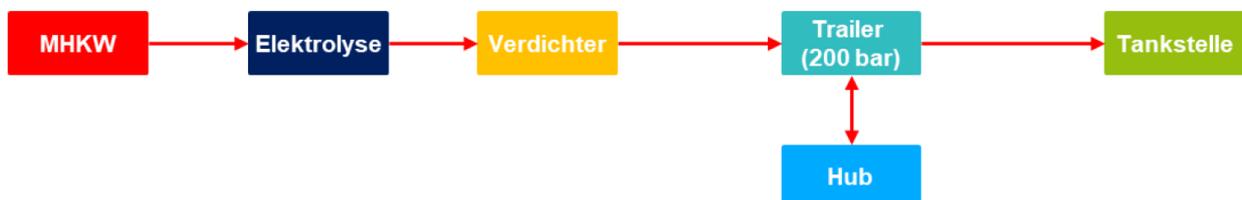
- *MH2Regio_AP3.1_Projektsteckbriefe.pdf*
- *MH2Regio_AP3.2_Fragenkatalog.pdf*

Tabellen:

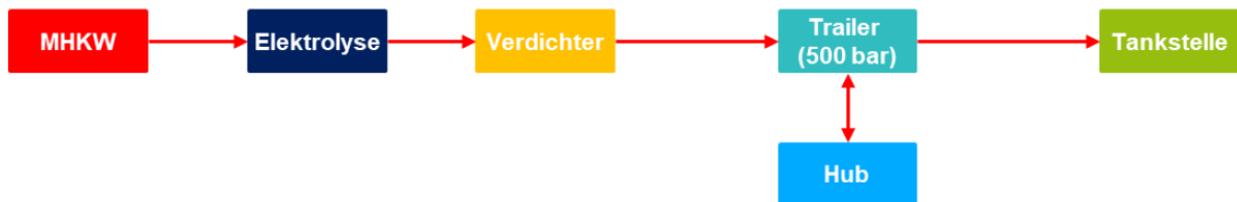
- *Detaillierte Szenarienbeschreibung Grundmodell*
- *Detaillierte Szenarienbeschreibung Vision 2040*
- *MH2Regio Vision 2040 – Distanzmatrix*
- *Kostenstruktur Szenario 2a+*
- *Ergebnisse der Standortbewertung – Distribution*
- *Ergebnisse der Standortbewertung – Tankstellen*
- *Übersicht Markthochlaufwerte Umfeld*
- *Übersicht Auslegungsparameter Hauptkomponenten*
- *Übersicht Anlagenteile und Bauwerke*

Tabellen: Detaillierte Szenarienbeschreibung Grundmodell

SZENARIO 1	
Parameter	Wert
System	
Elektrolysestandort	MHKW Nordweststadt
Standorte Wasserstofftankstelle	Tankstelle 1: MHKW Nordweststadt Tankstelle 2: Lorscherstraße, Frankfurt a.M.
Standorte Distributionsstützpunkt	-
Wasserstofftransport	LKW-Transport, Tube Trailer
Druckniveau Wasserstofftransport	200 bar
Transportkapazität	
Transportentfernungen	
Elektrolyseanlage – Distributionsstützpunkt	15 km
Elektrolyseanlage – Tankstelle 1	0 km
Elektrolyseanlage – Tankstelle 2	11 km
Distributionsstützpunkt – Tankstelle 1	15 km
Distributionsstützpunkt – Tankstelle 2	17 km
Abnehmer	
	Tankstelle 1
	Tankstelle 2
Rahmenbedingungen Optimierung	
Optimierungshorizont	2025, 2030, 2035, 2040, 2045
Optimierungsauflösung	Repräsentative 7-Tage-Woche (168 Stunden)
Nachfrageentwicklung	Gemäß Markthochlaufkurve
Strompreisentwicklung	Gemäß Strompreisprognose
Strombezug Elektrolyse	MHKW Nordweststadt
Strombezug Wasserstofftankstelle	Netzstrom



