

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR FABRIKBETRIEB UND -AUTOMATISIERUNG IFF, MAGDEBURG

WASSERSTOFFINFRASTRUKTURENTWICKLUNG IM LÄNDLICHEN RAUM



WASSERSTOFFINFRASTRUKTURENTWICKLUNG IM LÄNDLICHEN RAUM

Studie zur Analyse und Ausarbeitung eines Modellprojektes für Wasserstoff-Infrastruktur im Verkehrssektor in ländlichen, strukturschwachen Regionen am Beispiel der Energieregion Staßfurt in der H₂-Region Salzlandkreis

Marcel Scheffler, M.Eng.
Prof. Dr.-Ing. Torsten Birth
Mike Bernhardt, M.Sc.
Natascha Eggers, M.Eng.
Prof. Dr.-Ing. Przemyslaw Komarnicki

Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF, Magdeburg

Veröffentlicht am 13. Februar 2023
DOI: 10.24406/publica-398

Kurzbeschreibung

.....
Kurzbeschreibung
.....

Die vorliegende Studie untersucht die Konzeption einer Wasserstoffinfrastruktur und Antriebstransformation für den Verkehrssektor strukturschwachen ländlichen Regionen am Beispiel des Salzlandkreises in Sachsen-Anhalt. Dabei werden relevante Technologien und vorhandene Energieanlagen, Speicher- und Transportkapazitäten beschrieben, sowie der Wasserstoffbedarf für den Verkehr ermittelt. Ein Drei-Phasen-Modell bis 2050 wurde auf Basis des MOREHyS-Modells entwickelt und die Wirtschaftlichkeit für kommunale Betriebe und die Kreisverkehrsgesellschaft unter Berücksichtigung von best-worst-case Szenarien berechnet. Die Studie kommt zu dem Ergebnis, dass eine Wasserstoffinfrastruktur aus klimapolitischer und wirtschaftlicher Perspektive sinnvoll ist.

Inhalt

Kurzbeschreibung	4
1	
Motivation und Zielstellung	9
1.1	
Problemstellung und Relevanz der Thematik	9
1.2	
Zielsetzung und wissenschaftliche Fragestellung.....	9
1.3	
Methodik und Struktur	10
2	
Grundlagen der Wasserstofftechnologie	10
2.1	
Eigenschaften von Wasserstoff	11
2.1.1	
Physikalische und chemische Grundeigenschaften von Wasserstoff Ebene zwei Überschriften Wortbergen, fern der Länder	11
2.1.2	
Thermodynamische Eigenschaften von Wasserstoff	11
2.1.3	
Klassifizierung von Wasserstoff	13
2.1.4	
Permeationseigenschaften	13
2.2	
Herstellungsverfahren von Wasserstoff.....	14
2.2.1	
Wasserelektrolyse.....	15
2.2.2	
Thermochemische Wasserspaltung.....	16
2.2.3	
Photo-elektrochemische und Photo-biologische Wasserspaltung	17
2.2.4	
Kohlenwasserstoffbasierte Verfahren.....	18
2.2.5	
Biomassebasierte Verfahren	19
2.3	
Überblick der verschiedenen Wasserstoffspeicherarten	19
2.3.1	
Mobile Speicherung von Wasserstoff.....	20
2.3.2	
Stationäre Speicherung von Wasserstoff.....	22
2.3.3	
Alternative Speichertechnologien	23
2.3.4	
Arten und Aufbau von Wasserstofftankstellen.....	23
2.4	
Wasserstoffverteilung und Infrastruktur.....	26
2.4.1	
Mobiler Transport von Wasserstoff	26

2.4.2	Wasserstoffversorgung via Pipelinesystem	26
2.4.3	Zusatzkomponenten innerhalb der Wasserstoffversorgung.....	27
2.5	Einsatz von Wasserstoff in verschiedenen Wirtschaftssektoren.....	28
2.5.1	Wasserstoff als Alternative in der konventionellen Stahlherstellung	28
2.5.2	Wasserstoff als Grundstoff in der chemischen Industrie	29
2.5.3	Wasserstoff als Energielieferant.....	29
2.5.4	Nutzung im Verkehrssektor	31
2.6	Gesetze und Regularien	33
2.7	Förderungsansätze von Wasserstoffanwendungen	35
3	Lokale Infrastruktur von Staßfurt und Umgebung	36
3.1	Geographische Lage des Salzlandkreises	36
3.2	Demographie und regionale Pendlerbewegung.....	37
3.3	Kommunale Zuständigkeit	38
3.4	Industriezweige in der Region	38
3.4.1	Energiewirtschaft im Salzlandkreis.....	39
3.4.2	Übersicht der regionalen chemischen Industrie	40
3.4.3	Unternehmen des produzierenden Gewerbes vor Ort.....	40
3.4.4	Landwirtschaftliche Betriebe und Lebensmittelproduktion	41
3.4.5	Verantwortliche Unternehmen der ansässigen Abfallwirtschaft.....	41
3.5	Darstellung des Verkehrssektors im Salzlandkreis.....	42
3.5.1	Verkehrstechnische Anbindung und Verkehrsaufkommen des Kreises	42
3.5.2	Logistikunternehmen und Schwerlastverkehr als mögliche Hauptakteure im Kontext regionaler Wasserstoffinfrastruktur	43
3.5.3	Öffentlicher Personennahverkehr als Treiber des Infrastrukturausbaus	43
3.6	Übersicht der gegenwärtigen Energie- und Wasserstoffinfrastruktur.....	44
3.6.1	Darlegung der verschiedenen Energiequellen	44
3.6.2	Übersicht – Tankstellennetz in der Salzlandregion.....	46

4	Anforderungen an einen zukünftigen Ausbau der Wasserstoffinfrastruktur am Beispiel Staßfurt sowie Salzlandkreis.....	46
4.1	Ist-Analyse der Energieverteilung am Standort Staßfurt respektive Salzlandkreis	47
4.1.1	Windkraftanlagen	47
4.1.2	Photovoltaikanlagen (Freifläche)	48
4.1.3	Biogas- und Wasserkraftanlagen	48
4.1.4	Speicherung und Transport	52
4.2	Beurteilung der verschiedenen Akteure innerhalb einer zukünftigen Wasserstoffinfrastruktur	53
4.2.1	Kommunale Verwaltung	53
4.2.2	Logistik- und Schwerlastverkehr	55
4.2.3	Personennahverkehr	59
4.3	Konzeptentwicklung zum Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur am Standort Staßfurt respektive im Salzlandkreis.....	61
4.3.1	Übersicht von verschiedenen Modellarten zur Konzeptionierung einer Infrastruktur	61
4.3.2	Modellauswahl	62
4.3.3	Modellübertragung auf den Standort Staßfurt respektive Salzlandkreis.....	62
4.3.4	Betrachtung der Auswirkung von Preisentwicklungen bei Dieselkraftstoff und Wasserstoff.....	67
4.3.5	Darstellung der Einsparpotentiale im Bereich Kosten und CO ₂ bei Antriebsartumstellung.....	69
4.3.6	Potentialbetrachtung der regionalen Unternehmen hinsichtlich einer Wasserstoffmobilitätstransformation	71

5	
Interpretation und Auswertung der Studienergebnisse	72
6	
Roadmap.....	74
7	
Anhang	75
8	
Literatur.....	81

1 Motivation und Zielstellung

1.1

Problemstellung und Relevanz der Thematik

Im Jahr 2021 lag die CO₂-Gesamtemission Deutschlands bei ca. 762 Mio. Tonnen [1]. Nach der Energiewirtschaft und dem verarbeitenden Gewerbe ist der Verkehrssektor mit ca. 184 Mio. Tonnen [2] der drittgrößte Emissionsverursacher. Neben dem Industriesektor rückt somit auch der Verkehrssektor immer mehr in den Fokus einer CO₂-Reduktion. Innerhalb des Verkehrssektors entfallen ca. 60% [3] der Emissionen auf den Pkw-Verkehr und ca. 35% [3] auf den Schwerlastverkehr (Nutzfahrzeuge, inkl. Busse). Um das deutsche Klimaziel 2030 von ca. 72 Mio. Tonnen [4] CO₂-Emissionen zu erreichen, muss unter anderem der Verkehrssektor seine Emissionen deutlich reduzieren. Während es dazu im Bereich des elektrifizierten Verkehrs mittlerweile Fortschritte gibt, ist die deutsche Wasserstoffinfrastruktur z. Z. immer noch eine Nischentechnologie: 2020 gab es in Deutschland ca. 14.500 [5] konventionelle Tankstellen und ca. 18.700 [6] Ladestationen für Elektrofahrzeuge, hingegen liegt die Zahl der betriebsfähigen Wasserstofftankstellen bei 89 [7], weitere 16 [7] sind in der Planungs- bzw. Realisierungsphase. Entsprechend lückenhaft ist die Versorgung im ländlichen Raum.

Ähnliche Verhältnisse findet man auch auf dem Fahrzeugmarkt. Während 2020 ca. 250 [8] verschiedene Modelle mit Verbrennungsmotor zur Verfügung stehen, sind es im Bereich des Elektroantriebes ca. 50 [9] und im Bereich des Wasserstoffantriebes nur 5 [7]. Dem Ausbau der Wasserstoffinfrastruktur muss somit ein deutlich höherer Stellenwert als aktuell beigemessen werden.

1.2

Zielsetzung und wissenschaftliche Fragestellung

Um die Wasserstofftechnologie sowohl für den Schwerlastverkehr als auch für den ÖPNV nutzbar zu machen, ist es wichtig, den Ausbau der Wasserstoffinfrastruktur im Verkehrswesen nicht nur in den westlichen und südlichen Ballungsräumen Deutschlands, sondern auch in ländlichen, strukturschwachen Regionen Nord- und Mitteldeutschlands voranzutreiben. Zielsetzung der Studie ist es, den aktuellen Stand der Wasserstoffinfrastruktur im ländlichen Raum zu analysieren, um anschließend einen möglichen Ausbau anhand eines Modells zu skizzieren. Hierbei stellen sich unter anderem folgende Leitfragen, die im Rahmen der Studie bearbeitet werden:

- Welche technischen Voraussetzungen sind bereits vor Ort erfüllt, bzw. müssen erfüllt werden, um eine Wasserstofftechnologie ökonomisch vor Ort zu etablieren?
- Welche regulatorischen Voraussetzungen bestehen aktuell hinsichtlich der Gestaltung einer Wasserstoffinfrastruktur in dieser Region, bzw. welche möglichen Einschränkungen in der Umsetzung können sich daraus ergeben?
- Wie könnte eine dazu passende Wasserstoffinfrastruktur modellhaft für einen bestimmten Verkehrssektor innerhalb dieser Region aussehen?
- Welche Kosten würden auf die beteiligten Organisationen für eine entsprechende Infrastruktur zukommen und welche CO₂-Einsparungen würden sich anschließend im Betrieb ergeben?

1.3 Methodik und Struktur

Die systematische Beantwortung der Fragestellung, wie eine zukünftige Wasserstoffinfrastruktur im Verkehrssektor in ländlichen, strukturschwachen Gebieten umgesetzt werden kann, wurde in folgende Schritte gegliedert:

Im ersten Schritt erfolgte die Aufarbeitung des Stands der Technik im Bereich Wasserstofftechnologie. Aufgrund der sich schnell entwickelnden Technologie in den vergangenen Jahren wurde vorrangig nur Literatur der vergangenen fünf Jahre verwendet. Die systematische Analyse besteht aus folgenden Abschnitten:

1. Definition von relevanten Technologiebereichen
2. Auswahl von Publikationen
3. Analyse der ausgewählten Publikationen
4. Darstellung der verschiedenen Grundlagentechnologien

Im zweiten Schritt wurde die aktuelle Situation hinsichtlich der bestehenden Wasserstoffinfrastruktur in der Untersuchungsregion aufgenommen. Grundlage hierfür waren bestehende Projekte verschiedener Institutionen wie Energieerzeuger, Logistikunternehmen, wissenschaftlicher Institute oder der Bereich des ÖPNV. Die Ausarbeitung beinhaltet sowohl Publikationen und Internetrecherche als auch die Durchführung von Interviews mit verantwortlichen Personen vor Ort. Aus dem Ergebnis der Ist-Stand-Aufnahme wurden die Anforderungen an den zukünftigen Einsatz von Wasserstofftechnologie im Raum Staßfurt erarbeitet.

Auf Basis der ausgearbeiteten Anforderungen wird im dritten Schritt ein Modell entwickelt, wie eine Wasserstoffinfrastruktur umgesetzt werden kann. Die Bewertung der verschiedenen in Frage kommenden Technologien hinsichtlich ihrer Vor- und Nachteile wird im vierten Schritt durchgeführt. Eine wirtschaftliche Betrachtung wird hierbei soweit möglich mit einbezogen. Abschließend wird in der Schlussbetrachtung der wesentliche Inhalt zusammengefasst und im Rahmen eines Ausblickes weiterer Forschungsbedarf aufgezeigt.

2 Grundlagen der Wasserstofftechnologie

Wasserstoff in seiner Reinform kommt das reaktionsfreudige Element in der Natur sehr selten vor, ist aber dennoch Grundlage unseres Lebens und fast unbegrenzt vorhanden. Als leichtestes Atom kommt es vor allem in chemischen Verbindungen wie Wasser, Säuren oder Kohlenwasserstoffen vor. Zur Herstellung von Wasserstoff wird das geruchs- und geschmacklose Gas unter Einsatz von Energie aus den Molekülen gelöst.

Im folgenden Kapitel werden die verschiedenen Eigenschaften und Herstellungsverfahren beschrieben, bzw. verschiedene Nutzungsmöglichkeiten des Gases aufgezeigt. Abschließend folgt ein Überblick über Regularien, Finanzierungs- und Fördermöglichkeiten hinsichtlich der Herstellung und Nutzung von Wasserstoff.

2.1 Eigenschaften von Wasserstoff

Da frei verfügbarer, nicht gebundener Wasserstoff selten vorkommt, muss dieser zur Nutzung hergestellt werden. Aus diesem Grund sind Kenntnisse über grundlegende Eigenschaften des Wasserstoffs für die Herstellung und Verwendung notwendig. Folglich werden die für das Thema relevanten Eigenschaften des Wasserstoffs beschrieben.

2.1.1 Physikalische und chemische Grundeigenschaften von Wasserstoff

Wasserstoff ist im Universum das häufigste chemische Element, jedoch nicht in der Erdkruste. Bezogen auf den geringeren Massenanteil auf der Erde im Vergleich zum Universum liegen nur ca. 0,12% [10] der gesamten Erdmasse als ungebundener Wasserstoff vor (= auf die Erdkruste bezogen 2,9 % [10]). Ansonsten ist Wasserstoff entweder in Wasser oder in organischen Verbindungen gebunden. Im Wasserdampf der Atmosphäre ist er gasförmig zu ca. 4 Vol.-% [11] vorhanden. Im Periodensystem ist Wasserstoff das kleinste Atom und enthält als Wasserstoffatom ein Elektron in der Atomhülle und ein Proton im Kern.

Für technische Anwendungen ist der Molekularzustand relevant, wobei Wasserstoff sich unabhängig von Druck- und Temperaturbedingungen aus zwei Atomen zusammensetzt. Deren Kernspinn kann unterschiedlich ausgerichtet sein. Entweder drehen sich beide Kerne in die gleiche Richtung (Ortho-Zustand) oder die Kerne drehen sich gegenläufig (Para-Zustand). Moleküle des gasförmigen Wasserstoffs befinden sich im Ortho-Zustand, der verflüssigte Wasserstoff ist in den Para-Zustand übergegangen. Im Vergleich zu anderen Gasen liegen Masse, kritischer Punkt, Tripelpunkt und Siedepunkt (bei 1,013 bar) [11] deutlich niedriger.

2.1.2 Thermodynamische Eigenschaften von Wasserstoff

Die Nutzung von Wasserstoff setzt Kenntnisse über die Eigenschaften des Gases voraus, insbesondere über den Phasenübergang vom gasförmigen zum flüssigen Zustand. Kenntnisse über das Verhalten von Wasserstoff beim rohrleitungsgebundenen Transport, der Speicherung, der spezifischen Wärmekapazität und der Viskosität sind dabei erforderlich.

Wasserstoff ist bei einem Normaldruck von 1,013 bar [11] und einer Temperatur von $> 252,76^{\circ}\text{C}$ [11] gasförmig. Unterhalb dieser Temperatur ist er flüssig. Druck beeinflusst den Aggregatzustand von Wasserstoff ebenso. So kann durch Erhöhung des Speicherdrucks Wasserstoff verflüssigt werden. Oberhalb der kritischen Temperatur von $-239,97^{\circ}\text{C}$ lässt er sich auch durch weitere Druckerhöhung nicht mehr verflüssigen [11].

Wasserstoff in der Gasphase ist durch folgende Eigenschaften charakterisiert:

- ungiftig
- nicht-korrosiv
- leicht entflammbar
- farblos
- geruchlos

- geschmacklos
- niedrige Viskosität
- geringe Dichte

Die spezifische Wärmekapazität (14,89 kJ/kg*K¹ [12]) beschreibt die Fähigkeit eines Stoffes, Wärmeenergie aufzunehmen. Unter anderem wird dieser Wert beim Verdichtungsvorgang und bei der Expansion benötigt, um die freiwerdende oder aufgenommene thermische Energie zu berechnen [11].

Das Fließverhalten von Gasen innerhalb von Rohr- und Versorgungsleitungen wird unter anderem durch deren Viskosität beeinflusst und ist abhängig von Druck und Temperatur, spielt aber bei Wasserstoff im Vergleich zu Methan eine untergeordnete Rolle. Während sich die Viskosität bei Methan signifikant bei Temperatur- bzw. Druckänderung erhöht, ändert sich diese bei Wasserstoff kaum. Dieses wiederum hat einen deutlichen Einfluss auf die Art und Anzahl der Verdichter innerhalb eines Wasserstoffsystems [11] – dynamische Viskosität H₂ 8,8128 μPa*s¹ [13]. Ein weiterer wichtiger Punkt im Vergleich zu Methan bzw. Erdgas ist der Joule-Thomson-Effekt. Bei der Entspannung eines Gases wird es in der Regel kälter. Dies gilt für Wasserstoff in weiten Bereichen nicht, was im Folgenden erläutert wird. Die Temperaturänderung ΔT, die sich bei einer Entspannung einstellt, lässt sich bei einer isenthalpen Drosselung über das Druckgefälle Δp abschätzen. Diese Erscheinung wird als Joule-Thomson-Effekt bezeichnet [14]. Es gilt:

$$\Delta T_{JT} = \int_{P1}^{P2} \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_h dp$$

Der Effekt beschreibt mathematisch die Auswirkung einer Druckänderung, bei konstanter spezifischer Enthalpie, auf die Temperatur. Bei positiven Joule-Thomson Koeffizient sinkt die Temperatur bei einer isenthalpen Druckabnahme, ist er negativ, so steigt die Temperatur bei isenthalper Druckabnahme.

Es wird über die Druckdifferenz integriert. Der Austrittsdruck ist p₂ und der Eingangsdruck p₁. Für eine erste Abschätzung wird eine Drossel vereinfachend als isenthalper Prozess angenommen. Bei einem idealen Gas bleibt die Temperatur bei einer isenthalpen Drosselung konstant. Wird ein Realgasverhalten berücksichtigt, kann die Temperaturänderung über den Joule-Thomson Koeffizienten μ_{JT} abgeschätzt werden. Der Joule-Thomson-Koeffizient ist die partielle Ableitung der Temperatur nach dem Druck bei konstanter Enthalpie:

$$\mu_{JT} = \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_h$$

Wasserstoff verfügt im relevanten Bereich über einen positiven Joule-Thomson-Koeffizienten. Das bedeutet, dass eine Druckabnahme mit einer Temperaturzunahme einhergeht. Im T-s-Diagramm wird eine isenthalpe Zustandsänderung in der Folge nicht durch eine horizontale, sondern durch eine steigende Kurve ausgedrückt. Diese Wirkung kann im T-s-Diagramm nachvollzogen werden. Deutlich wird, dass bei geringeren Drücken (<30 bar) von nahezu idealem Gasverhalten ausgegangen werden kann. Die isenthalpen verlaufen nahezu isotherm, eine Drosselung bei geringen Drücken bewirkt folglich eine geringe Temperaturzunahme (i.V.m. T-s-Diagramm für Wasserstoff [15]). Ergänzend sei an dieser Stelle erwähnt, dass Wasserstoff im Hochdruckbereich einen

¹ Bei Standardbedingungen 298,15 K und 1,013 bar

negativen Joule-Thomson-Koeffizient während der Drosselung aufweist, beispielsweise in Betankungsanlagen. Im Vergleich dazu verhält sich Methan entgegengesetzt – es weist in diesem Druckbereich einen positiven Joule-Thomson-Koeffizient auf was zur Folge hat, dass die Temperatur stark absinkt und Rohrsysteme vereisen können. Wasserstoff hat bei niedrigen/tiefen Temperaturen einen positiven Joule-Thomson-Effekt, welcher zur Verflüssigung durch Drosselung im Zweiphasengebiet genutzt wird [12, 16].

2.1.3 Klassifizierung von Wasserstoff

Für den sicheren Betrieb von Brennstoffzellen in den verschiedenen Anwendungsbereichen sind unterschiedliche Gasreinheitsklassen erforderlich. Unterschiedliche Wasserstoffherstellungsverfahren erzeugen unterschiedliche Wasserstoffreinheitsklassen. Für die Anwendung von PEM-Brennstoffzellen im Mobilitätssektor (Pkw und in Wasserstoffversorgungssystemen auf der letzten Meile, so genannten Hydrogen-Energiecontainern [33]) ist die Gasreinheit in den Normen SAE J2719, ISO 14687-2 und DIN EN 17124² festgelegt. Die zulässigen Grenzwerte der Fremdstoffe für PEM-Brennstoffzellen Anwendungen und Wasserstofftankstellen sind in der ISO 14687 und ISO 14687-2 angegeben. Das Dokument 14687:2019 der Internationalen Normungsorganisation (ISO) legt die Mindestqualitätsmerkmale von Wasserstoff als Kraftstoff für die Verwendung in Fahrzeugen und stationären Anwendungen fest.

In Deutschland gibt es zwei Methoden, um die Reinheit von Wasserstoff zu beschreiben. In der Industrie wird diese nach einem Zahlencode (3.0) beschrieben. Im Brennstoffzellenbereich auch häufiger die Bezeichnung nach DIN EN 17124 (99,97 %³ H₂ mit Angabe der Fremdstoffe in ppm) [34]. Die sogenannten anderen Stoffanteile oder auch Verunreinigungen können in der Praxis in Form von Wasser, Kohlenstoffen, Edelgasen, schwefelhaltige Verbindungen oder Feststoffpartikel auftreten. In den meisten Fällen führen schwefelhaltige Verbindungen zu irreversiblen Schäden an der Brennstoffzelle und sollten daher vermieden werden und die Grenzwerte aller weiteren Bestandteile sollten gemäß ISO 14687 eingehalten werden. Grundsätzlich kann jede Wasserstoffverunreinigung die Leistung und Lebensdauer der Brennstoffzelle beeinträchtigen [34].

Bei der gegenwärtigen Produktion von grünem Wasserstoff wird die PEMEL präferiert, wodurch grundsätzlich davon ausgegangen werden, dass ohne Gasaufbereitung eine Wasserstoffreinheit von 3.0 erzeugt wird. Durch geeignete Gasaufbereitungssysteme (Druckwechseladsorption, selektive Membran, Palladium-Diffusor) kann die geforderte Gasreinheit der jeweiligen Anwendungsbereiche sichergestellt werden. Für den Prozess der Hydrierung in der Erdölraffination wird nur Wasserstoff 3.0 gefordert. Der Wasserstoffreinheitsbereich 3.0 bis 5.0 wird beispielsweise von den stationären und mobilen Brennstoffzellensystemen verlangt [17]. Die gesteigerten Reinheitsanforderungen von 5.5 bis 7.0 Wasserstoff werden als Trägergas für Reduktionskomponenten bei der Halbleiterherstellung oder als Betriebsgas für Analysatoren sowie als Reduktionsmittel in der Chemie und Metallurgie verwendet [17].

2.1.4 Permeationseigenschaften

»Die Permeation ist das Durchwandern oder Durchdringen eines gasförmigen oder flüssigen Fluids durch eine poröse Membran oder durch begrenzende Rohr- oder Behälterwände« [11].

² Gemäß DIN EN 17124 ist für Brennstoffzellen im Pkw eine Gasreinheit von 3.7

³ In diesem Zahlenbeispiel steht die Anzahl der Ziffer 9 für die 3 und die Anzahl der letzten Ziffer für die letzte Ziffer > 99,97 % = 3.7 Gasreinheit

Rohrleitungen, Ventile, Dichtmaterialien, Flansche oder Kupplungen sind Bestandteile der verschiedensten Speicher- und Transportanlagen innerhalb der Wasserstoffinfrastruktur und bestehen aus den unterschiedlichsten Materialien. Aufgrund seiner geringen Molekülgröße neigt Wasserstoff dazu durch Werkstoffe hindurch zu diffundieren. Dies birgt die Gefahr einer Freisetzung des Gases und der Entwicklung eines hochexplosiven Gemisches in Verbindung mit Sauerstoff. Je nach Material verhält sich Wasserstoff unterschiedlich. Bei metallischen Materialien hat Eisen die höchste Permeationsrate im Vergleich zu Stahl bzw. Edelstahl. Im Bereich der Polymere (Plaste, Gummi oder Kleber) hat Polypropylen (PP) die höchste Permeationsrate. Hochverdichteter Polyethylen (HDPE) dagegen zeigt sich deutlich Wasserstoffundurchlässiger und den besten Wert erreicht Polyvinylchlorid (PVC). Materialeigenschaften wie die Art der Molekülbindung, das Quellverhalten der Molekülketten, die Temperatur- und die Druckbeständigkeit sind Einflussgrößen auf das Permeationsverhalten von Wasserstoff. Neben der Materialdichte ist der Permeationswert ein wichtiges Kriterium für die Auswahl des einzusetzenden Materials und der Grund für den Einsatz von Verbundwerkstoffen. Ein weiterer wichtiger Bestandteil für einen sicheren Gastransport in Gasnetze sind Odormittel. Schwefelhaltige Odormittel⁴ sind allerdings für die Brennstoffzellentechnologie hinderlich, daher wurden im Forschungsprojekt »H₂Home« die Auswirkungen von schwefelfreiem Odormittel auf PEM-Brennstoffzellen untersucht. Im Fachbericht [18] wird als Fazit festgehalten, dass bei Einsatz eines schwefelfreien Odormittels, eine NT-PEM Brennstoffzelle direkt mit odorisiertem Wasserstoff betrieben werden kann, wodurch Filterlösungen entfallen können. Abschließend kann also Odormittel zur Geruchswahrnehmung von diffundiertem Wasserstoff unter anderem beim Einsatz von Materialien mit geringem Permeationswert bzw. zur Erkennung von Leckagen eingesetzt werden, wodurch die Sicherheit erhöht wird.

2.2 Herstellungsverfahren von Wasserstoff

Wasserstoff wird gegenwärtig primär aus fossilen Energiequellen hergestellt, jedoch sind zur Senkung der Umweltauswirkungen neue Herstellungsverfahren oder auch Kombinationen notwendig. Zur Identifikation der diversen Herstellungsverfahren wurden dem Produkt Wasserstoff Farben zugeordnet., welche nachfolgend erläutert werden [19].

Von schwarzem Wasserstoff spricht man, wenn unter Einsatz von Steinkohle, meistens durch Vergasung die Herstellung erfolgt. Sinngemäß wird brauner Wasserstoff aus Braunkohle erzeugt. Wasserstoff aus Erdgas, Dampfreformierung, ist allgemein als grauer Wasserstoff bekannt. In Kombination mit der CCS Technologie wird laut nationaler Wasserstoffstrategie blauer Wasserstoff produziert. Eine weiterer Wasserstofftyp wird durch die Verwendung einer Methanpyrolyse zur Herstellung erzeugt – türkiser Wasserstoff. Werden bei der Wasserstoffherstellung ausschließlich erneuerbare Energiequellen verwendet, dann wird grüner Wasserstoff produziert. Der Anteil des grünen Wasserstoffs in Deutschland liegt derzeit bei ca. 5% [11] der Gesamtherstellungsmenge [20, 21]. Eine weitere nachhaltige Wasserstoffproduktion wird durch die Nutzung von Bioenergie erzielt, da kohlenstoffneutrale Energie aus organischen Stoffen gewonnen wird. Hierbei wird orangefarbener Wasserstoff definiert. Eine Besonderheit ist weißer Wasserstoff – bezieht sich auf natürliche Vorkommen/Quellen. Gegenwärtig wird vom Fraunhofer IEE eine Studie zum Thema Vorkommen und Potenzial durchgeführt.

Weißer Wasserstoff ist in Gesteinsformationen abgelagert und kann durch Fracking gewonnen werden. Im Prinzip das Pendant zum Fracking von fossilen Brennstoffen und ist somit recht umstritten [19].

⁴ S-free besteht aus einer Mischung von Ethylacrylat >50 %, Methylacrylat 25-49 % und 1-5 % 2-Ethyl-3-Methylpyrazine. S-free wird gewöhnlich in Konzentrationen zwischen 2-4 ppm eingesetzt [18].

2.2.1 Wasserelektrolyse

Schon um das Jahr 1800 wurde das Elektrolyseverfahren das erste Mal erwähnt. Hierbei handelt es sich um die Zerlegung von Wasser in seine Grundbestandteile Wasserstoff und Sauerstoff unter Zuhilfenahme von elektrischem Strom. Elektrolyseverfahren werden heute vor allem dort eingesetzt, wo Strom aus erneuerbarer Energie kostengünstig zur Verfügung steht. Die alkalische Elektrolyse (AEL), die Proton-Exchange-Membran-Elektrolyse (PEM) und die Hochtemperaturelektrolyse (HTEL) sind hierbei die drei gängigsten Verfahren in der wasserbasierten Wasserstoffherstellung.

Als ältestes und ausgereiftestes Verfahren wird die alkalische Elektrolyse schon lange im großen Maßstab industriell eingesetzt. Hierbei dienen die Hydroxid-Ionen (OH^-) in Kalilauge als Ladungsträger. Zwischen Kathode und Anode befindet sich ein für Wasserstoff und Sauerstoff undurchlässiges Diaphragma, das die Vermischung der beiden Stoffe zu einem explosiven Gemisch verhindert. Leitet man einen Gleichstrom durch den Elektrolyten, so bildet sich im Mengenverhältnis 1:2 an der Anode Sauerstoff und an der Kathode Wasserstoff. Vorteile der AEL sind geringe Investitionskosten, eine lange Lebensdauer und der Einsatz von unkritischen Materialien (Materialien, welche nicht aus Krisengebieten kommen oder unter Missachtung bestehender Vorschriften gefördert werden). Nachteile ergeben sich durch die vergleichsweise hohe Anlaufzeit, wenn das System nicht im Dauerbetrieb läuft. Der Wirkungsgrad von AEL-Anlagen liegt derzeit bei ca. 70 % [21].

Wie das AEL-Verfahren ist auch das PEM-Verfahren im industriellen Maßstab im Einsatz. Anstatt eines Diaphragmas wird bei dieser Technologie eine Polymermembrane eingesetzt. Diese ersetzt auf der einen Seite den flüssigen Elektrolyten und verhindert auf der anderen Seite die Bildung eines explosiven Gemisches von Wasser- und Sauerstoff. An der Anode wird flüssiges Wasser in Sauerstoff und zwei Wasserprotonen (H^+) aufgespalten. Nachdem die Protonen durch die Membran diffundiert sind, werden sie an der Kathode zu Wasserstoff reduziert. Vorteile des PEM-Verfahrens liegen in der Möglichkeit der Kopplung mit fluktuierenden Stromquellen, einer sehr kurzen Anlaufzeit und in der Erzeugung von hochreinem Wasserstoff. Nachteil dagegen ist der erforderliche Einsatz des seltenen und korrosionsresistenten Materials Iridium [21].

Im Vergleich zu den beiden erstgenannten Verfahren wird bei der Hochtemperaturelektrolyse kein flüssiges Wasser, sondern Wasserdampf eingesetzt. Der Kathode wird Wasserdampf zugeführt. Dieser dissoziiert in Protonen und O^{2-} -Ionen. An der Kathode bildet sich durch Elektronenaufnahme der Protonen Wasserstoff, während die O^{2-} -Ionen durch die Membrane dringen und sich an der Anode durch Elektronenabgabe Sauerstoff bildet. Ein hoher Wirkungsgrad zeichnet dieses Verfahren aus. Aktuell sind lange Anlaufzeiten und hohe Investitionskosten sowie die energieaufwändige Erzeugung von Wasserdampf noch ein deutlicher Nachteil gegenüber den anderen beiden Verfahren [21].