SZENARIO 2	
Parameter	Wert
System	
Elektrolysestandort	MHKW Nordweststadt
Standorte Wasserstofftankstelle	Tankstelle 1: MHKW Nordweststadt Tankstelle 2: Lorscherstraße, Frankfurt a.M.
Standorte Distributionsstützpunkt	-
Wasserstofftransport	LKW-Transport, 20-Fuß MEGC Trailer
Druckniveau Wasserstofftransport	500 bar
Transportkapazität	474 kg
Transportentfernungen	
Elektrolyseanlage – Distributionsstützpunkt	15 km
Elektrolyseanlage – Tankstelle 1	0 km
Elektrolyseanlage – Tankstelle 2	11 km
Distributionsstützpunkt – Tankstelle 1	15 km
Distributionsstützpunkt – Tankstelle 2	17 km
Abnehmer	
	Tankstelle 1
	Tankstelle 2
Rahmenbedingungen Optimierung	
Optimierungshorizont	2025, 2030, 2035, 2040, 2045
Optimierungsauflösung	Repräsentative 7-Tage-Woche (168 Stunden)
Nachfrageentwicklung	Gemäß Markthochlaufkurve
Strompreisentwicklung	Gemäß Strompreisprognose
Strombezug Elektrolyse	MHKW Nordweststadt
Strombezug Wasserstofftankstelle	Netzstrom



SZENARIO 3	
Parameter	Wert
System	
Elektrolysestandort	MHKW Nordweststadt
Standorte Wasserstofftankstelle	Tankstelle 1: MHKW Nordweststadt Tankstelle 2: Lorscherstraße, Frankfurt a.M.
Standorte Distributionsstützpunkt	-
Wasserstofftransport	Rohrleitungsgebunden
Druckniveau Wasserstofftransport	< 30 bar
Transportkapazität	DN100 PN30
Transportentfernungen	
Elektrolyseanlage – Distributionsstützpunkt	-
Elektrolyseanlage – Tankstelle 1	0 km
Elektrolyseanlage – Tankstelle 2	6,2 km
Distributionsstützpunkt – Tankstelle 1	-
Distributionsstützpunkt – Tankstelle 2	-
Abnehmer	
	Tankstelle 1
	Tankstelle 2
Rahmenbedingungen Optimierung	
Optimierungshorizont	2025, 2030, 2035, 2040, 2045
Optimierungsauflösung	Repräsentative 7-Tage-Woche (168 Stunden)
Nachfrageentwicklung	Gemäß Markthochlaufkurve
Strompreisentwicklung	Gemäß Strompreisprognose
Strombezug Elektrolyse	MHKW Nordweststadt
Strombezug Wasserstofftankstelle	Netzstrom

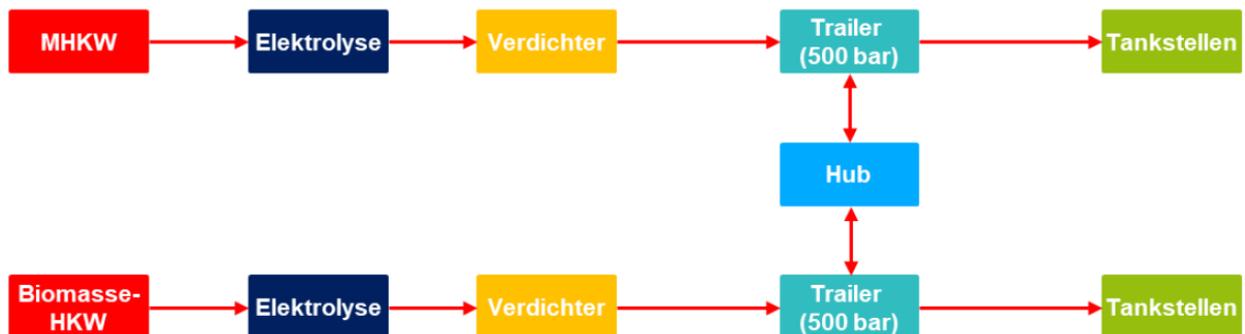


SZENARIO 4	
Parameter	Wert
System	
Elektrolysestandort	MHKW Nordweststadt
Standorte Wasserstofftankstelle	Tankstelle 1: MHKW Nordweststadt Tankstelle 2: Lorscherstraße, Frankfurt a.M.
Standorte Distributionsstützpunkt	-
Wasserstofftransport	-
Druckniveau Wasserstofftransport	-
Transportkapazität	-
Transportentfernungen	
Elektrolyseanlage – Distributionsstützpunkt	-
Elektrolyseanlage – Tankstelle 1	-
Elektrolyseanlage – Tankstelle 2	-
Distributionsstützpunkt – Tankstelle 1	-
Distributionsstützpunkt – Tankstelle 2	-
Abnehmer	
Tankstelle 1	
Tankstelle 2	
Rahmenbedingungen Optimierung	
Optimierungshorizont	2025, 2030, 2035, 2040, 2045
Optimierungsauflösung	Repräsentative 7-Tage-Woche (168 Stunden)
Nachfrageentwicklung	Gemäß Markthochlaufkurve
Strompreisentwicklung	Gemäß Strompreisprognose
Strombezug Elektrolyse	MHKW Nordweststadt
Strombezug Wasserstofftankstelle	Netzstrom