Bei den wasserbasierten Verfahren muss aus dem Kontext heraus auf das Hauptmedium Wasser eingegangen werden. Im Fachbericht Wasser als kritische Ressource für die Wasserstoffherzeugung [22] wurden Wasserbedarfsmengen für die jeweiligen Elektrolysetechnologien bewertet. Nachfolgend sind einige Erkenntnisse aus [22] beschrieben. Wasser ist das Edukt zur Erzeugung von Wasserstoff und Sauerstoff mittels Elektrolyse. Die Spaltung des Wassers in Wasserstoff und Sauerstoff erfolgt dabei mit Hilfe elektrischen Gleichstroms in einer PtG-Anlage durch die Elektrolyse [23]. Zu den wichtigsten Elektrolysesystemen gehören die AEL, die PEM-Elektrolyse, sowie perspektivisch die HTEL [2]. Zur Identifizierung des Wasserbedarfs der Elektrolysesysteme wird die gemeinsame chemische Ausgangslage erläutert. Basierend auf dem Molverhältnis beträgt die Reaktionsenthalpie $+0,079 \text{ kWh/mol H}_2$ [24]. Das positive Vorzeichen be-

schreibt eine endotherme Reaktion, weswegen Energie in Form von Gleichstrom aufgewandt werden muss. Bei einer vollständigen stofflichen Umsetzung von 8,94 kg H₂O, basierend auf den Molmassenverhältnissen, entstehen 1 kg H₂ und 7,94 kg O². Demnach werden rein theoretisch 8,94 kgH₂O/kgH₂ benötigt [25]. Bezogen auf die Gravimetrie muss bei vollständiger Stoffumsetzung und bei Standardbedingung eine externe Energiemenge in Höhe von 39,41 kWh zur Erzeugung von 1 kg H₂ aufgewandt werden. Vergleichend dazu ist für eine Wasserelektrolyse mit einem Wirkungsgrad von 60 % eine Energiemenge von 55 kWh erforderlich um 1 kg H₂ zu produzieren [25]. In Abhängigkeit der eingesetzten Elektrolisetchnologie variieren die realen Wasserverbräuche aufgrund der beschriebenen Wirkungsgradverluste. Innerhalb der AEL werden zwischen 9,5 kg und 11,2 kg [26] [27] [28] und bei der PEMEL zwischen 10,0 kg und 14,6 kg [24, 29][26] Wasser je produziertem kg Wasserstoff benötigt (vgl. Tabelle 1). Zudem werden Elektrolyseure mit einem Wasserüberschuss von typischerweise 10 % bis 20 % zum Schutz der Bauteile beaufschlagt, womit sich der reale Wasserverbrauch entsprechend erhöht. Dieser Mehraufwand wird durch den Effizienzfaktor berücksichtigt [25]. Die dargestellten Wasserbedarfsmengen beziehen sich ausschließlich auf das notwendige Eduktwasser bei der elektrochemischen Zerlegung innerhalb des Elektrolysemoduls (Stacks). Für den Betrieb einer PtG-Anlage wird in Abhängigkeit des Betriebspunkts und der Kompressionsleistung sowie der Heiz- und Kühlwassermenge die erforderliche Wassermenge gegenüber der Eduktwassermenge um den Faktor 50 bis 300 überschritten [23]. Die absolute Mengenangabe muss jedoch differenziert betrachtet werden, da die Kühlwassermenge in Abhängigkeit des Kühlsystems gegebenenfalls einmalig zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme aufgewandt werden muss und im Gegensatz zum Speisewasser nicht verbraucht wird [23].

Wasserbedarf [kgH ₂ O/kgH ₂]			Leitfähigkeit [µS/cm]				
PEMEL	AEL	HTEL	PEM	AEL	HTEL	ASTM	ASTM
						Reinstwasser	Reinwasser (II)
10-14,6	9,5-11,2	16,28	<2	<5	<2	<0,056	<1
[26, 27]	[26–28]	[30]	[26]	[26]	[30]	[31]	[31]

Tab. 1:
Wasserbedarf und
zulässiger Salzgehalt
von AEL, PEMEL und
HTEL

Neben der elektrochemischen, wasserbasierten Wasserstoffherstellung kommen auch thermochemische und photobiologische Verfahren, bzw. die photoelektrochemische Wasserspaltung zum Einsatz.

2.2.2 Thermochemische Wasserspaltung

Die thermochemischen Verfahren werden in dieser Studie unter das Hauptthemengebiet Thermochemische Kreisprozesse aus solarer Hochtemperatur eingegliedert und erläutert.

Die durch konzentrierende Solarthermie bereitgestellte Hochtemperaturwärme kann hierbei für die Erzeugung von grünem Wasserstoff verwendet werden. Die Wasserspaltung durch Hochtemperaturwärme suggeriert hohe Wirkungsgrade und damit niedrige Wasserstoffgestehungskosten [21]. Aktuell stehen unter Berücksichtigung der Effizienz zwei Pfade zur Wasserspaltung im Fokus: Zum einen Metalloxidredox- und zum anderen Schwefel-Kreisprozesse.

a. Solare Metalloxidredox-Kreisprozesse

Bei den Metalloxidredox-Kreisprozessen wird ein Redox-Material zyklisch zunächst reduziert und anschließend in einem weiteren Prozessschritt oxidiert. Dabei steht das Redox-Material in Kontakt mit Wasserdampf und entzieht diesem den Sauerstoff, wodurch Wasserstoff übrigbleibt. Diese zyklischen Prozesse werden als Kreisprozesse bezeichnet, weil das Redox-Material verschiedene Zustände einnimmt, selbst aber nicht verbraucht wird. Der Reduktionsschritt ist endotherm und findet meist bei hohen Temperaturen über 1000 °C statt. Neben Zwei-Schritt-Prozessen gibt es eine Reihe weiterer Verfahren, die aus einer höheren Zahl an Prozessschritten bestehen, wodurch die erforderlichen Maximaltemperaturen gesenkt werden können. Da zusätzliche Prozess- und Umwandlungsschritte jedoch mit Energieverlusten verbunden sind, wird den Zwei-Schritt-Kreisprozessen das höchste Wirkungsgradpotenzial zugeschrieben [32]. Die Prozesse wurden zunächst im Zusammenhang mit Abwärme aus Hochtemperatur-Kernreaktoren entwickelt [33, 34]. Mittlerweile steht aber vor allem die konzentrierende Solartechnik als Quelle regenerativer und kostengünstiger Hochtemperaturwärme im Fokus. Die erforderlichen Prozesstemperaturen werden hauptsächlich durch das eingesetzte Redox-Material bestimmt. Mögliche Materialien sind Nickel-Ferrit oder Ceroxid [35].

b. Schwefel-Kreisprozesse

Es gibt zwei thermochemische Prozesse, welche die thermische Spaltung von Schwefelsäure im Kern haben. Zum einen das Schwefelsäure-Iod-Verfahren mit einem möglichen thermischen Wirkungsgrad von 47 % [36]. Zum anderen der Schwefelsäure-Hybrid-Kreisprozess, eine Kombination aus thermochemischen und elektrochemischen Verfahren. Das elektrochemische Verfahren wird auch als Westinghouse-Prozess bezeichnet. Zur Kombination wird ein spezieller Elektrolyseur verwendet, dem neben Wasser auch Schwefeldioxid, das Reaktionsprodukt der Schwefelsäurespaltung, zugeführt wird. Dadurch wird die notwendige Zersetzungsspannung für die Wasserspaltung um ca. 1 V reduziert. Insgesamt wird beim Westinghouse Prozess ein thermischer Wirkungsgrad von 30 % kalkuliert [37]. Im Vergleich zum Schwefelsäure-Iod-Verfahren ist der Wirkungsgrad niedriger und es werden thermische und elektrische Energie benötigt. Dafür ist die prozesstechnische Umsetzung des Westinghouse Prozesses deutlich einfacher. Dafür ergeben sich prozesstechnische Herausforderungen bei der Handhabung der stark korrosiven Stoffe Schwefelsäure und Iod. Eine weitere zentrale Schwierigkeit bei der Umsetzung des Prozesses ist die Trennung der Reaktionsprodukte [38]. Für den zentralen Prozessschritt beider Kreisprozesse wird Hochtemperaturwärme bei etwa 900 °C benötigt. Anfänglich wurden für diese Temperaturen Kernreaktoren als Wärmequelle betrachtet. Mittlerweile ist die konzentrierende Solarthermie eine geeignete Alternative [39].

Zusammenfassend sind bei den thermochemischen Kreisprozessen zur Wasserstoffherstellung zwei gemeinsame Vorteile abzuleiten. Und zwar die Möglichkeit der Skalierbarkeit und aufgrund der Nutzung von Sonnenenergie eine ökonomische Herstellung von Wasserstoff.

2.2.3

Photoelektrochemische und Photobiologische Wasserspaltung

Eine weitere Möglichkeit die solare Energie zur Wasserstoffherstellung zu nutzen bietet die photoelektrochemische und photobiologische Wasserspaltung. Im Vergleich zu den thermochemischen Kreisprozessen wird keine solare Hochtemperatur genutzt.

Bei der photoelektrochemischen Wasserstoffherstellung werden Photoelektrochemische Zellen (PEC) verwendet. Diese bestehen aus einer Halbleiter-Photoanode, einer Kathode aus Metall und einem Elektrolyten. Anode und Kathode sind hierbei in fester Form, der Elektrolyt in flüssiger Form. Durch die bei Lichteinfluss entstehende Spannung wird innerhalb der Zellen mit Hilfe der Photo-Elektrolyse das Wasser gespalten [21].

Eine Art Photosynthese zur direkten Erzeugung von Wasserstoff mit Hilfe von Sonnenlicht wird beim photobiologischen Verfahren genutzt. Hierbei dienen Cyanobakterien oder Grünalgen als Basis, die Wasserstoff als Nebenprodukt ihres Stoffwechsels bilden. Vorteile dieses Verfahrens sind die Durchführung unter Umgebungsbedingungen und eine einfache Vermehrung der einsetzbaren Mikroorganismen. Nachteile sind die Sauerstoffempfindlichkeit der eingesetzten Mikroorganismen, eine derzeitige großtechnische Umsetzung und der sich daraus ergebende geringe Wasserstofftrag und ein Wirkungsgrad $< 10\%$ [21]

2.2.4 Kohlenwasserstoffbasierte Verfahren

Bei den Kohlenwasserstoffbasierten Verfahren bildet der Rohstoff gleichzeitig die Energiequelle für den Prozess. Der Wasserstoff ist dabei teilweise im Rohstoff gebunden oder wird durch die Zufuhr von Wasserdampf eingebracht [40].

Zu Anfang der Stadtgasnetze war die Kohlevergasung das übliche Verfahren zur Herstellung von sogenanntem »Wassergas« oder »Synthesegas«; einem Gemisch aus H_2 und CO . Bei diesem Verfahren wird Kohle unter Einblasen von Luft aufgeheizt und anschließend mit Wasserdampf beschickt. Dabei reagiert der Kohlenstoff mit Wasserdampf zu H_2 und CO . Zur Bereitstellung von Wasserstoff kann nach der Entschwefelung durch erneute Zugabe von Wasserdampf CO zu CO_2 und H_2 umgesetzt werden. Anschließend erfolgt die Abtrennung des CO_2 zum Beispiel durch Auswaschen mittels Wasser, Methanol, Aminen oder durch Basen [41].

Mit der Erschließung von Erdgaslagerstätten und den Ausbau des Erdgasnetzes wurde die Kohlevergasung zunehmend durch die Dampfreformierung abgelöst [40]. Die thermochemische Aufbereitung von gasförmigen Kohlenwasserstoffen zur Herstellung von Wasserstoff ist derzeit das am häufigsten angewandte Verfahren. Hierbei wird entweder ein Reformierungsverfahren oder die thermische Zersetzung eingesetzt. Durch Zuführung von Prozesswärme wird gasförmiger Kohlenwasserstoff in Wasserstoff und Kohlenstoff gespalten.

Für das Reformierungsverfahren wird hauptsächlich Methan eingesetzt. Bei ca. $500 - 1000\text{ °C}$ [11] entsteht als Produkt während des Reformierungsprozesses eine Mischung aus Wasserstoff und Kohlenstoffmonoxid. Dieses wird als Synthesegas bezeichnet. Um die Ausbeute an Wasserstoff zu erhöhen, kann in einem weiteren Prozessschritt Wasserdampf zugegeben werden. Mithilfe der Wassergas-Shift-Reaktion verringert sich der im Synthesegas bestehende Anteil von Kohlenstoffmonoxid bzw. es vergrößert sich der Wasserstoffanteil [21].

Neben der Reformierung kann Wasserstoff auch durch partielle Oxidation von schweren Kohlenwasserstoffen (Heizöl) bereitgestellt werden. Dabei wird der Rohstoff bei unterstöchiometrischer Zufuhr von Sauerstoff zu H_2 und CO umgesetzt. Da es sich dabei um eine stark exotherme Reaktion handelt, erfolgt die Zugabe geringer Mengen von Wasser. Gleichzeitig kann so die Rußbildung reduziert werden [42].

Durch die Kombination von Dampfreformierung und partieller Oxidation kann Abwärme sinnvoll genutzt und so der Wirkungsgrad des Gesamtverfahrens verbessert werden. Dieser kombinierte Prozess wird als autotherme Reformierung bezeichnet [43]. Eine weitere Möglichkeit der Wasserstoffbereitstellung aus Erdgas ist die Methanpyro-

lyse. Hierbei wird Biomethan bei Temperaturen von mehr als 1.000 °C in seine Bestandteile H_2 und C aufgespalten. Vorteil dieses Verfahrens ist, dass als Nebenprodukt reiner Kohlenstoff entsteht. Eine Abtrennung von CO oder CO_2 ist aus diesem Grund nicht notwendig [44].

Das effizienteste Verfahren im Bereich der Wasserstoffherstellung ist das Kväerner-Verfahren mit einem Wirkungsgrad von fast 100%, eine Weiternutzung der entstandenen Produkte und Abwärme vorausgesetzt. Als Ausgangsmaterial werden reines Methan, Erdgas oder auch Schweröl eingesetzt. Dieses wird in einem Plasmabrenner bei ca. 1600°C [13] in Wasserstoff (ca. 50%), Aktivkohle (ca. 40% reiner Kohlenstoff) und ca. 10% [13] Wasserdampf getrennt [21, 45].

2.2.5 Biomassebasierte Verfahren

Durch die Nutzung von Biomasse wie Holz, Landwirtschafts- oder Siedlungsabfälle als Ausgangsmaterial für die Wasserstoffherstellung mittels Vergasung, kann diese weitestgehend CO_2 -neutral gestaltet werden. Dabei kommt neben der Vergasung bei der Erzeugung von Wasserstoff aus Biomasse zusätzlich noch die Fermentation zum Einsatz.

Bei der Vergasung von Biomasse wird unter Zugabe von Sauerstoff das Ausgangsmaterial auf ca. 700°C bis 900°C [11] aufgeheizt, dadurch werden die Kohlenwasserstoffverbindungen aufgebrochen und es entsteht eine Mischung aus Wasserstoff, Kohlenmonoxid, Methan und weiteren Nebenprodukten. In einem zweiten Prozessschritt, der Dampfreformierung, reagieren das Methan und andere flüchtige Kohlenwasserstoffe mit Wasserdampf zu Wasserstoff und Kohlenstoffmonoxid [21].

Neben der thermischen Verwertung der Biomasse kann Wasserstoff durch die sogenannte Dunkelfermentation bereitgestellt werden. Hierbei wird der Stoffwechsel von Mikroorganismen unter anaeroben Bedingungen genutzt. Um Energie für ihren Stoffwechsel und das Wachstum bereitzustellen, bauen Mikroorganismen die zugeführten Substrate durch Oxidation ab. Bei dieser Oxidationsreaktion werden Elektronen freigesetzt, welche in einer aeroben Umgebung Sauerstoff reduzieren, wodurch Wasser entsteht. Unter anaeroben Bedingungen fungieren andere Verbindungen als Elektronenakzeptoren, wodurch molekularer Wasserstoff entsteht [45].

Da das Substrat bei der Dunkelfermentation nicht vollständig abgebaut wird, ist eine Kopplung des Prozesses mit bestehenden Biogasanlagen sinnvoll. Aktuelle Untersuchungen im Rahmen des HyPerFerment-Projektes haben gezeigt, dass die Kopplung der Dunkelfermentation mit bestehenden Biogasanlagen keinen negativen Einfluss auf die Biogasproduktion hat. Durch die Vorschaltung der Dunkelfermentation kann das Substrat daher effizienter genutzt und gleichzeitig Wasserstoff bereitgestellt werden [46].

2.3 Überblick der verschiedenen Wasserstoffspeicherarten

Generell dient der Speicher im Infrastruktursystem zur Bevorratung oder Lagerung von Wasserstoff. Klassifiziert werden Speicher anhand ihrer verschiedenen Eigenschaften, die in Tabelle 2 dargestellt sind:

Klassifizierung	Unterscheidungs- merkmal	Ausprägungsart
Physikalisch	Unterscheidung	– elektrisch
	hinsichtlich der physi-	– elektrochemisch
	kalischen Energieform	– chemisch
		– mechanisch
		– thermisch
Zeitlich	Unterscheidung hinsicht-	– Kurzzeit
	lich der Entnahmezeiten	– Langzeit
Räumlich	Unterscheidung hinsichtlich	– zentral
	der Ortsbindung	– dezentral
		– ortsfest
		– mobil
Ökonomisch	Unterscheidung hinsichtlich	– Märkte
	der Kosten	– Kapitalkosten
		– Betriebskosten

Tab. 2:
Überblick der
Klassifizierung von
Gasspeicher [24]

Die Wahl des Speichertyps ist vor allem davon abhängig, wie dieser genutzt werden soll. Aufgrund der sehr hohen Flüchtigkeit und leichten Entzündlichkeit von Wasserstoff ist die Speicherung eine Herausforderung für den Ausbau der flächendeckenden Nutzung. Grundsätzlich erfolgt die Auswahl der für die Wasserstoffinfrastruktur benötigten Speicher anhand ihrer zeitlichen Nutzung, des Speicherkapazitätsbedarfs und der Abhängigkeit der Ortsbindung. Ein weiteres wichtiges Kriterium ist der Speicherdruck. Bei der Wasserstoffherstellung, der Lagerung, der Verteilung und der abschließenden Nutzung wird mit jeweils unterschiedlichen Speicherdrücken gearbeitet. Dieses ist vor allem auf den verfügbaren Speicherplatz und auf unterschiedliche Sicherheitsaspekte zurückzuführen. In den folgenden Abschnitten werden die Vor- und Nachteile der verschiedenen Speicherarten beschrieben. Hauptbetrachtungsmerkmal hierbei ist der stationäre bzw. mobile Einsatz der Speicher innerhalb der gesamten Infrastruktur [25].

2.3.1 Mobile Speicherung von Wasserstoff

Die Speicherung von Wasserstoff in mobilen Speichern wird aktuell zum Transport bzw. bei der Nutzung innerhalb der verschiedenen Fahrzeugarten eingesetzt bzw. bei einem mittleren bis geringen Bedarf angewendet. Hierbei liegt das Speichervolumen für die verschiedenen Anwendungen im Bereich von wenigen Litern bis zu 100.000 Litern [11]. Bei den Arten der Behälter unterscheidet man zwischen Druck- und Flüssigkeitsspeichern.

Die zylindrische Bauart der Druckbehälter ergibt sich aus dem hohen Fülldruck und der damit zusammenhängenden Spannungsverteilung. Druckbehälter kommen vor allem als Tanks für Fahrzeuge mit Wasserstoffantrieb oder beim Transport über kurze bis mittlere Wegstrecken zum Einsatz. Hierbei werden diese unter hohem Druck (bis ca. 1000 bar) [11] mit gasförmigem Wasserstoff betankt. Derzeit gibt es vier verschiedene Typen von Druckbehältern. Typ 1 besteht aus einer metallischen Wand (meist aus Stahl) und hält Drücken bis zu 300 bar [11] stand. Typ 2 besitzt zusätzlich zu der metallischen Ummantelung eine äußere Schicht aus Glas- oder Kohlefaser und hält Drücken bis zu 1000 bar [11] stand. Dieser Bautyp kommt sehr häufig bei Tankstellen zum Einsatz. Aktuell werden hauptsächlich Druckbehälter von Typ 3 in Fahrzeugen mit Wasserstoffantrieb verbaut. Dieser besteht meist aus einer Innenschicht aus Aluminium und einer Außenhülle aus Kohlefaser. Die Arbeitsdrücke liegen hier zwischen 350 bar und 700 bar [11]. Zukünftig werden Druckbehälter des Typ 4 eingesetzt werden. Die Innenhülle besteht aus Kunststoff (Polyamid oder Polyethylen) und wird mit einer Schicht Kohlefaser ummantelt. Des Weiteren wird an Einschicht-Kohlenfaserzylindern geforscht, um vor allem das Gewicht des Tanks zu reduzieren und eventuell mit höheren Einfülldrücken arbeiten zu können.

Vor allem die gewichtsreduzierten Druckspeicher des Typs 3 und 4 werden bei Bussen, Lkw und Schienenfahrzeugen platzsparend entweder auf dem Dach oder an der Rückseite des Fahrerhauses platziert. Dies erhöht zusätzlich die Sicherheit bei Unfällen. Beim Einsatz von Druckbehältern in Fahrzeugen spielt das Druckniveau hinsichtlich der Füllmenge, der Betankungszeit und nicht zuletzt der Sicherheit eine wesentliche Rolle. Während die volumetrische Speicherdichte mit höher werdendem Druck steigt, so fällt die gravimetrische Speicherdichte (Energie pro Masse) ab einem Druck von 350 bar wieder ab. Des Weiteren kommt hinzu, dass Wasserstoff einen Realgasfaktor von >1 besitzt, d.h. dass bei zunehmendem Druck die Dichte in geringerem Maße zunimmt. Für den Einsatz im Pkw-Bereich (700 bar) bedarf es einem signifikant höheren Energieaufwand im Vergleich zu Tanks im Bus-/Lkw-Bereich (350 bar). Zusätzlich ist die Gefahr eines Austritts von Wasserstoff in Kohlefaserschichten des Druckbehälters aufgrund von Schichtausbeulung nach einer Druckentspannung und somit die Berstgefahr beim Wiederbefüllen des Behälters größer. Ein weiterer wichtiger Punkt ist der komplexere Betankungsprozess eines 700 bar Wasserstoffspeichers, besonders wenn kurze Betankungszeiten erreicht werden sollen. Eine wesentliche Herausforderung bei dem Betankungsvorgang ist die Kombination aus Hochdruck und reglementiertem Zeitfenster (SAE Protokoll-Betankungszeit Pkw ca. 3 Minuten). Das führt zu einer erheblichen Erwärmung des Wasserstoffs während der Befüllung. Auch wenn der Wasserstoff in der Tanksäule auf -40 °C gekühlt wird, steigt die Temperatur im Laufe des Tankvorgangs auf etwa 80 °C an [47, 48]. Zu hohe Temperaturen schädigen jedoch das Material der Ummantelung und müssen vermieden werden. Daher ist eine gute Durchmischung des Gases im Tank wichtig. Die Durchmischung sorgt dafür, dass das kalte zuströmende Gas in die heißen Bereiche eindringt und diese abkühlt [47]. Aufgrund der allgemeinen Anforderungen an die Kohlefaserwicklung hat sich die zylindrische Bauart durchgesetzt. Konische Formen bzw. Fahrzeugspezifische Formen sind entweder nicht umsetzbar oder es wird deutlich mehr Material benötigt [49].

Wird gasförmiger Wasserstoff auf unter -253 °C gekühlt, verflüssigt sich dieser und kann in speziellen Flüssigspeichern gelagert werden. Diese Art der Speicher wird vor allem beim Transport von Wasserstoff über weite Entfernungen oder von großen Mengen eingesetzt. Um ein Verdampfen des tiefkalten Flüssigwasserstoffes zu verhindern, erfordert es eine sehr starke Wärmedämmung des Tanks bzw. Speichers. Aktuell werden hierfür fast ausschließlich austenitische Edelstähle für die in der Regel doppelwandigen Speichertanks benutzt. Vorteil bei dieser Art der Speicherung ist unter anderem das Transportvolumen: Einem Liter tiefgekühlten flüssigem Wasserstoff entsprechen 840 Liter Gas [50] bei Normaltemperatur von ca. 25 °C . Trotz der zur Kühlung eingesetzten Energie (ca. 30% des im Gas enthaltenen Energieäquivalent [50]) lassen sich somit Lager- und Transportkosten deutlich senken [51, 50, 52]. Im Bereich der Wasser-

stoffversorgung werden beide Varianten dort eingesetzt, wo ein leitungsgebundenes Transportnetz nicht vorhanden und eine Errichtung wirtschaftlich nicht sinnvoll ist. Ergänzend werden mobile, intelligente Speicher-Verdichter-Einheiten entwickelt [53, 54], um die H₂-Infrastrukturücke zu schließen und eine H₂-Nutzung bedarfsgerecht zu ermöglichen.

2.3.2 Stationäre Speicherung von Wasserstoff

Die stationäre Speicherung von Wasserstoff erfolgt entweder in obertägigen Speicheranlagen oder als untertägige Speicherung und wird vor allem bei einem großen Wasserstoffbedarf eingesetzt. Die Technologie der Behälter der obertägigen Speicheranlagen ist vergleichbar zu den in Kapitel 2.3.1. beschriebenen Druckbehältern des Typs 1-4. Der einzige Unterschied hierbei ist die Speicherkapazität der Behälter, die in diesem Fall deutlich höher ist. In den meisten Fällen spielt dabei das Gewicht der Behälter keine wesentliche Rolle, weshalb ein Großteil der Speicherbehälter aus Stahl bzw. Metall mit Kohlefaserummantelung gefertigt sind. Wo große Stahltanks aufgrund von baurechtlichen Vorschriften oder aus Platzbedarf nicht eingesetzt werden können, werden mehrere kleine miteinander verbundene Behälter in einem Container oder einfach nur in einem Stahlrahmen verwendet [11].

Ist der Wasserstoffbedarf extrem hoch, z.B. in Regionen, in denen er in der Industrie eingesetzt werden soll, kann möglicherweise auf eine untertägige Speicherung zurückgegriffen werden. Da sich Wasserstoff wie Erdgas über einen langen Zeitraum und in großen Mengen speichern lässt, können auch hier vorhandene Poren- oder Hohlraum-speicher eingesetzt werden.

Heimische Erdgasquellen decken nur ca. 20 Prozent des tatsächlichen Erdgasbedarfes in Deutschland ab (ca. 90 Mrd. m³ jährlich), der Hauptanteil muss aus dem Ausland importiert werden. Zum Ausgleich von Mengenspitzen im Winter und für die damit verbundene Sicherstellung der flächendeckenden Gasversorgung, aber auch hinsichtlich geringer Betriebskosten werden in Deutschland aktuell an 40 Standorten Untergrundgasspeicher betrieben. Die Lage der Standorte ist sowohl von den geologischen Gegebenheiten als auch von ihrer Wirtschaftlichkeit abhängig. Die geologischen Gegebenheiten haben maßgeblichen Einfluss darauf, welche Art des Untergrundspeichers gewählt wird [55–57].

Bei Porenspeichern wird auf die natürliche geologische Gegebenheit des Gesteins zurückgegriffen. Das Gas wird in die vorhandenen Lagerstätten gefüllt und poröse Gesteinsschichten nehmen es wie einen Schwamm auf (Lagerstätten-speicher), bzw. dort eingelagertes Wasser wird beim Einspeisen des Gases verdrängt (Aquiferspeicher). Das Austreten des Gases wird durch eine darüberliegende, abdichtende Gesteinsschicht verhindert.

Hohlraum-speicher (Kavernen) hingegen sind künstlich erzeugte Lagerstätten hauptsächlich in ehemaligen Salzstollen. Diese liegen normalerweise hunderte Meter unterhalb der Erdoberfläche, in bestimmten Gebieten in bis zu 2500 m Tiefe. Hohlräume von bis zu 100 m Durchmesser und bis zu 180 m Höhe entstanden, nachdem das Salz zutage gefördert wurde und in diesen wird nun das Gas gespeichert. Diese vorhandenen Hohlräume können aufgrund ihrer Betriebssicherheit und ihrer Dichtigkeit sehr gut zur Wasserstoffspeicherung genutzt werden. Das Steinsalz Halit dichtet die Kaverne aufgrund seiner äußerst geringen Durchlässigkeit gegenüber Wasserstoff hervorragend ab und besitzt zusätzlich eine inerte Eigenschaft. Des Weiteren ist eine Belastung durch eventuell vorhandene Bakterien oder organische bzw. anorganische Verbindungen minimal. Dem gegenüber stehen hohe Betriebskosten für die technische Ausstattung der Speicher, unter anderem für Pumpen und Rohrleitungssysteme [21, 57, 49].

2.3.3 Alternative Speichertechnologien

Neben den oben genannten Volumenspeicherarten kann Wasserstoff auch in Lösungen bzw. Verbindungen mit verschiedenen Stoffen gespeichert werden. Diese Art der Speicherung lässt sich in drei Kategorien einteilen.

Durch eine Einlagerungsverbindung mit Metallen (u.a. Palladium, Magnesium und Lanthan) kann Wasserstoff in Hydridspeichern gespeichert werden. Der Wasserstoff wird adsorbiert und unter Wärmeabgabe in die Metallstruktur eingebunden. Nachteil des Verfahrens ist der hohe Wärmeeinsatz und der damit verbundene Kostenaufwand. Vorteilhaft ist die Filterwirkung des Metalls, beim Ausspeichern wird hochreiner Wasserstoff freigesetzt.

Eine weitere Möglichkeit ist die LOHC-Speicherung (LOHC = liquid organic hydrogen carrier). Ungesättigte Kohlenwasserstoffe nehmen Wasserstoff auf und speichern ihn. Vorteile dieser Speicherung ist der einfachere Transport in konventionellen Tanks, da es sich bei der Verbindung nicht mehr um ein leicht flüchtiges Gas handelt. Nachteilig wirken sich die benötigte Wärmezufuhr zur Freisetzung und die anschließende Reinigung von LOHC-Dampf aus.

Bei Oberflächenspeichern werden Wasserstoffmoleküle durch Adsorption an Materialien mit hoher spezifischer Oberfläche (z.B. Zeolithe oder Carbon Nanotubes) gebunden. Diese Art der Speicher befindet sich aktuell noch in der Entwicklungsphase [51, 57].

2.3.4 Arten und Aufbau von Wasserstofftankstellen

Das Wasserstofftankstellennetz in Deutschland beinhaltet derzeit 93 aktive und 16 Stationen in der Planungs-, Genehmigungs-, Ausführungs- und Inbetriebnahmephase ([5] Stand:07.Februar 2023); diese Zahl hat sich seit November 2016 fast vervierfacht. Der Verteilungsschwerpunkt der Tankstellen liegt hierbei im westlichen und südlichen Teil Deutschlands. Verantwortlich für den flächendeckenden Ausbau des öffentlichen Tankstellennetzes in Deutschland ist die H₂Mobility Deutschland GmbH & Co KG, ein Zusammenschluss der wichtigsten Unternehmen im Bereich der Wasserstofftechnologien: Daimler, Linde, OMV, Air-Liquide, Total und Shell. Ein Großteil dieser Firmen sind gleichzeitig Betreiber der einzelnen Tankstationen.

Technisch sind die Tankstellen zurzeit hauptsächlich für eine Pkw- und Nutzfahrzeug-Nutzung ausgelegt, nur ein geringer Teil der öffentlichen Anlagen sind auch durch Busse bzw. den Schwerlastverkehr nutzbar. Aktuell sind es 17 Tankstellen ([5] Stand:07. Februar 2023) – die Ansiedlung erstreckt sich von Nürnberg, Stuttgart, Frankfurt am Main, Köln, Düsseldorf, Münster in den Norden Deutschlands. Für die unterschiedliche Nutzbarkeit ist die Speicherart in den Fahrzeugen wesentlich: Die meisten Brennstoffzellenbusse, leichte Nutzfahrzeuge, mittelschwere Nutzfahrzeuge und schwere Nutzfahrzeuge verwenden die gasförmige 350 bar Speicherart – volumetrische Speicherkapazität 0,8 kWh/l [58]. Infolgedessen ist die Reichweite durch den Fahrzeugaufbau und Speicherkapazität eingeschränkt. Im Vergleich zur gasförmigen 350 bar Speicherart verfügt die gasförmige 700 bar Speicherart über eine höhere volumetrische Energiedichte 1,3 kWh/l [58], wodurch die speicherbare Wasserstoffmenge erhöht und die Fahrzeugtankabmessungen reduziert werden können. Heute sind alle Brennstoffzellen-Pkw mit der 700 bar Technologie ausgestattet. Ergänzt sei erwähnt, dass seit dem Jahr 2021 in Deutschland auch Müllsammelfahrzeuge mit der 700 bar Technologie im Einsatz [58]. Ähnliche Entwicklungen werden im Bereich der schweren Nutzfahrzeuge erwartet, um den Reichweitenanforderungen zu entsprechen. Alternativ zur gasförmigen Technologie für schwere Nutzfahrzeuge ist die Verflüssigung von Wasserstoff.

Als Vorteil wäre eine signifikante Reichweitenerweiterung bei gleichem Tankvolumen oder eine höhere Ladekapazität für die Nutzlast bei gleichbleibender Reichweite zu nennen. Ein Nachteil dieser Technologie hingegen ist der hohe Energieaufwand zum Herunterkühlen des Gases auf -253°C (ca. 30% des Energieinhaltes vom Wasserstoff werden hierfür zur Kühlung benötigt). Des Weiteren entstehen sogenannte Boil-Off-Verluste: Bei kryogenem Wasserstoff kommt es innerhalb des Tankes trotz guter Wärmedämmung zu einer teilweisen Verdampfung des Wasserstoffs. Das entstehende Gas muss regelmäßig abgelassen werden, um einen Überdruck innerhalb und ein eventuelles Bersten des Tankes zu verhindern [7, 59, 60].

Aufbauend auf die erläuterten Anwendungsgebiete von gasförmigem und flüssigem Wasserstoff wird der rudimentäre Aufbau von flüssig und gasförmigen Wasserstoff-tankstellen dargestellt und beschrieben.

Allgemein wird unabhängig vom Aggregatzustand Wasserstoff eingangs bei den Tankstellenkonzepten zwischen On-Site und Off-Site-Wasserstoffherzeugung unterschieden. Die Wasserstoffbereitstellung durch On-Site-Elektrolyse auf dem Tankstellengelände ist im Hinblick auf die H_2 -Logistik am einfachsten, da aufwändige Transport- und Logistikkosten sowie Systeme entfallen. Dem gegenüber stehen durch die Vor-Ort-Nutzung/Produktion aufwendige Genehmigungsverfahren und Sicherheitskonzepte. Die Wasserstoffproduktion über die Off-Site-Elektrolyse in direkter Nähe von EE-Anlagen mit anschließendem H_2 -Transport zur H_2 -Tankstelle bietet eine individuelle Nutzung und Bezugsvariante, jedoch gehen damit erhöhte Transport- und Logistikkosten einher. Alternativ kann die Wasserstoffversorgung der Tankstelle via Pipeline erfolgen. Die Entscheidung über On-Site oder Off-Site ist ebenfalls abhängig von der Flächenverfügbarkeit und der Umschlagmenge. Die benötigte technische Ausstattung der Tankstelle ist wiederum von der Art der Versorgung abhängig.