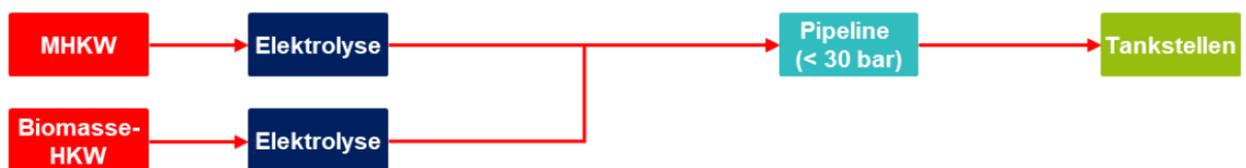


Tabellen: Detaillierte Szenarienbeschreibung Vision 2040

SZENARIO 5	
Parameter	Wert
System	
Elektrolysestandort	Elektrolyse 1: MHKW Nordweststadt Elektrolyse 2: Biomasse HKW Fechenheim
Standorte Wasserstofftankstelle	Tankstelle 1: MHKW Nordweststadt Tankstelle 2: Lorscherstraße, Frankfurt a.M. Tankstelle 3: Osthafen Tankstelle 4: Flughafen Frankfurt Tankstelle 5: Niederrad
Standorte Distributionsstützpunkt	Osthafen
Wasserstofftransport	LKW-Transport, 20 Fuß MEGC Trailer
Druckniveau Wasserstofftransport	500 bar
Transportkapazität	474 kg
Transportentfernungen	
	Vgl. Distanzmatrix Vision 2040
Abnehmer	
	Tankstelle 1
	Tankstelle 2
	Tankstelle 3
	Tankstelle 4
	Tankstelle 5
Rahmenbedingungen Optimierung	
Optimierungshorizont	2025, 2030, 2035, 2040, 2045
Optimierungsauflösung	Repräsentative 7-Tage-Woche (168 Stunden)
Nachfrageentwicklung	Gemäß Markthochlaufkurve
Strompreisentwicklung	Gemäß Strompreisprognose
Strombezug Elektrolyse	MHKW Nordweststadt / Biomasse HKW
Strombezug Wasserstofftankstelle	Netzstrom



SZENARIO 6	
Parameter	Wert
System	
Elektrolysestandort	Elektrolyse 1: MHKW Nordweststadt Elektrolyse 2: Biomasse HKW Fechenheim
Standorte Wasserstofftankstelle	Tankstelle 1: MHKW Nordweststadt Tankstelle 2: Lorscheistraße, Frankfurt a.M. Tankstelle 3: Osthafen Tankstelle 4: Flughafen Frankfurt Tankstelle 5: Niederrad
Standorte Distributionsstützpunkt	-
Wasserstofftransport	Rohrleitungsgebunden
Druckniveau Wasserstofftransport	< 30 bar
Transportkapazität	DN 100 PN30
Transportentfernungen	
	Vgl. Distanzmatrix Vision 2040
Abnehmer	
	Tankstelle 1
	Tankstelle 2
	Tankstelle 3
	Tankstelle 4
	Tankstelle 5
Rahmenbedingungen Optimierung	
Optimierungshorizont	2025, 2030, 2035, 2040, 2045
Optimierungsauflösung	Repräsentative 7-Tage-Woche (168 Stunden)
Nachfrageentwicklung	Gemäß Markthochlaufkurve
Strompreisentwicklung	Gemäß Strompreisprognose
Strombezug Elektrolyse	MHKW Nordweststadt / Biomasse HKW
Strombezug Wasserstofftankstelle	Netzstrom



SZENARIO 7	
Parameter	Wert
System	
Elektrolysestandort	Elektrolyse 1: MHKW Nordweststadt Elektrolyse 2: Biomasse HKW Fechenheim
Standorte Wasserstofftankstelle	Tankstelle 1: MHKW Nordweststadt Tankstelle 2: Lorsche Straße, Frankfurt a.M. Tankstelle 3: Osthafen Tankstelle 4: Flughafen Frankfurt Tankstelle 5: Niederrad
Standorte Distributionsstützpunkt	-
Wasserstofftransport	-
Druckniveau Wasserstofftransport	-
Transportkapazität	-
Transportentfernungen	
	-
Abnehmer	
	Tankstelle 1
	Tankstelle 2
	Tankstelle 3
	Tankstelle 4
	Tankstelle 5
Rahmenbedingungen Optimierung	
Optimierungshorizont	2025, 2030, 2035, 2040, 2045
Optimierungsaufösung	Repräsentative 7-Tage-Woche (168 Stunden)
Nachfrageentwicklung	Gemäß Markthochlaufkurve
Strompreisentwicklung	Gemäß Strompreisprognose
Strombezug Elektrolyse	MHKW Nordweststadt / Biomasse HKW
Strombezug Wasserstofftankstelle	Netzstrom