In Abbildung 1 ist ein schematischer, beispielhafter Aufbau der Infrastruktur einer Wasserstofftankstelle mit einer On-site Anlage und der Anlieferung des Wasserstoffs per Lkw dargestellt. Aufgrund der Herstellung des Wasserstoffs durch das Elektrolyseverfahren, bei dem dieser mit einem Maximaldruck von 50 bar erzeugt werden kann, wird der Wasserstoff in einem Niederdruckspeicher zwischengespeichert. Das Gleiche gilt für Tankanlagen mit einer Anlieferung von vorkomprimiertem Wasserstoff (200 bar) per Lkw. In einem zweiten Schritt wird der zwischengespeicherte Wasserstoff nachgereinigt, um den geforderten Reinheitsgrad für die Brennstoffzellennutzung zu erreichen. Anschließend wird der Wasserstoff in zwei weiteren Schritten auf 900 bar verdichtet und in einem Hochdruckspeicher bevorratet. Diese Art der Speicherung wird als Kaskadenspeicherung bezeichnet. Das Fahrzeug wird beim Tankvorgang aus den verschiedenen Druckspeichern versorgt. Das hat den Vorteil, dass die notwendige Kompressionsarbeit und die Belastungen der verschiedenen Tanks sinken und dadurch Energiekosten bzw. Investitionskosten reduziert werden können. Eine weitere Alternative ist der Einsatz von Booster-Kompressoren nach den Niederdruckspeichern. Hierbei wird der Wasserstoff während des Tankvorgangs direkt von ca. 450 bar auf 900 bar komprimiert und in einen Dispenser gespeist. Dadurch wird ein weiterer Hochdrucktank eingespart, aber die Möglichkeit einer höheren Wasserstoffbevorratung durch einen zusätzlichen Tank wird dadurch reduziert. Der abschließende Schritt der Wasserstoffbetankung des Fahrzeuges geschieht mit Hilfe der Dispensereinheit (Tanksäule). Hierbei ist es notwendig, die beim Verdichtungsprozess auftretenden hohen Gastemperaturen auf ca. -40°C herunter zu kühlen, damit zum einen der Wasserstofftank keinen Schaden nimmt und zum anderen das Fahrzeug innerhalb der definierten Zeit gemäß SAE Protokoll befüllt werden kann.

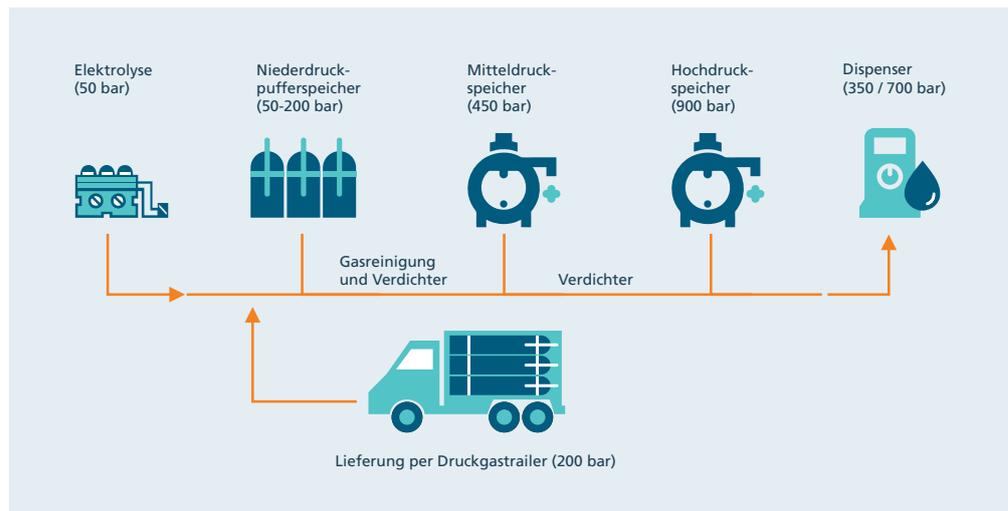


Abb. 1:
Schematische Darstellung der
Infrastruktur einer Wasser-
stofftankstelle (druckgasförmig) Quelle: Fraunhofer IFF

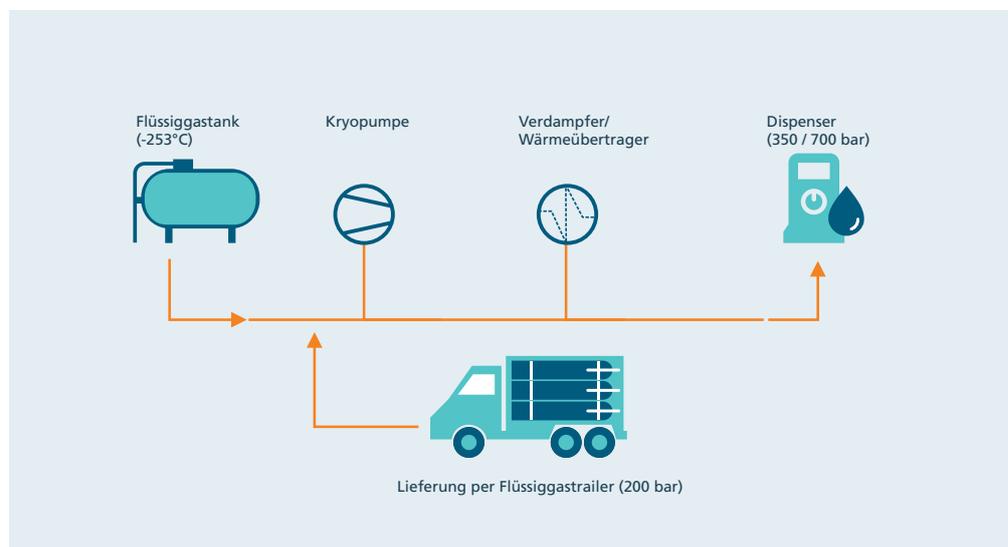


Abb. 2:
Schematische Darstellung der
Infrastruktur einer Wasser-
stofftankstelle (flüssiggas) Quelle: Fraunhofer IFF

Weitere wichtige technische und wirtschaftliche Parameter hinsichtlich der Ausstattung von Wasserstofftankstellen für den Schwerlastverkehr und Busse sind aufgrund von höheren Bedarfsmengen unter anderem:

- Maximale Kapazität des Elektrolyseurs bei On-site-Produktion
- Maximale Speicherkapazität vor Ort/gesetzlich erlaubte Lagermenge
- Maximale Kapazität des Verdichters
- Fahrzeugaufkommen vor Ort, damit verbundene Wasserstoffnachfrage
- Maximale Durchsatzmenge
- Anzahl und Art der Dispenser

Abgeleitet aus diesen Parametern ergibt sich anschließend die Größe und die technische Auslegung der Tankstation und letztendlich die Anzahl der versorgten Fahrzeuge pro Station.

Neben den stationären Tankstellen gibt es auch die Möglichkeit von mobilen Tankstellen. Diese kommen zum Einsatz, wenn der Bedarf von Wasserstoff an einem Ort sehr begrenzt bzw. nur temporär ist, oder verschiedene Verbraucher innerhalb eines bestimmten Bereiches mit Wasserstoff versorgt werden müssen. Zwei verschiedene Arten von mobilen Tankstellen sind derzeit auf dem Markt: Das einteilige System [61], bei dem alle benötigten Komponenten auf einem Gestell verbaut sind, und das zweiteilige System [62], das aus einer Speicher- und einer Versorgungseinheit besteht. Beide Sys-

teme können sowohl für eine 350 bar- als auch für eine 700 bar-Betankung genutzt werden. Das einteilige System hat mitunter keinen Verdichter, wodurch eine Betankung durch Überströmen erfolgt. Ansonsten hat das 20 ft Containersystem einen 450 bar Druckspeicher, Kommunikations- und Steuerungs- sowie Regelungssysteme und eine Dispensereinheit. Das zweiteilige System besteht üblicherweise aus einem 20ft-Speichercontainer mit 300 bar Speicherdruck und einem 40ft-Versorgungscontainer mit einem 500 bar Pufferspeicher, einem Verdichter und einer Dispensereinheit, die für Fahrzeuge mit 350 bar-Technologie eingesetzt werden kann. Beide Container können mit einem konventionellen Wechselbrücken-Lkw transportiert werden.

2.4 Wasserstoffverteilung und Infrastruktur

Neben der Erzeugung und der Speicherung ist die Verteilung die dritte wichtige Säule für eine flächendeckende Versorgung von Wasserstoff innerhalb von Deutschland bzw. international. In den folgenden Abschnitten werden verschiedene Arten der Transportmöglichkeiten und die dazu benötigten Komponenten beschrieben.

2.4.1 Mobiler Transport von Wasserstoff

Im Bereich des Fahrzeugtransportes gibt es drei Optionen, Wasserstoff entweder in Reinform oder als Verbindung vom Erzeuger zum Nutzer zu transportieren. Die Entfernung zwischen Erzeuger und Nutzer bzw. die Menge des zu transportierenden Wasserstoffs sind hierbei die wesentlichen Auswahlkriterien. Im globalen Transport über lange Wegstrecken wird Wasserstoff in Form flüssiger Verbindungen per Tankschiff transportiert. Hierbei werden hauptsächlich konventionelle Tankschiffe eingesetzt. Als sogenannter »Träger« kommen entweder Ammoniak oder organische Wasserstoffverbindungen wie Toluol/Methylcyclohexan zum Einsatz. Vorteil dieser Variante ist die Nutzung bestehender Infrastrukturen für den Transport der Erdöl- bzw. Petrochemie. Nachteilig hingegen ist die Toxizität von Ammoniak, sie erfordert eine sorgfältige Handhabung, die nur durch zertifizierte Unternehmen durchgeführt werden darf. Seit kurzem werden zum Transport von reinem Wasserstoff auch Spezialschiffe z.B. auf der Route zwischen Japan und Australien eingesetzt. Hierbei wird der Wasserstoff in einem auf -253°C gekühlten Flüssigkeitsbehälter mit einem Volumen von ca. 1250 m^3 transportiert. Nachteilig hierbei ist der hohe Energieaufwand zu Kühlung, sowie der CO_2 -Fußabdruck des Transportes, da bei beiden Methoden Schweröl als Treibstoff eingesetzt wird. Beim transkontinentalen Transport wird der Wasserstoff hauptsächlich per Schiene transportiert, und national bzw. für den Transport auf »der letzten Meile« kommen vor allem Lkw zum Einsatz. Im Gegensatz zum Schifftransport wird per Bahn und Lkw sowohl flüssiger als auch gasförmiger Wasserstoff transportiert. In flüssiger Form stehen großvolumige Tanks zur Verfügung, für gasförmigen Wasserstoff werden Container mit liegenden bzw. stehenden Flaschenbündeln eingesetzt [21, 51, 63].

2.4.2 Wasserstoffversorgung via Pipelinesystem

Ein Pipelinesystem als Transportnetz wäre eine geeignete Transporttechnologie für eine flächendeckende und großmaßstäbliche Nutzung von Wasserstoff, vergleichbar zum heutigen Erdgasnetzes. Vor allem bei langen Wegstrecken bzw. hohen Durchsätzen könnte Wasserstoff damit wirtschaftlich von der Produktionsstätte zur Nutzungsstätte oder von Häfen zu Hubspots transportiert werden. Aktuell hat das bestehende Verteilungsnetz für Wasserstoff in Deutschland nur einen Umfang von ca. 400 km [51]. Um eine flächendeckende Versorgung zu gewährleisten, bedarf es einer deutlichen Erweiterung in den kommenden Jahren. Nach Aussagen der Gas-Fernleitungsbetreiber liegt der Bedarf in Zukunft bei ca. 6000 km [64] (siehe Abbildung 3).

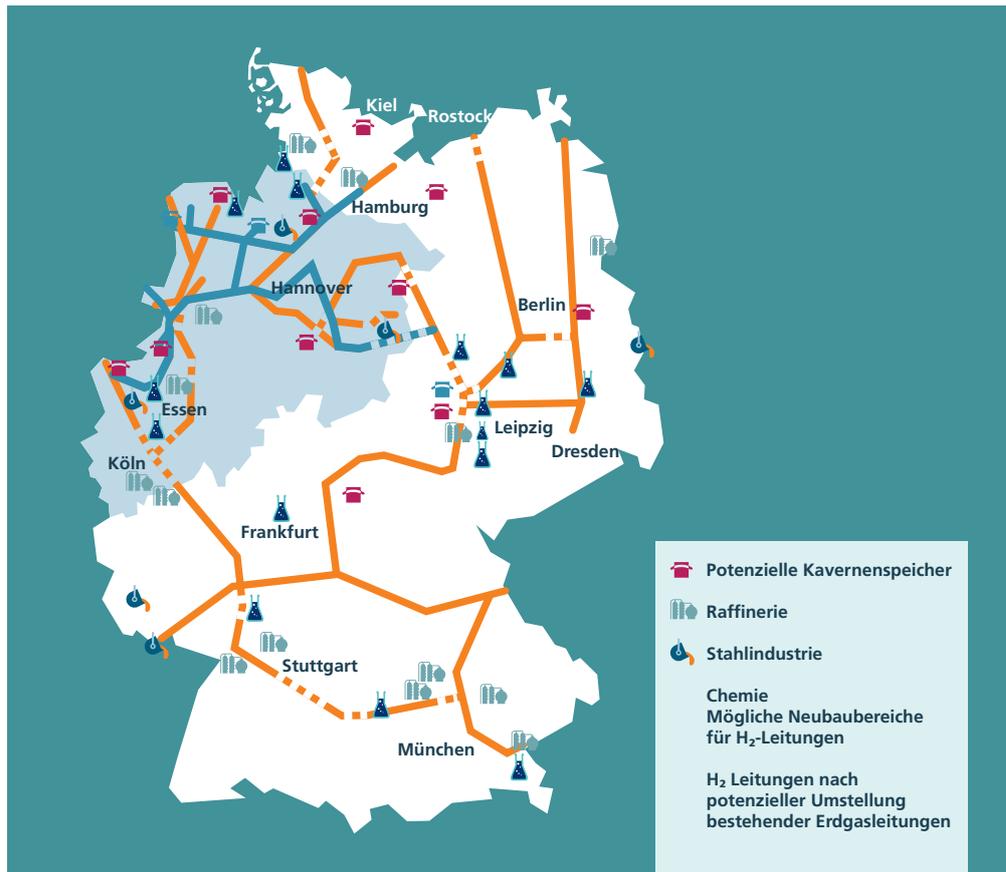


Abb. 3:
Darstellung eines möglichen
Wasserstoffverteilungsnetzes
in Deutschland [65]

Aufgrund hoher Investitionskosten für ein neues Pipelinesystem ist es sinnvoll, in den kommenden Jahren nicht mehr genutzte Erdgasleitungen zu nutzen. Neben hohen Investitionskosten für einen Neubau können lange Planungszeiten und aufwändige Genehmigungsverfahren einen deutlichen Nachteil darstellen. Vorteile hingegen sind eine extrem hohe Versorgungssicherheit, eine hohe Abgabemenge pro Tag und somit die Gewährleistung eines hohen Durchsatzes an den Tankstellen, sowie ein geringer Platzbedarf vor Ort bzw. keine zusätzlichen CO₂-Emissionen für den Transport [51, 66].

2.4.3 Zusatzkomponenten innerhalb der Wasserstoffversorgung

Um die Wasserstoffbereitstellung mit Hilfe von Gasdrucktanks gewährleisten zu können, muss Wasserstoff sowohl für den stationären als auch für den mobilen Einsatz sowie für den Transport via Pipeline komprimiert werden. In Abhängigkeit vom benötigten Speicherdruck werden unterschiedliche Arten von Verdichtern eingesetzt. In der Praxis werden vorrangig Verdängermaschinen eingesetzt, da Turbomaschinen aufgrund der hohen Spaltverluste ungeeignet sind [67].

Bei kleinen, bis mittleren Mengen werden in der Regel Membrankompressoren zum Verdichten eingesetzt, bei mittleren bis großen Mengen Kolbenverdichter. Bei diesen Verdichtertypen sind Verluste nicht komplett zu vermeiden. Beim Verdichten von Wasserstoff entweicht dieser durch die Dichtungen oder wird im Schmieröl des Verdichters absorbiert. Der Gesamtverlust beim Verdichten wird allgemein mit 0,5 % der Gesamtmasse beziffert [68, 69]. Eine weitere Möglichkeit der Verdichtung ist der Einsatz von ionischen Verdichtern. Das Gas wird mit Hilfe einer beweglichen Flüssigkeitssäule, die gleichzeitig als Kühl- und Schmiermittel dient, verdichtet. Eine erhöhte Energieeffizienz durch eine bessere Kühlung, die Vermeidung von Totraum beim Verdichtungsprozess und die Vermeidung von Verunreinigungen des Wasserstoffs durch eingesetzte Schmiermittel sind Vorteile dieses Verfahrens [64, 70].

Eine weitere Möglichkeit der Aufbereitung zur Speicherung von Wasserstoff ist die Verflüssigung. Bei diesem Verfahren wird der Wasserstoff im ersten Schritt mittels Druckverdichtern auf ca. 20 bar komprimiert. Im zweiten Schritt wird der komprimierte Wasserstoff in einem mehrstufigen Verfahren auf -253°C heruntergekühlt. Bei -253°C ist der Siedepunkt des Gases erreicht und es kondensiert. Im dritten Schritt wird der flüssige Wasserstoff in den entsprechenden Flüssiggastank gepumpt. Die Kapazität von Verflüssigern liegt zwischen wenigen 100 L/h bis zu ca. 20.000 L/h [64, 70, 71]. In Verbindung mit der einführenden Erläuterung der Wasserstoffverdichtung werden die erwähnten Verdichtermaschinen im Kontext gasförmiger und flüssiger Wasserstoff beschrieben.

Kolbenverdichter: Das Verdichtungsprinzip beruht auf einem klassischen Zylinder mit definiertem Zylinderraum (häufig 1:10 Verdichtungsverhältnis). In der Anwendung hat es sich etabliert, dass in mehreren Stufen mit Zwischenkühlung verdichtet wird. Zum Einsatz kommen aufgrund der Reinheitsanforderung des Wasserstoffs ölfreie Kolbenkompressoren [67] [72].

Membranverdichter: Durch eine nicht lineare Bewegung wird eine flexible Metallmembran in Bewegung versetzt, wodurch der Wasserstoff verdichtet wird [67].

Ionische Verdichter: Das Gas wird mit Hilfe einer beweglichen Flüssigkeitssäule, die gleichzeitig als Kühl- und Schmiermittel dient, verdichtet. Eine erhöhte Energieeffizienz durch eine bessere Kühlung, die Vermeidung von Totraum beim Verdichtungsprozess und die Vermeidung von Verunreinigungen des Wasserstoffs durch eingesetzte Schmiermittel sind Vorteile dieses Verfahrens [72].

Kryopumpe: Bei Flüssigwasserstoff wird zur Verdichtung eine Kryopumpe verwendet. In der Regel sind diese im Vergleich zu den Kompressoren für gasförmigen Wasserstoff kompakter und arbeiten effizienter [67][72].

2.5

Einsatz von Wasserstoff in verschiedenen Wirtschaftssektoren

Der Einsatz von Wasserstoff in Industrieprozessen und in der Energiewirtschaft ist einigen Anwendungsgebieten weit verbreitet bzw. integraler Bestandteil der Energiewende in einzelnen Sektoren. Im Verkehrssektor steht die Entwicklung aktuell am Anfang. In den folgenden Abschnitten werden die aktuellen Nutzungsarten von Wasserstoff in den verschiedenen Sektoren beschrieben.

2.5.1

Wasserstoff als Alternative in der konventionellen Stahlherstellung

Die Nutzung von Wasserstoff in der Stahlherstellung ist eine Alternative zur konventionellen Stahlproduktion. Bei dieser wird normalerweise Eisenerz und Koks in den Hochofen befüllt. Dieses Gemisch wird bei ca. 2000°C erhitzt und zusätzlich Kohlenstoff zugeführt. In der Natur liegt Eisen nur in oxidierter Form vor (Fe_3O_4). Durch die Zuführung von Kohlenstoff (C) wird dem Eisenoxid Sauerstoff (O_2) entzogen und es entsteht sowohl reines Eisen (Fe) als auch Kohlenstoffdioxid (CO_2).

Zur Reduzierung bzw. auf langfristige Sicht Vermeidung von CO_2 -Emissionen wird versucht, den Kohlenstoff durch Wasserstoff zu ersetzen und auf Koks komplett zu verzichten. Hierbei soll dem Hochofen nur Eisenerz (Fe_3O_4) und heißer Wasserstoff (H_2) zugeführt werden. Statt klimaschädlichem CO_2 entsteht dabei reines Eisen (Fe) und Wasser (H_2O). Eisen aus der Herstellung mit Wasserstoff hätte im Vergleich zur konventionellen Herstellung eine deutlich bessere Qualität. Verschmutzungen unter anderem durch Schwefel und Phosphor werden bei diesem Verfahren vermieden [73].

2.5.2

Wasserstoff als Grundstoff in der chemischen Industrie

Auch in der chemischen Industrie ist Wasserstoff einer der wichtigsten Grundstoffe, unter anderem bei der Herstellung von Ammoniak, Harnstoff, Methanol oder synthetischer Kraftstoffe. Der Ammoniakbedarf in Deutschland lag 2018 bei ca. 3 Mio. Tonnen [51] und weltweit bei etwa 175 Mio. Tonnen [51]. Ammoniak wird unter anderem in der Düngemittel-, Sprengstoff- oder Kunststoffherstellung bzw. bei der Produktion von synthetischen Fasern eingesetzt. Mit Hilfe der Dampfreformierung wird aus Erdgas Wasserstoff erzeugt, anschließend mit Stickstoff zugesetzt und beides in Ammoniak umgesetzt wird. Die Ausbeute hierbei ist dabei relativ gering, sie liegt bei ca. 0,2 kg Ammoniak [51] pro eingesetztem kg Wasserstoff. In einem weiteren Prozessschritt wird Harnstoff erzeugt, der unter anderem in der Düngemittelindustrie oder in Kosmetika eingesetzt wird.

Ein weiterer Einsatzbereich von Wasserstoff ist die Herstellung von Methanol, welches entweder als Kraftstoffzusatz, als Grundstoff für verschiedene chemische Produkte oder als Energielieferant in der Brennstoffzelle eingesetzt wird. Die Herstellung von Methanol erfolgt über die katalytische Hydrierung von Kohlenmonoxid. Dabei wird ein Gemisch aus Kohlenmonoxid und Wasserstoff über geeignete Katalysatoren geleitet. Unter Druck und erhöhter Temperatur entsteht nahezu ausschließlich Methanol. Des Weiteren spielt Wasserstoff eine wesentliche Rolle als Aufbereiter oder zur Veredelung kohlenwasserstoffbasierter Kraftstoffe zu synthetischen Kraftstoffen. Diese werden unter anderem in der Luftfahrt, im Motorsport oder als Speichermedium für erneuerbare Energien eingesetzt [73].

2.5.3

Wasserstoff als Energielieferant

In der energetischen Nutzung spielt Wasserstoff heutzutage eine immer größer werdende Rolle, vor allem im Bereich der dezentralen Energieversorgung. Dabei lässt sich aus Wasserstoff sowohl Strom und Wärme als auch eine Kombination aus beiden, der sogenannten Kraft-Wärme-Kopplung, erzeugen. Der größte Teil der energetischen Nutzung findet in Brennstoffzellen statt, aber auch Gasturbinen, die für eine Nutzung mit Wasserstoff angepasst werden, erzeugen Strom und Wärme aus Wasserstoff. Durch Änderung der Brennstoffzuführung und am Verbrennungssystem innerhalb der Gasturbine wird diese von konventionellen Erdgasbetrieb auf den Einsatz von Wasserstoff umgerüstet.

Das Brennstoffzellenprinzip wurde um 1840 entdeckt. Hierbei handelt es sich um eine Reaktion von kontinuierlich zugeführtem Wasserstoff mit Sauerstoff. Durch die räumliche Trennung in zwei Halbzellen – über Elektrolyte, Membran und/oder Diaphragma – wird verhindert, dass die beiden Stoffe zu einem explosiven Knallgas reagieren, so dass eine kontrollierte Reaktion stattfinden kann. Es findet also der Umkehrprozess der Elektrolyse statt, die Rekombination aus Sauerstoff und Wasserstoff zu Wasser unter Produktion von Gleichstrom. Des Weiteren bedarf es verschiedene Baugruppen wie, z.B. eine Brennstoff-, Luft- und Abgaskonditionierung, ein Kühl-/Stromkreislauf, einen Befeuchtungsstrang, Mess- und Regeltechnik sowie Sicherheitseinrichtungen und Zusatzgeräte für den Anfahrbetrieb.

Im Allgemeinen wird die Brennstoffzelle in verschiedene Typen kategorisiert, abhängig von der Art des Elektrolyten und der Betriebstemperatur. Es gibt fünf verschiedene Arten von Elektrolyten und drei verschiedene Temperaturbereiche: Niedrigtemperatur bei unter etwa 100°C, mittlere Temperatur über 100°C sowie den Hochtemperaturbereich oberhalb von 500°C. Die folgende Tabelle stellt die unterschiedlichen Arten der Brennstoffzellentypen anhand ihrer Systemspezifikationen und Vor- bzw. Nachteilen dar:

	AFC¹	PEMFC²	PAFC³	MCFC⁴	SOFC⁵
Betriebstemp. [C°]	60 - 90	50 - 180	160 - 220	600 - 700	700 - 1.000
Elektrolyt	Kalilauge	Polymermembran	Phosphorsäure	Karbonat-schmelze	Oxidkeramik
Brennstoff	H ₂	H ₂ , Erdgas, Biogas, Methanol	H ₂ , Erdgas, Biogas, Methanol	H ₂ , Erdgas, Biogas, Methanol	H ₂ , Erdgas, Biogas, Methanol
Oxidant	O ₂ (rein)	O ₂ (Luft)	O ₂ (Luft)	O ₂ (Luft)	O ₂ (Luft)
Wirkungsgrad η_{el} [%]	50 - 60	30 - 60	30 - 40	55 - 60	50 - 70
Lebenserwartung [h]	5.000 - 8.000	bis zu 60.000	bis zu 60.000	bis zu 40.000	bis zu 90.000
Dynamik	hoch	—————→			niedrig
Start-Up-Time	Sekunden	—————→			Stunden
Investitionskosten [€/kW]	200 - 700	3.000 - 4.000 (stationär) 500 (mobil)	4.000 - 5.000	4.000 - 6.000	3.000 - 4.000
Vorteile	– Kompakte Bauweise – preisgünstige Katalysatoren	– hohe Leistungsdichte – einfacher Aufbau	– hohe Lebenserwartung – weniger anfällig ggü. CO	– Einsatz h ₂ -haltiger Gase – kein Edelmetall erforderlich	– keine Edelmetalle – hohe Strömdichte
Nachteile	– reiner Sauerstoff nötig – geringe Haltbarkeit	– hohe Baukosten – Verwendung von Edelmetall-Katalysatoren	– nicht Lastwechsel geeignet – hohe Materialkosten	– Hochtemperaturfeste Materialien erforderlich – giftige und entzündliche Reaktanden	– Hochtemperaturfeste Materialien erforderlich – hohe Anlaufzeit

¹ AFC: Alkalische Brennstoffzelle/Alkaline Fuel Cell

² PEMFC: Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzelle/Proton Exchange Membrane Fuel Cell

³ PAFC: Phosphorsäure-Brennstoffzelle/Phosphoric Acid Fuel Cell

⁴ MCFC: Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle/Molten Carbonate Fuel Cell

⁵ SOFC: Oxidkeramische Brennstoffzelle/Solid Oxide Fuel Cell

Tab. 3:
Überblick verschiedener Brennstoffzellentypen mit ausgewählten Systemspezifikationen [15, 74, 75, 51]

In netzfernen Gebieten können stationäre Brennstoffzellen zur dezentralen Stromversorgung eingesetzt werden. Sie garantieren, z.B. eingesetzt als Notstromaggregat, eine unterbrechungsfreie Versorgung mit Strom. Telekommunikations- und IT-Anlagen, Funktürme oder Datenverarbeitungszentren können dadurch gegen Netzschwankungen und kurzfristige Ausfälle deutlich besser geschützt werden.

Beim Einsatz von Kraftwärmekopplung wird neben dem erzeugten Strom auch noch die entstehende Wärme genutzt. Hierbei wird die Abwärme der Brennstoffzelle zur Deckung eines Teiles des Wärmebedarfs von Gebäuden mit niedrigem Raumwärmebedarf, wie er bei Niedrigenergie- oder Passivhäusern vorkommt, genutzt. Vorteil der Kraftwärmekopplung mit Hilfe einer Brennstoffzelle ist der hohe thermische Wirkungsgrad von bis zu 95% bzw. der elektrische Wirkungsgrad von bis zu 45%. Nachteilig sind die aktuell noch hohen Investitionskosten gegenüber einer Brennwertheizung [51].

2.5.4 Nutzung im Verkehrssektor

Neben der Herstellung und dem Transport von Wasserstoff sind die Fahrzeuge die dritte Säule der Wasserstoffinfrastruktur. Fahrzeugklassifikation, Antriebs- und Einsatzarten bzw. die Fahrzeugverfügbarkeit am Markt spielen eine wesentliche Rolle in der erfolgreichen Umsetzung und des Aufbaus einer ökologischen, aber auch ökonomischen Infrastruktur. Innerhalb dieses Kapitels werden die verschiedenen Punkte dargestellt und soweit möglich deren Vor- bzw. Nachteile aufgezeigt. In der Anlage der Studie werden alle recherchierten Fahrzeugarten/-typen im Bereich des Verkehrssektors mit den wichtigsten Parametern in einer Tabelle beschrieben.

Im Verkehrssektor gibt es im Wesentlichen zwei Arten des Wasserstoffantriebes: der Brennstoffzellen-Antrieb und der Wasserstoffverbrennungsmotor. Die Geschichte des Wasserstoffverbrennungsmotors ist über 200 Jahre alt, aber erst im Jahr 2000 brachte BMW eine kleine Stückzahl auf den Markt, 2007 folgten weitere 100 Fahrzeuge [76]; auch Mercedes arbeitete zur gleichen Zeit an dieser Technologie. Die Funktionsweise ist vergleichbar mit der des Ottomotors: Wasserstoff wird dem Verbrennungsraum zugeführt, verdichtet und anschließend gezündet. Für Nutz- und Schwerlastfahrzeuge werden aktuell auch Versuche durchgeführt, Dieselaggregate zu verwenden. Vorteile dieser Antriebsart sind die geringen Emissionswerte, da nur Wasserdampf und ein sehr geringer Anteil von Stickoxid als Verbrennungsprodukte entstehen. Des Weiteren hat der Wasserstoffverbrennungsmotor einen höheren Wirkungsgrad und arbeitet effizienter als ein Otto-Motor. Trotz des höheren Wirkungsgrades ist seine Leistung deutlich geringer, d.h. bei gleichem Motorvolumen erreicht er weniger Leistung. Ein weiterer negativer Punkt gegenüber einem konventionellen Motor ist die erforderliche Kühlung des Wasserstoffs auf -253 °C und der damit verbundene Aufwand der Isolation. Beide Punkte führten dazu, dass diese Antriebsart sich auf dem Markt bis dato nicht durchgesetzt hat [76, 77, 49].

In allen aktuell auf dem Markt vorhandenen Fahrzeugen kommen hauptsächlich Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzellen (PEMFC) zur Anwendung. Aufgrund ihrer hohen Lebensdauer, des geringen Bauraumbedarfs und vor allem wegen ihrer sehr guten Kaltstarteigenschaft werden PEMFCs bevorzugt. Vor allem bei Temperaturen unter dem Gefrierpunkt kann es bei anderen Brennstoffzellenarten zu Funktionsschwierigkeiten kommen, da das »Abfallprodukt« Wasser bei Minustemperaturen gefriert. Somit kann Start und Betrieb erheblich beeinträchtigt sein. Das Brennstoffzellensystem besteht generell aus vier Bestandteilen: dem Brennstoffzellenstack, dem Befeuchter und der Luft- bzw. Wasserstoffversorgungseinheit.

Funktionsweise der PEMFC: Wasserstoff wird der Anode zugeführt; dieser oxidiert dort und es entstehen H^+ -Ionen und Elektronen. Das Herzstück der Brennstoffzelle ist die Polymerelektrolytmembran. Diese ist protonendurchlässig, somit können die H^+ -Ionen diese durchdringen und zur Kathode gelangen. Die Elektronen hingegen fließen über die Anode ab und werden anschließend einem Elektromotor als elektrische Energie zur Verfügung gestellt. Zur Gewährleistung des Protonenflusses wird die Membran dauerhaft feucht gehalten. An der Kathode wird den H^+ -Ionen reduzierter Sauerstoff zugeführt und es bildet sich als »Abfallprodukt« Wasser. Die Reduktion erfolgt mittels Elektronen über einen äußeren Stromkreis von Anode zu Kathode. Um die benötigte Be-

triebsspannung zu erreichen werden ca. 300 – 450 Zellen benötigt und zu sogenannten Stacks geschichtet. Um eine PEMFC effizient betreiben zu können, wird Wasserstoff mit der Mindestreinheit von 4.5 benötigt. Bei der Verwendung von Wasserstoff mit einer geringeren Reinheit kann es zur Beschädigung, im schlimmsten Fall zum Ausfall der Brennstoffzelle kommen. [78, 79, 11].

Schwerpunkte des aktuellen Einsatzes von Wasserstoff als Antriebsalternative im Mobilitätssektor sind vor allem der Schwerlastverkehr, Nutzfahrzeuge und Busse. Vor allem der Öffentliche Personen Nahverkehr (ÖPNV) ist Vorreiter in dieser Antriebstechnologie. Ein wesentlicher Grund hierfür ist der hier ausreichend vorhandene Bauraum, um Brennstoffzellen, Speicher und Batterien unterzubringen. Bis zu 10 Tanks mit einem Inhalt von bis zu 40kg versorgen je nach Hersteller die ein bis zwei Brennstoffzellen innerhalb des Fahrzeuges und garantieren eine Reichweite von bis zu 450 km. Flexible Einsatzzeiten, kurze Tankzeiten und kaum Emissionen sind die Vorteile gegenüber anderen Antriebstechniken. Ende 2020 gab es in Europa ca. 200 – 300 Brennstoffzellenbusse. Alleine in Köln sollen Anfang 2021 ca. 50 Busse mit Wasserstoffantrieb für den Verkehrsverbund fahren [51, 80].