4 x



1 x



Tabelle: MH2Regio Vision 2040 – Distanzmatrix (in km)

Parameter	Elektrolyse 1	Elektrolyse 2	H ₂ - Hub	Tankstelle 1	Tankstelle 2	Tankstelle 3	Tankstelle 4	Tankstelle 5
Elektrolyse 1	-		15	0	11			
Elektrolyse 2		-	4					
H ₂ - Hub	15	4	-	15	17	0	24	22
Tankstelle 1	0		15	-				
Tankstelle 2	11		17		-			
Tankstelle 3			0			-		
Tankstelle 4			24				-	
Tankstelle 5			22					-

Tabelle: Kostenstruktur Szenario 2a+

[TEUR]	CAPEX					OPEX				
	2025	2030	2035	2040	2045	2025	2030	2035	2040	2045
MHKW Elektrolyseur	5.798	638	263	526	-98	737	1.106	1.749	1.763	2.521
MHKW BTS	431	55	141	226	0	14	17	23	25	47
Externe TS	833	187	623	407	0	69	102	149	153	3.180
Transport	2.425	730	365	730	-1.829	259	329	395	419	565
TOTAL	9.487	1.609	1.393	1.889	-1.927	1.079	1.554	2.316	2.360	6.314

Tabelle: Ergebnisse der Standortbewertung - Distribution

Lfd.-Nr.	Parameter	Details	Standort 5.1	Standort 10.1	Standort 10.2
0	Beschreibung Grundstück		0	0	0
1	Entfernung zu MHKW		18	12	12
2	Entfernung zu Abnehmern		12	3	6
3	Grundstücksfläche	Gesamtfläche, bestehend aus:	40	50	50
		Stellfläche für Trailer	40	50	50
		Rangierfläche für LKW	24	32	32
		Baufläche für Betriebsgebäude (Kontrollwarte, mit oder ohne Betriebspersonal)	20	50	50
		ggf. Baufläche für Nebenanlagen	20	50	50
		Tankstelle	0	32	40
		ggf. vorhandene Erweiterungsflächen	0	32	40
4	Baugrund	Asphaltierung bzw. Betonfundamente für Trailer-Stellplätze	0	32	32
		Fundamente für Betriebsgebäude	0	32	32
		Fundamente für Nebenanlagen (z.B. Kompressoren)	0	32	32
		ggf. Bodenaushub für Untergrundspeicher	0	32	32
5	Bisherige Nutzung des Grundstücks		30	18	18
6	Zustand Erschießung		40	32	32
7	Art der umgebenden Bebauung und Abstand zur umgebenden Bebauung	Abstand zu Wohnbebauung (und sonstigen Schutzgütern)	30	18	18
		Schutz- und Sicherheitsabstände zu sonstigen Anlagen (Gefährliche Stoffe, Brandherde)	40	50	50
8	Genehmigungsrechtliche Anforderung	Immissionsschutz	24	18	18
		Umweltverträglichkeit	50	50	50
9	Vorhandene Bebauung auf Grundstück (Oberfläche)	Notwendige Abbrucharbeiten, mögliche Weiternutzung (z.B. bestehende Kanäle für H2-Rohrleitung)	10	2	10
10	Vorhandene Bebauung auf Grundstück (Untergrund)	Möglichkeit Untergrundspeicher, H2-Rohrleitung	30	18	24
12	Zustand Zufahrtswege	Befahrbarkeit durch LKW-Sattelschlepper	20	8	16
		Befahrbarkeit durch Busse	30	18	24
		Befahrbarkeit durch PKW oder Transporter	50	50	40
		Zugänglichkeit/Befahrbarkeit Feuerwehr	50	50	50
12	Verkehrsanbindung	nicht-öffentliche Zufahrt ausreichend	8	8	8
13	Wasseranschluss	Brauchwasser, Trinkwasser für Löschwasser (Hydranten) bzw. Versorgung Tank-Berieselungsanlage	20	20	20
14	Abwasseranschluss	für Abfluss Löschwasser, bzw. Ableitung/Versickerung Niederschläge auf zusätzlichen Versiegelungsflächen	20	20	20
15	Gasanschluss	Bestehender Anschluss an Erdgasverteilnetz Prüfung Ausbaupotenziale für potentielle H2-Leitung zu Tankstellen/MHKW	20	20	20
16	Stromanschluss	Nieder- / Mittelspannung	40	40	40
17	Kommunikationsanschluss	Breitband Telefon	0	0	0
18	Bodenrichtwert		14	20	14
			700	899	930
			40%	51%	53%

Tabelle: Ergebnisse der Standortbewertung - Tankstellen

Lfd.-Nr.	Parameter	Details	Standort 5.1	Standort 5.3	Standort 10.1	Standort 10.2
1	Entfernung zu MHKW		0	0	0	0
2	Entfernung zu Abnehmern		18	16	12	12
3	Grundstücksfläche	Gesamtfläche, bestehend aus:	12	30	3	6
		Stellfläche für Trailer	50	25	50	50
		Rangierfläche für LKW	50	25	50	50
		Baufläche für Betriebsgebäude (Kontrollwarte, ohne Betriebspersonal)	40	20	32	40
		Baufläche für Kompressor, HD-Speicher, Nebenanlagen	50	25	50	50
		Baufläche für H2-Tanksäule:	50	25	50	50
		ggf. vorhandene Erweiterungsflächen	40	20	32	40
4	Baugrund	Asphaltierung bzw. Betonfundamente für Trailer-Stellplätze	40	20	32	40
		Fundamente für Betriebsgebäude	32	32	32	32
		Fundamente für Nebenanlagen (z.B. Kompressoren)	32	32	32	32
		ggf. Bodenaushub für Unterspeicher	32	32	32	32
5	Bisherige Nutzung des Grundstücks		32	24	32	32
6	Zustand Erschließung		30	24	12	18
7	Bestehende Tankstelleninfrastruktur	Bauliche Voraussetzungen	40	40	32	32
		Betriebliche Anforderungen	16	8	8	8
8	Art der umgebenden Bebauung und Abstand zur umgebenden Bebauung	Abstand zu Wohnbebauung (und sonstigen Schutzgütern)	16	8	8	8
		Schutz- und Sicherheitsabstände zu sonstigen Anlagen (Gefährliche Stoffe, Brandherde)	30	30	12	18
9	Genehmigungsrechtliche Anforderung	Immissionsschutz	40	40	50	50
		Umweltverträglichkeit	24	24	18	18
10	Vorhandene Bebauung auf Grundstück (Oberfläche)	Notwendige Abbrucharbeiten, mögliche Weiternutzung (z.B. bestehende Kanäle für H2-Rohrleitung)	50	40	50	50
11	Vorhandene Bebauung auf Grundstück (Untergrund)	Möglichkeit Unterspeicher, H2-Rohrleitung	10	6	2	10
12	Zustand Zufahrtswege	Befahrbarkeit durch LKW-Sattelschlepper	30	18	18	24
		Befahrbarkeit durch Busse	20	16	8	16
		Befahrbarkeit durch PKW oder Transporter	30	24	18	24
		Zugänglichkeit/Befahrbarkeit Feuerwehr	50	50	50	40
13	Verkehrsanbindung	nicht-öffentliche Zufahrt ausreichend	50	50	50	50
14	Wasseranschluss	Brauchwasser, Trinkwasser für Löschwasser (Hydranten) bzw. Versorgung Tank-Berieselungsanlage	20	12	8	8
15	Abwasseranschluss	für Abfluss Löschwasser, bzw. Ableitung/Versickerung Niederschläge auf zusätzlichen Versiegelungsflächen	20	0	20	20
16	Gasanschluss	Bestehender Anschluss an Erdgasverteilnetz Prüfung Ausbaupotenziale für potentielle H2-Leitung zu Tankstellen/MHKW	20	0	20	20
17	Stromanschluss	Nieder- / Mittelspannung	20	0	20	20
18	Kommunikationsanschluss	Breitband	30	0	30	30
		Telefon				
19	Bodenrichtwert					
			1038	730	893	944
			59%	42%	51%	54%