Ein weiterer Fokus ist aktuell der Schwerlastverkehr aufgrund seiner hohen CO₂-Emissionen. Ca. 10 Lkw-Hersteller sind weltweit in diesem Markt tätig, vor allem aus China und Südkorea. Im Schwerlastbereich spielt neben den Emissionen vor allem das Gewicht des Antriebssystems eine wichtige Rolle. Je höher das Antriebsgewicht, desto weniger Ladung kann transportiert werden, desto höher die Frachtkosten. Neben verschiedenen Prototypen sind seit Oktober 2020 ca. 50 Lkw [81] mit Wasserstoffantrieb auf Schweizer Straßen unterwegs, und die Zahl soll bis Ende 2021 auf ca. 1000 [81] ausgeweitet werden. Die Schweiz ist damit weltweit die Pilotregion für Wasserstoffnutzung im Schwerlastverkehr [81]. Sowohl Busse als auch Lkw können aktuell nur mit einem Tankdruck von 350 bar betankt werden. Dieses bedeutet unter anderem für Deutschland, dass aktuell nur sieben öffentliche H₂-Tankstellen genutzt werden können [7]. Busflottennutzer wie der Kölner Verkehrsverbund haben deshalb ihre eigenen Tankstellen mit 350 bar-Technologie auf dem Werksgelände. In der Schweiz hingegen sind alle öffentlichen Tankstellen mit 350 bar-Dispensern versehen [81, 80, 51].

Im Bereich der Pkw gibt es aktuell nur eine Hand voll Anbieter weltweit. Aufgrund der Platzproblematik hinsichtlich des erforderlichen Bauraums für Brennstoffzelle und Tank, der vergleichsweise hohen Anschaffungskosten und des Strategiewechsels der Automobilkonzerne hinsichtlich des Elektroantriebes hat sich diese Technologie trotz jahrzehntelanger Forschung in diesem Bereich nicht durchsetzen können. Anders dagegen scheint es sich im Schienenverkehr zu entwickeln. Da maximal europaweit nur ca. 60% der Schienenwege elektrifiziert sind, werden auf den anderen Strecken entsprechend Dieselfahrzeuge eingesetzt, welche ähnlich dem Schwerlastverkehr einen hohen CO₂-Ausstoß haben. Erste H₂-Züge von dem französischen Hersteller Alstom sind unter anderem in Norddeutschland im Einsatz, im Rhein-Main-Gebiet sollen weitere folgen. Wie im Busbereich haben Züge den Vorteil, genug Platz für den Einbau des Brennstoffzellensystems zu bieten und die Tankzeiten entsprechen denen des Dieselantriebes. Im Bereich der nautischen Anwendung, der Luftfahrt (ausgenommen Raumfahrt) und der Motorräder steht die Entwicklung des Wasserstoffantriebes noch ganz am Anfang.

Ein weiterer interessanter Bereich, der nur indirekt mit dem Verkehrssektor zu tun hat, mit diesem aber sehr eng durch die Nutzung in der Logistik verbunden ist, ist der Bereich der Hub- bzw. Flurförderfahrzeuge. Hier wird die Wasserstofftechnologie schon seit Jahren eingesetzt und weltweit sind mehrere 10.000 Fahrzeuge in Betrieb [51]. Hierbei kommen vor allem die kurzen Tankzeiten, die hohe Verfügbarkeit, die Emissionsfreiheit und die nicht vorhandene Gefahr durch Arbeitsunfälle mit Batteriesäuren gegenüber konventionellen Fahrzeugen zum Tragen.

2.6 Gesetze und Regularien

Um eine Wasserstoffinfrastruktur zu errichten bzw. auszubauen und die Bereiche der Herstellung, des Transports und der Nutzung zu integrieren, bedarf es der Betrachtung verschiedenster nationaler und internationaler Gesetzgebungen. Hierbei gilt es abzuwägen, ob es sich bei den Anlagen um Versorgungs- oder Nutzungsanlagen handelt. Davon wiederum ist abhängig, welche Auflagen erfüllt werden müssen oder ob zum Beispiel Nutzungsentgelte, Umlagen oder Steuern erhoben werden.

Beispielhaft hinsichtlich der Beeinflussung durch die Gesetzeslage ist hierbei die Installation eines Elektrolyseurs an einem bestehenden Windpark zu nennen. Laut Baugesetzbuch (§35, Absatz 1) ist ein Vorhaben im Außenbereich nur zulässig, wenn öffentliche Belange nicht entgegenstehen [82, 83]. Der verantwortlichen Person im Bauamt obliegt nun die Klärung und Abwägung, ob öffentliche Belange vorliegen, z.B. ob Bürgerinitiativen, als Gegner von Ausbau und Erweiterung von Windanlagen, berechnigte Einwände haben. Auch gilt es zu klären, ob die zu installierende Anlage eine entsprechende »Privilegierung« im Außenbereich besitzt, so dass diese trotz vorbeugender Maßnahmen gegen Landschaftszersiedelung gebaut werden darf. Besitzt die Anlage eine solche Privilegierung nicht, ist eine Projektumsetzung sehr schwer und letztendlich Ermessenssache des Verantwortlichen der Baubehörde [84].

Liegt zum Zeitpunkt des Genehmigungsverfahrens kein Bebauungsplan »Standort im Sondergebiet Wasserstoffherzeugung« nach Baugesetzbuch (§ 11 BauGB) vor, so ist die rechtliche Grundlage nicht mehr das Baugenehmigungsverfahren, sondern die Immissionsschutzrechtliche Genehmigung nach Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG). Dieses schreibt im §4 eine Genehmigungspflicht vor für:

Tab. 4:
Übersicht relevanter Gesetze der Europäischen Union bzw. der Bundesrepublik Deutschland für den Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur, Stand 2021, eigene Darstellung

Gesetze/Verordnungen	EU	Bund	Energieanlagen	Transport	Tankstelle	Fahrzeuge
Reinheitsanforderungen für Wasserstoff als Transportkraftstoff (ISO 14687-2)	✓	✓	✓			
Richtlinie über den Ausbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe	✓	✓		✓		
Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße	✓	✓		✓		✓
Übereinkommen über den internationalen Eisenbahnverkehr	✓	✓		✓		✓
Beförderungsvorschrift für gefährliche Güter im Seeschiffverkehr.	✓	✓		✓		✓
Europäisches Übereinkommen über die internat. Beförderung gefährlicher Güter auf Binnenwasserstraßen	✓	✓		✓		✓
Global Harmonisiertes System zur Einstufung und Kennzeichnung von Chemikalien	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Gesetze/Verordnungen	EU	Bund	Energie- anlagen	Transport	Tankstelle	Fahr- zeuge
Europäischen Richtlinie für ortsbewegliche Druckgeräte	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Erneuerbare-Energien-Gesetz		✓	✓			
Bundes-Immissionsschutzgesetz		✓				
Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung		✓	✓		✓	
Gesetz über die Elektrizitäts- und Gasversorgung		✓	✓	✓	✓	
Gasnetzzugangsverordnung		✓	✓	✓		
Gashochdruckleitungsverordnung		✓	✓	✓		✓
Baugesetzbuch		✓	✓	✓	✓	
Baunutzungsverordnung		✓	✓	✓	✓	
Raumordnungsgesetz		✓	✓	✓	✓	
Energiewirtschaftsgesetz		✓	✓	✓		
Erneuerbare-Energien-Wärme-Gesetz		✓	✓			
Seeaufgabengesetz		✓	✓			
Bundesnaturschutzgesetz		✓	✓	✓	✓	
Windenergie-auf-See-Gesetz		✓	✓			
Batteriegesetz		✓	✓			✓
Kreislaufwirtschaftsgesetz		✓	✓			
Biokraftstoff Nachhaltigkeitsverordnung		✓	✓		✓	
Biomassestrom Nachhaltigkeitsverordnung		✓	✓		✓	
Wasserhaushaltsgesetz		✓	✓			
Brandschutzverordnung		✓	✓	✓	✓	✓
Betriebssicherheitsverordnung		✓	✓	✓	✓	✓
Wasserstofftankstellenverordnung		✓		✓	✓	
Datenschutzgrundverordnung		✓	✓	✓	✓	

»Anlagen zur Herstellung von Stoffen oder Stoffgruppen durch chemische, biochemische oder biologische Umwandlung im industriellen Umfang,zur Herstellung von Gasen wie Ammoniak, Chlor..... Wasserstoff.« [85].

Da aktuell nicht festgelegt ist, ob es sich beim Verfahren einer Elektrolyseanlage um eine chemische, biochemische oder biologische Umwandlung handelt, liegt es wiederum im Ermessen der verantwortlichen Person des Genehmigungsverfahrens, ob eine Genehmigung erteilt wird. Aktuell wird das Verfahren als eine elektrochemische Umwandlung gehandhabt und somit Großteils die Genehmigung erteilt [86].

Folgend wird die Zuordnung der verschiedenen Gesetze zu den einzelnen Bereichen des Infrastruktursystems dargestellt. Da die Gesetzgebung in diesem Bereich sehr umfangreich ist, wurde für die Darstellung nur die Gesetzgebung auf europäischer Ebene und des Bundes betrachtet. Zusätzlich zu den in Tabelle 4 aufgeführten Gesetzen kommen noch weitere auf Landes- und Kommunalebene hinzu.

2.7 Förderungsansätze von Wasserstoffanwendungen

Um den Markthochlauf der Wasserstofftechnologie in Europa zu unterstützen, und die Ziele sowohl der europäischen als auch der nationalen Wasserstoffstrategie zu erreichen, wurden national und international die unterschiedlichsten Förderprogramme aufgelegt. Je nach Programm werden dabei die verschiedenen Bereiche der Wasserstoffinfrastruktur gefördert. Aufgrund der hohen Anzahl von Förderprogrammen werden in der folgenden Tabelle 5 nur die der EU und des Bundes aufgeführt, nicht aber die der Bundesländer und der Kommunen.

Name der Förderung	Förderung durch		Förderung von			
	EU	Bund	Energie	Wasserstoff	Infrastruktur	Fahrzeuge
Important Projects of Common European Interest on Hydrogen Technologies and Systems	√		√	√	√	√
EU-Förderprogramm LIFE	√		√			
EU-Innovation Fund	√		√		√	
Allgemeine Gruppenfreistellungsverordnung	√		√	√	√	√
Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie Phase II (NIP II)		√		√		
Förderprogramm Dekarbonisierung in der Industrie		√	√	√	√	√

Name der Förderung	Förderung durch		Förderung von			
	EU	Bund	Energie	Wasserstoff	Infrastruktur	Fahrzeuge
Energieforschungsprogramms der Bundesregierung Innovationen für die Energiewende		√	√		√	
EEG-Förderung		√	√			
Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Green startup Programm		√	√	√	√	√
KfW-Umweltprogramm		√	√	√	√	√
Innovationsprämie für Batterieelektro- oder Brennstoffzellenfhzg.		√				√

Tab. 5:
Übersicht relevanter Förderprogramme der Europäischen Union bzw. der Bundesrepublik Deutschland für den Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur, Stand 2022, eigene Darstellung

3 Lokale Infrastruktur von Staßfurt und Umgebung

Das Kapitel 3 befasst sich generell mit dem Salzlandkreis und der aktuellen Situation vor Ort, um diese anschließend in Kapitel 4 als Grundlage zur Erstellung eines Wasserstoffinfrastrukturmodells zu nutzen. Neben den demographischen spielen dabei auch die geographischen Gegebenheiten hinsichtlich Pendlerbewegungen, Entfernungen oder ähnlichem eine wichtige Rolle. Des Weiteren werden unterschiedliche Unternehmen beschrieben, die bei der Nutzung von Wasserstoff bzw. des Wasserstoffbedarfs innerhalb der Region relevant sein werden. Neben Logistikunternehmen, Kommunalverwaltungen bzw. Kreisverkehrsgesellschaft, die Wasserstoff für ihre Fahrzeugflotten einsetzen können, gehören auch Unternehmen in der Chemieindustrie, die als »Konkurrenten« hinsichtlich des Wasserstoffbedarfs auftreten könnten. Ein weiterer Fokus lag in der Betrachtung der örtlichen Energiedienstleister. In Kapitel 3.6.1. werden die unterschiedlichen Energieanlagen unter anderem mit Standort und installierter Nennleistung dargestellt, um somit Angaben über die mögliche Nutzung zur Erzeugung von grünem Wasserstoff abzuleiten. Aus all den relevanten Bereichen ergibt sich anschließend die Datengrundlage für die Modellierung des Infrastruktursystems.

3.1 Geographische Lage des Salzlandkreises

Zur Betrachtung der Wasserstoffinfrastruktur innerhalb ländlicher, strukturschwacher Gebiete wurde für die Studie die Stadt Staßfurt, respektive der Salzlandkreis in Sachsen-Anhalt ausgewählt (siehe Abbildung 4). Dieser liegt verkehrstechnisch günstig zwischen der Ost- Westverbindung Berlin-Hannover und der Nord-Südverbindung Magdeburg-Leipzig. Aus den vormaligen Landkreisen Aschersleben-Staßfurt, Bernburg und Schönebeck entstand 2007 im Zuge einer Gebietsreform der Salzlandkreis mit einer Fläche von ca. 1430 km². Die Flächennutzung lag im Jahr 2018 bei ca. 10% Siedlungsgebiete, 4,5% Verkehrsfläche, 2,8% Gewässer und ca. 83% Vegetation [87



Abb. 4:
Grafische Darstellung
des Salzlandkreises
Quelle [87]

3.2 Demographie und regionale Pendlerbewegung

In den Verbandsgemeinden und den Städten des Salzlandkreises leben ca. 188.500 Einwohner (Stand Juni 2020). Davon ca. 60% in den Städten Bernburg (ca. 32.500), Schönebeck (ca. 32.500), Aschersleben (ca. 26.900) und Staßfurt (ca. 24.800). In den vergangenen fünfzig Jahren hat sich die Einwohnerzahl dieser Region fast halbiert [88]. Die demographische Verteilung des Kreises lag 2017 bei den unter 18jährigen bei ca. 14%, bei den 20 bis 65jährigen bei ca. 57% und bei den über 65jährigen bei ca. 29% [89] was in etwa auch dem Bundesdurchschnitt im selben Zeitraum entspricht.

Um ihrer Arbeit nachzugehen pendeln täglich ca. 40.000 Menschen [90] in den bzw. aus dem Kreis zu ihren Arbeitsstätten (Stand 2018). Von diesen Pendlern sind ca. 15.000 Einpendler respektive ca. 25.000 Auspendler [90]. Weitere ca. 40.000 Menschen [90] pendeln innerhalb des Kreises. Von den ca. 40.000 Pendelbewegungen der Aus-/Einpendelbewegungen geht ein Großteil in den Magdeburger Raum und den Harz bzw. kommt auch aus diesem Raum. Die Zahl der Einpendler stieg in den vergangenen Jahren um ca. 10%, während sich im gleichen Zeitraum die Zahl der Auspendler um ca. 5% verringerte [89]. In Abbildung 5 sind beispielhaft die verschiedenen Ziele der Binnenpendler dargestellt.



Abb. 5: Darstellung verschiedener Pendlerziele innerhalb des Salzlandkreises [91]

3.3 Kommunale Zuständigkeit

Die übergeordnete Zuständigkeit der Region obliegt der kommunalen Kreisverwaltung des Landkreises Salzland. Nachgeordnet bestehen noch die jeweiligen Stadtverwaltungen der in Kapitel 3.2. erwähnten Städte. Mit den eigenen Kreiswirtschaftsbetrieben an den Standorten Schönebeck und Aschersleben ist die Kreisverwaltung unter anderem verantwortlich für die Reinigung, die Pflege und den Winterdienst der ca. 360 km Kreisstraßen und der gesamten Abfallentsorgung innerhalb des Kreises. Zusätzlich zu den Kreiswirtschaftsbetrieben unterhalten die Städte jeweils Stadtpflegebetriebe und Bauhöfe. Die Zuständigkeit für die durch den Salzlandkreis führende Autobahn A14 bzw. A36 liegt bei der Autobahnmeisterei Plötzkau, betrieben durch das Land Sachsen-Anhalt [88, 92].

3.4 Industriezweige in der Region

Das Kapitel 3.4. befasst sich mit den unterschiedlichsten Industriezweigen in der Region, die eine wesentliche Rolle beim Aufbau und der Nutzung einer Wasserstoffinfrastruktur spielen können. Infrage kommen hierbei vor allem Energiedienstleister,

Unternehmen der Chemieindustrie, das Produzierende Gewerbe aber auch der Verkehrssektor. Entweder sind es direkte Akteure bei der Entwicklung und dem Ausbau der verschiedenen Bereiche, oder die Unternehmen nutzen den zur Verfügung gestellten Wasserstoff als Treibstoff für ihre Fahrzeugflotte bzw. stellen diesen ihren Zulieferern zur Verfügung, um den eigenen CO₂-Fußabdruck innerhalb ihrer Supply-Chain zu reduzieren. Des Weiteren verschafft das Kapitel einen Überblick über die verschiedenen Sektoren der Wasserstoffinfrastruktur, die aktuell in der Region vorhanden bzw. in der Planungsphase sind.