Tabelle: Übersicht Markthochlaufwerte Umfeld

Jahr	Zugmaschine		LKW		Lieferfahrzeuge		Gelenkbus		Solobus		Reisebus		Müllfahrzeug	
	konser-vativ	optimis-tisch	konser-vativ	optimis-tisch	konser-vativ	optimis-tisch	konser-vativ	optimis-tisch	konser-vativ	optimis-tisch	konser-vativ	optimis-tisch	konser-vativ	optimis-tisch
2021	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
2022	0,39%	0,98%	0,53%	1,32%	0,00%	0,10%	1,43%	2,14%	1,43%	2,14%	0,40%	1,00%	0,50%	1,00%
2023	0,62%	1,55%	0,80%	1,99%	0,00%	0,19%	2,49%	3,73%	2,49%	3,73%	0,72%	1,80%	0,95%	1,90%
2024	0,76%	1,90%	0,94%	2,35%	0,00%	0,26%	3,24%	4,87%	3,24%	4,87%	0,98%	2,44%	1,36%	2,71%
2025	0,86%	2,14%	1,03%	2,58%	0,00%	0,32%	3,81%	5,71%	3,81%	5,71%	1,18%	2,95%	1,72%	3,44%
2026	0,93%	2,31%	1,10%	2,76%	0,00%	0,37%	4,26%	6,39%	4,26%	6,39%	1,34%	3,36%	2,05%	4,10%
2027	1,82%	3,24%	2,33%	4,01%	0,00%	0,73%	5,34%	7,87%	5,34%	7,87%	4,68%	6,69%	3,64%	5,69%
2028	2,58%	4,03%	3,56%	5,27%	0,00%	1,05%	6,33%	9,23%	6,33%	9,23%	7,34%	9,35%	5,08%	7,12%
2029	3,26%	4,74%	4,88%	6,61%	0,00%	1,36%	7,30%	10,56%	7,30%	10,56%	9,47%	11,48%	6,37%	8,41%
2030	3,91%	5,40%	6,31%	8,08%	0,00%	1,65%	8,26%	11,89%	8,26%	11,89%	11,18%	13,18%	7,53%	9,56%
2031	4,53%	6,05%	7,78%	9,57%	0,00%	1,93%	9,24%	13,23%	9,24%	13,23%	12,54%	14,55%	8,58%	10,61%
2032	5,80%	7,85%	10,92%	14,16%	0,00%	3,06%	11,12%	16,55%	11,12%	16,55%	16,43%	19,64%	10,92%	14,05%
2033	7,09%	9,68%	13,45%	17,87%	0,00%	4,10%	12,90%	19,72%	12,90%	19,72%	19,55%	23,71%	13,03%	17,14%
2034	8,41%	11,54%	15,42%	20,75%	0,00%	5,06%	14,53%	22,60%	14,53%	22,60%	22,04%	26,97%	14,93%	19,93%
2035	9,74%	13,44%	16,99%	23,05%	0,00%	5,92%	15,96%	25,13%	15,96%	25,13%	24,03%	29,57%	16,63%	22,44%
2036	11,09%	15,34%	18,33%	25,00%	0,00%	6,69%	17,20%	27,32%	17,20%	27,32%	25,62%	31,66%	18,17%	24,69%
2037	13,43%	19,44%	20,94%	29,84%	0,00%	8,64%	19,10%	29,21%	19,10%	29,21%	30,10%	39,33%	21,15%	30,22%
2038	15,68%	23,39%	23,39%	34,39%	0,00%	10,39%	20,77%	30,87%	20,77%	30,87%	33,68%	45,46%	23,84%	35,20%
2039	17,80%	27,09%	25,77%	38,80%	0,00%	11,98%	22,27%	32,37%	22,27%	32,37%	36,54%	50,37%	26,25%	39,68%
2040	19,75%	30,51%	28,07%	43,05%	0,00%	13,44%	23,65%	33,74%	23,65%	33,74%	38,83%	54,30%	28,43%	43,71%
2041	20,7%	32,0%	29,5%	45,2%	0,0%	14,1%	24,8%	35,4%	24,8%	35,4%	40,8%	57,0%	29,9%	45,9%
2042	21,8%	33,6%	30,9%	47,4%	0,0%	14,8%	26,0%	37,1%	26,0%	37,1%	42,7%	59,7%	31,3%	48,1%
2043	22,8%	35,1%	32,3%	49,5%	0,0%	15,5%	27,2%	38,8%	27,2%	38,8%	44,7%	62,4%	32,7%	50,3%
2044	23,9%	36,6%	33,7%	51,7%	0,0%	16,1%	28,4%	40,5%	28,4%	40,5%	46,6%	65,2%	34,1%	52,5%
2045	25,06%	38,14%	35,08%	53,82%	0,00%	16,80%	29,57%	42,18%	29,57%	42,18%	48,54%	67,87%	35,54%	54,64%

Gefördert durch:



Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur

Koordiniert durch:



NOW - GMBH DE

Projektträger:



Projektträger Jülich
Forschungszentrum Jülich



Tabelle: Übersicht Auslegungsparameter Hauptkomponenten

Parameter	Wert
Wasserstoffanlieferung	
Nominale Durchflussmenge Entladung	160 kg/h (ca. 1780 m ³ /h i.N.)
Minimaler Betriebsdruck MEGC-Trailer	20 bar(e)
Nominaler Betriebsdruck MEGC-Trailer	500 bar(e)
Brutto-Speicherkapazität MEGC-Trailer	ca. 502,2 kg
Netto-Speicherkapazität MEGC-Trailer bei 45°C	ca. 474,2 kg
Wasserstoffverdichtung	
Minimale Förderleistung	160 kg/h (ca. 1780 m ³ /h i.N.)
Saugdruck	20 bis 500 bar(e)
Enddruck	Max. 500 bar(e)
Elektrische Motorleistung	320 kW
Operative Speicher	
Maximaler Betriebsdruck	500 bar(e)
Minimaler Betriebsdruck	200 bar(e) (*)
Maximale Betriebstemperatur	45 °C
Netto-Speicherkapazität	238,5 kg zwischen 500 und 200 bar(e)
Brutto-Speicherkapazität	448 kg
Speichervolumen	15,3 m ³
Strategischer Speicher	
Maximaler Betriebsdruck	500 bar(e)
Minimaler Betriebsdruck	20 bar(e) (*)
Maximale Betriebstemperatur	45 °C
Netto-Speicherkapazität	1.200 kg zwischen 500 und 20 bar(e)
Brutto-Speicherkapazität	1.269 kg

Gefördert durch:



Koordiniert durch:



Projekträger:



Speichervolumen	43 m ³
Wasserstoffabgabe	
Nominaler Betriebsdruck	350 bar(e) bei 15 °C
Maximaler Betriebsdruck	438 bar(e) bei 85 °C
Maximaler Förderrate je Dispenser	60 g/s = 3,6 kg/min = 216 kg/h bei 2.403 m ³ /h i.N.
Wasserstoff-Vorkühlung	-20 °C
Wasserstoffvorkühlung	
Wasserstoff-Durchflussmenge	Max. 2 x 3,6 kg/min (2 x 60 g/s) = 7,2 kg/min
Betriebsdruck	500 bar(e)
Eingangstemperatur (Wasserstoff)	45 °C
Ausgangstemperatur (Wasserstoff)	-20 °C (zu bestätigen)
Abwärmeleistung	ca. 120 kW
Leistungszahl Kältemaschine (CoP)	0,6
Elektrische Anschlussleistung	ca. 200 kW
Druckluftversorgung	
Förderleistung	40 m ³ /h i.N.
Druckluftqualität	Reinheit > 99,9 Vol.-% Taupunkt < -40 °C Partikelgröße <5 µm
Druckniveau	8 bar(e)
Elektrische Anschlussleistung	6 kW
Stromversorgung	
Wasserstoff-Kompressor	320 kW
Wasserstoff-Vorkühler	200 kW
Nebenanlagen	30 kW

Tabelle: Übersicht Anlagenteile und Bauwerke

Pos.	Anlagenteile	Beschreibung	Anmerkungen
1.	Elektrolyse		
1.1	Elektrolyseur	PEM-Elektrolyseur, 5 MW, 30 bar inkl. Gas-Wasser-Abscheider	Innerhalb der Elektrolyse Halle errichtet
1.2	Gleichrichter	24-Puls-Thyristor-Gleichrichter, wassergekühlt	Innerhalb der Elektrolyse Halle errichtet
	Transformator	Gießharztransformator inkl. Einhausung 6,3 kV / 0,9 kV, 2 x 2.900 kVA	Innerhalb der Elektrolyse Halle errichtet
1.3	Reinigungs- und Trocknungsanlage	DeOxo – TSA, vormontiert	Innerhalb der Elektrolyse Halle errichtet
1.4	Kühlwasserumlaufpumpe		Innerhalb der Elektrolyse Halle errichtet
1.5	Luftkühler (Dachinstallation)	Fin-Fan-Kühler	Auf Dach der Elektrolyse Halle errichtet
1.6	Kälteanlage	Kompressionskältemaschine zur Kaltwasserversorgung	Innerhalb der Elektrolyse Halle errichtet
1.7	Stickstoffflaschenbündel	200 bar Flaschenbündel je 50 l	Außenbereich
1.8	Druckluftkompressor	Kompressor inkl. Luftfilter, Trockner, Pufferbehälter	Innerhalb der Elektrolyse Halle errichtet
1.9	UF-Rack	Membran inkl. Pumpensatz	Innerhalb der Elektrolyse Halle errichtet
1.10	Steuerungstechnik		Innerhalb der Elektrolyse Halle errichtet
1.11	USV-Anlage		Innerhalb der Elektrolyse Halle errichtet
1.12	Nebenanlagen-Transformator	Gießharztransformator inkl. Einhausung	Innerhalb der Elektrolyse Halle errichtet
1.20	Schaltanlagen	6,3 kV, 400 V Schaltanlagen	Innerhalb der Elektrolyse Halle errichtet
1.21	Halle (> 14 x 10 m, freies Innenmaß)	Eingeschossige Stahlbau-Halle für Einhausung Elektrolyse mit Nebenanlagen, mit Dachaufbauten, 16 x 12 x >5 m ohne Dachaufbauten	Baurechtlichen Abstand zum Nachbargrundstück
2	Verdichteranlage		
2.1	Wasserstoffhochdruckspeicher 500 bar	Typ III/IV Gasdruckzylinder, vormontiert in Stahlrahmen	Schutzabstand 5 m bzw. Brandschutzisolierung
2.2	Wasserstoffhochdruckspeicher 900 bar	Typ III/IV Gasdruckzylinder, vormontiert in Stahlrahmen	Schutzabstand 5 m bzw. Brandschutzisolierung
2.3	Wasserstoffverdichter 500 bar	2 x Membranverdichter in Containerausführung, 2-3-stufig, zwischengekühlt	Sicherheitsabstand 3 m zu Betriebsbereichen anderer Anlagenteile (Trailer, Elektrolyse)
2.4	Wasserstoffverdichter 900 bar	Kolben oder Membranverdichter in Containerausführung, 2-3-stufig	Sicherheitsabstand 3 m zu Betriebsbereichen anderer Anlagenteile (Trailer, Elektrolyse)
2.5	Luftkühler (Dachinstallation)	Zwischen-/Nachkühlung Verdichter	Installation auf Containerdach
2.6	Gasregelanlage	Druck- und Mengenregelung	Außenbereich
3	Trailerabfüllung		

3.1	Trailer-Boxen	Trailer Abstellfläche (Trailer 13 x 2,5 x 3,6 m) mit seitigen Brandschutzisolierungen, Abmessung 20 x 6 x 5 m	Schutzabstand 5 m oder Brandschutzisolierung
3.2	Trailer Filling Panel	Abmessung (Projektion Überdachung) 4 x 0,8 x 3 m	
3.3	Trailer Sattelzug	Abmessung Trailer 13 x 2,5 x 3,6 m	
3.4	Berieselungsanlage für Trailer für Tankkühlung im Brandfall	Quer über Trailer-Boxen angebracht, Anschluss Druckluft oder eigene Druckluftherzeugung erforderlich (Trockensystem wg. Frostgefahr) Rezirkulation des am Boden ankommenden Wassers in den Vorratstank	
3.5	Pumpeneinheit mit Steuerung für Versorgung Berieselungsanlage (1x je Trailer-Box)	Pumpen 1 x 100% elektrisch außerhalb Trailer-Box angeordnet	
3.6-	Vorratstank für Berieselung, unterirdisch	Volumen 175 m ³ , Unterirdischer Tank 10 x 10 x 1,8 m, Füllung über Brauchwasseranschluss, Pumpen (1x 100%) zur Entleerung	
3.7	Löschwasserrückhaltebecken, unterirdisch	Volumen 100 m ³ , unterirdischer Tank 7,5 x 7,5 x 1,8 m, Pumpen (1x 100%) zur Entleerung in Abwassersystem oder bestehenden Löschwasserrückhaltebecken am Müllbunker MHKW	
4	H₂ Tankstelle	Erweiterung der bestehenden Dieseltankstelle	
4.1	2x Zapfsäulen (Dispenser) inkl. Bedien- und Zahlungspanel mit unterirdischen Zuleitungen	Zapfsäulen (1 x 700 bar, 1 x 350 bar) zur Betankung von Abfallsammelfahrzeugen und Bussen, Ausführung als Single- oder Dual-Dispenser Abemessung: je 1,5 x 0,6 x 3,0 m	Unterirdische Dieseltanks für Planung der Zuleitungen zu berücksichtigen
4.2	Erweiterung Verkehrsinsel Dieseltankstelle (ca. 10 – 11 m) mit neuem Witterungsschutz (Dach) und Erweiterung Betonpflasterung für H ₂ Tankstellenbereich	Witterungsschutz (Dach) über gesamte Länge des H ₂ -Tankstellenbereichs, Höhe mind. 5,0 m	