3.4.1 Energiewirtschaft im Salzlandkreis

Die Energieversorgung des Salzlandkreises wird durch verschiedene Energie-Netzbetreiber sichergestellt. Sie versorgen die Städte und Verbandsgemeinden mit Strom und Gas, mit einem Anteil an Erneuerbaren Energien von über 70% der Gesamtstromproduktion (Stand 2015) [93]. In Kapitel 3.6. werden die Bereiche der verschiedenen Energiequellen detaillierter beschrieben. Neben den Stadtwerken der Städte Aschersleben, Bernburg, Schönebeck und Staßfurt sind folgende Unternehmen für die Energieversorgung im Salzlandkreis verantwortlich:

Die Mitteldeutsche Netzgesellschaft Strom mbH (MITNETZ Strom) ist größter Strom-Verteilnetzbetreiber Ostdeutschlands und betreut ein Stromnetz von über 73.000 km Länge. Innerhalb des Verteilernetzes betreibt sie rund 15.500 Trafostationen und knapp 190 Umspannwerke und versorgt damit ca. 2,3 Mio. Einwohner [94]. Die MITNETZ Strom mbH betreibt im Salzlandkreis hauptsächlich Windkraft- und Solaranlagen [93]. Neben der MITNETZ Strom mbH ist die Avacon AG mit einem Stromverteilnetz von rund 63.000 km ein weiterer großer Netzbetreiber von Windkraft- und Solaranlagen im Salzlandkreis. Des Weiteren betreut die Avacon AG ein Gasverteilnetz von ca. 21.000 km und über 1500 Gasdruckminderungsstationen [95] und gut die Hälfte der Biogasanlagen in der Region [93].

Mit der MVV Energie AG (MVV) mit Sitz in Mannheim befasst sich ein weiterer, national und international tätiger Konzern mit dem Ausbau der Erneuerbaren Energie in den neuen Bundesländern, speziell auch in der Region Salzland. Neben den Geschäftsaktivitäten im Strom-, Wärme-, Gas- und Wassergeschäft sowie dem Energiehandel kommen deutschlandweit Projektierungen von Windenergie-, Biogas- und Biomasseanlagen. Gemeinsam mit der seit 2014 ins Unternehmen integrierten Juwi GmbH betreut die MVV verschiedene Windparks im Kreis und die MVV Umwelt GmbH betreibt eine Biomethananlage in Staßfurt [96, 97].

Als kleinster Energieversorger – neben den jeweiligen Stadtwerken – versorgt die Erdgas Mittelsachsen GmbH (EMS) die Region mit Erdgas. Das Gasversorgungsnetz beträgt ca. 1300 km und zusätzlichen rund 300 km Hausschlussanleitungen. Neben dem Leitungsnetz werden von dem Unternehmen mehr als 270 Gasdruckregelstationen und Messanlagen betrieben. Seit Jahren wird die Produktion von Biogas erweitert und ersetzt zu bestimmten Jahreszeiten fast zu 100% die konventionelle Erdgaslieferung [98]. Neben der EMS ist das Gasversorgungsunternehmen VNG AG in der Region tätig und unterhält mit der Tochtergesellschaft VNG Gasspeicher GmbH in Bernburg den viertgrößten Erdgaskavernenspeicher Europas [99].

Im Süden des Salzlandkreises betreibt die Nordmethan Unternehmensgruppe im Gewerbegebiet Könnern einen der weltweit größten Biogasparks. Durch die Fermentation von Mais, Pflanzensilage und Zuckerrübenschnitzel wird Biomethan erzeugt. Rund dreißig Landwirte aus der Umgebung versorgen das Unternehmen mit den entsprechenden »Rohstoffen« [100].

3.4.2

Übersicht der regionalen chemischen Industrie

Verschiedene nationale und internationale Unternehmen der Chemieindustrie sind im Raum Staßfurt bzw. dem Salzlandkreis ansässig. Aufgrund der Kalivorkommen in der Region sind dieses vornehmlich salzverarbeitende Unternehmen. Innerhalb einer H₂-Infrastruktur können sie sowohl als Hersteller wie auch als Nutzer agieren. Im folgenden Abschnitt werden die möglichen Hauptakteure in solch einem System aufgezeigt.

Eines der ältesten Unternehmen Sachsen-Anhalts ist die CIECH Soda Deutschland GmbH & Co. KG (früher Sodawerk Staßfurt). Das im Jahr 1882 gegründete Unternehmen stellt Schwer- sowie Leichtsoda und Natron unter anderem für die Pharmaindustrie her. Zur Produktion dieser Stoffe nutzt CIECH Soda eigene Kalkstein- und Salzvorkommen aus der Region. Eine Tochtergesellschaft stellt Wärme und elektrische Energie unter anderem mit Hilfe einer Solarparkanlage bereit [101].

Auf dem Gelände des Industrieparks Solvay Bernburg befindet sich das Chemieunternehmen Solvay GmbH. Neben Wasserstoffperoxid und Phosphorsäure produziert auch Solvay Schwer- und Leichtsoda an diesem Standort [102].

Ein weiteres salzverarbeitendes Unternehmen und einer der größten Arbeitgeber im Salzlandkreis ist die Kali&Salz Minerals and Agriculture GmbH (K&S) mit ihrem Sitz in Bernburg. K&S stellt aus dem vor Ort gewonnenen Salz Auftau-, Speise- oder Tafelsalze her, oder bereitet es für die Wasserenthärtung auf. Die durch die Gewinnung der Salzsole entstehenden Kavernen werden sowohl vom Unternehmen selbst als auch von einem Energiedienstleister als Speicherort für Erd- und Flüssiggas genutzt [103].

3.4.3

Unternehmen des produzierenden Gewerbes vor Ort

Neben der Energie- und der Chemieindustrie ist die dritte Säule einer H₂-Infrastruktur das Produzierende Gewerbe vor Ort. Diese Unternehmen werden vornehmlich als direkter oder indirekter Nutzer in Erscheinung treten. Das heißt, dass sie entweder den Wasserstoff z.B. innerhalb ihres Fuhrparks bzw. für die Logistikfahrzeuge einsetzen oder diesen ihren Zulieferern in Form von Tankmöglichkeiten zur Verfügung stellen. Stellvertretend werden im folgenden Abschnitt die vermutlich wichtigsten Akteure beschrieben.

Die TechniSat Teledigital GmbH ist eines der größten Unternehmen im Salzlandkreis außerhalb der Energie- und Chemieindustrie. Das im Gewerbegebiet Staßfurt-Nord ansässige Unternehmen stellt neben dem Kerngeschäft der Rundfunktechnologie am Standort Staßfurt auch E-Bikes her. Des Weiteren werden vom Staßfurter Service- und Kundendienstzentrum aus alle Handelspartner und Endkunden betreut [104].

Eines der größten und modernsten Zementwerke Europas betreibt die SCHWENK Zement GmbH & Co. KG im Norden von Bernburg. An diesem Standort werden Zement und Kalksteinmehl für die Betonherstellung produziert [105]. Aufgrund der

CO₂-intensiven Herstellung des Baustoffes (Pro Tonne Zement werden ca. 590g CO₂ ausgestoßen, d.h. ca. 8% der weltweiten CO₂-Emissionen entstehen durch die Zementherstellung [106]) kann es für das Unternehmen sehr interessant sein, den CO₂-Fußabdruck des Unternehmens durch den Einsatz von Wasserstofftechnologie unter anderem im Logistikbereich zu reduzieren.

Ein ähnliches Interesse könnte auch die im Norden von Aschersleben ansässige Novelis Deutschland GmbH verfolgen. Am Standort Nachtersleben werden Aluminiumwalzprodukte für die Automobil- und Getränkedosenindustrie, aber auch zur Verwendung in

Kaffee kapseln hergestellt. Im weltgrößten Aluminium-Recyclingzentrum von Novelis werden unter anderem jährlich 400.000 Tonnen Aluminium-Walzbarren aus recyceltem Material hergestellt [107].

In direkter Nachbarschaft zu Novelis hat sich in Aschersleben das Zentrum der sachsen-anhaltinischen non-woven-Produktion entwickelt. Firmen wie die Nitto Advanced Non-woven Ascania GmbH oder die Masterplast Nonwoven GmbH produzieren hier Vliesstoffmaterialien für Haushalts- und Körperpflegeprodukte, Hygieneartikel und medizinische Produkte oder Fiberglasmatten für die Bauindustrie [108].

3.4.4

Landwirtschaftliche Betriebe und Lebensmittelproduktion

Rund 70% der Fläche des Salzlandkreises steht der landwirtschaftlichen Nutzung zur Verfügung. Die Landwirtschaft spielt somit in der Region eine wesentliche Rolle. Rund 300 landwirtschaftliche Betriebe leben im Salzlandkreis unter anderem vom Anbau von Weizen, Zuckerrüben oder von Arznei- und Gewürzpflanzen. Näherungsweise ein Drittel der Betriebe betreibt Viehwirtschaft, hauptsächlich Großvieh wie Kühe und Schweine [88].

Neben den Landwirtschaftsbetrieben gibt es eine Reihe großer Verarbeiter landwirtschaftlicher Produkte. Seit 1993 produziert die Pfeifer & Langen GmbH & Co. KG in Könnern verschiedene Arten von Zucker und ist damit eines der größten Unternehmen, die landwirtschaftliche Produkte aus der Region verarbeiten [109]. Ein weiterer wichtiger landwirtschaftlicher Betrieb ist das MAWEA Majoranwerk Aschersleben GmbH. Die Gesellschaft betreibt Anbau, Trocknung, Produktion sowie Lagerung und Vertrieb von einheimischen Gewürzen wie Thüringer Majoran und Gartenthymian oder Bohnenkraut und Dill [110]. Im Norden des Salzlandkreises produziert die Cargill Deutschland GmbH Sirup, Weizenstärke und Ethanol für die Lebensmittel- und Arzneimittel- oder die Papier- und Druckmittelindustrie [111].

Die entstehenden Produktionsabfälle der landwirtschaftlichen Unternehmen des Kreises werden zur Herstellung von Naturdüngemitteln, Humuserden, als Brennstoff in Verbrennungsanlagen oder als Grundstoff für Biogasanlagen verwendet.

3.4.5

Verantwortliche Unternehmen der ansässigen Abfallwirtschaft

Für die Abfallentsorgung innerhalb des Kreises liegt die Zuständigkeit bei den Kreiswirtschaftsbetrieben, welche mit 36 Pressmüllfahrzeugen [112] den Abtransport des gesamten Abfallaufkommens sicherstellt. Der Abtransport geschieht entweder zu den fünf [92] eigenen Wertstoffhöfen oder direkt zur thermischen Aufbereitung. An den Standorten Staßfurt und Bernburg steht jeweils eine Anlage zur thermischen Abfallbeseitigung zur Verfügung. In der Anlage in Bernburg, betrieben durch die PreZero Energy GmbH werden jährlich rund 450.000 t [113] Abfälle, die nicht mehr stofflich aufbereitet werden können, zu ca. 1,8 Mio. [113] Tonnen Dampf verwertet. Im benachbarten Solvay Werk wird anschließend der gewonnene Dampf zur Herstellung von Soda und Strom eingesetzt. Betreiber der Anlage in Staßfurt ist die REMONDIS Thermische Abfallverwertung GmbH. In zwei Verbrennungslinien werden hier jährlich rund 380.000 t [114] Abfälle energetisch zu Dampf und Strom verwertet. Der erzeugte Strom wird zur Deckung des Eigenbedarfs benutzt bzw. ans Netz abgegeben. Der Dampf wird zur Prozessdampf-Versorgung dem benachbarten Sodawerk zur Verfügung gestellt. Beide Anlagen könnten für eine Wasserstoffinfrastruktur eine interessante Rolle spielen, indem ein Teil des erzeugten Stroms zur Versorgung einer Elektrolyseanlage bereitgestellt wird.

3.5

Darstellung des Verkehrssektors im Salzlandkreis

Ein weiterer wichtiger Punkt innerhalb einer Wasserstoffinfrastruktur für die Region Staßfurt/Salzland ist der Verkehrssektor. Von diesem ist in dem zu erstellenden Modell maßgeblich die Art der Nutzung z.B. stationäre oder mobile Speicherung und der zukünftige Wasserstoffbedarf abhängig. In den folgenden Abschnitten werden die unterschiedlichen für das Thema relevante Aspekte des Verkehrssektors vor Ort beschrieben.

3.5.1

Verkehrstechnische Anbindung und Verkehrsaufkommen des Kreises

Wie in Kapitel 3.2. beschrieben, pendelt im Salzlandkreis rund ein Viertel der Bevölkerung täglich, entweder mit dem ÖPNV oder im Individualverkehr zu ihren Arbeitsplätzen. Diese Pendelbewegungen fokussieren sich vor allem auf die beiden wichtigsten Nord-Süd-Verbindungen, die Bundesautobahn A14 und die Bundesstraße B180 bzw. die Ost-West-Verbindung, die Bundesautobahn A36 und die Bundesstraße B185 (siehe Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.). Zusätzlich zum Pendelverkehr kommt auf der A14 ein tägliches Verkehrsaufkommen von rund 35.000 Fahrzeugen (davon ca. 8.500 im Schwerlastverkehr, Stand 2015 [115]) und auf der A36 von rund 13.000 (davon ca. 2.000 im Schwerlastverkehr, Stand 2015 [115]) hinzu. Eine Zunahme des Fahrzeugaufkommens zwischen 2005 und 2015 ist dabei nicht zu erkennen. Möglichkeiten der Abfahrt von den Autobahnen bestehen fünf auf der A14 und sechs auf der A36. Tankmöglichkeiten bestehen an der A14 am Autohof Brumby (Ausfahrt 8) und an der Tank- und Raststätte Plötzetal (siehe Abbildung 6). An der A36 besteht innerhalb der Region keine direkte Tankmöglichkeit.



Abb. 6: Kartenausschnitt Autobahnnetz innerhalb des Salzlandkreises mit dem jeweiligen Fahrzeugaufkommen, Google Maps-2021 i.V.m. [115]

3.5.2

Logistikunternehmen und Schwerlastverkehr als mögliche Hauptakteure im Kontext regionaler Wasserstoffinfrastruktur

Aufgrund des im Kapitel 3.5.1. beschriebenen allgemeinen Aufkommens von bis zu 8.500 Lkw auf beiden Autobahnen und dem Zulieferverkehr der ortsansässigen Unternehmen kann eine Wasserstoffinfrastruktur im Schwerlastverkehr eine wesentliche Rolle innerhalb der Region spielen. Neben den Speditionen TAS Group Aschersleben und der Contex GmbH & Co. KG Bernburg sind Logistik- und Verteilzentren unter anderem der Lidl Stiftung & Co. KG, der Relaxdays GmbH, der DHL Paket GmbH und der EDEKA Minden-Hannover Stiftung & Co. KG mit insgesamt über 150.000 m² Lagerfläche in der Region ansässig. Im Lidl-Logistikzentrum an der Autobahnabfahrt Bernburg werden z.B. täglich ca. 2100 Paletten [116] umgeschlagen. Bei einer Durchschnittsbeladung von ca. 35 Paletten pro Lkw sind das ca. 60 an- bzw. abfahrende Lkw für die tägliche Versorgung des Lagers. Hinzu kommen etwa die gleiche Anzahl an Versorgungsfahrten zu den Filialen und ein entsprechendes Fahrzeugaufkommen für die Abfallentsorgung. Ein weiteres Potential für den Einsatz von Wasserstoff innerhalb der Logistikzentren sind die Hilfsfahrzeuge wie Gabelstapler oder Niederflurfahrzeuge vor Ort. Die Anzahl der in der Region aktuell eingesetzten Gabelstapler liegt bei schätzungsweise 309 und der Niederflurfahrzeuge bei 356. Diese könnten zukünftig auch mit Wasserstoff angetrieben werden. Zusammenfassend wird die anteilige Verteilung der eingesetzten Logistikhilfsfahrzeuge dargestellt.

	Gabelstapler	Niederflurfahrzeuge
Region/Salzlandkreis	213	166
Logistikzentren Bernburg Lidl/Bauerngut*	96	190
Gesamt	309	356

* Der Anteil von Stapler und Niederflurfzg. am Gesamtaufkommen beruht auf einer Abschätzung (25% Stapler, 75% Nflfzg)

Neben den Fahrzeugen der erwähnten Akteure sind zusätzlich aktuell ca. 4300 Fahrzeuge zwischen 2,8t und 7,5t bzw. ca. 660 Fahrzeuge über 7,5t im Salzlandkreis zugelassen [117].

3.5.3

Öffentlicher Personennahverkehr als Treiber des Infrastrukturausbaus

Wie in Kapitel 3.2. bereits beschrieben, pendeln täglich ca. 80.000 Arbeitnehmer zu ihren Arbeitsplätzen entweder innerhalb der Region oder über die Kreisgrenzen hinweg. Der Anteil des Motorisierten Individualverkehr (MIV) liegt bei den Pendlerbewegungen bei rund 55% [118], die restlichen rund 45% [118] teilen sich auf den ÖPNV bzw. den Nicht Motorisierten Individualverkehr auf (NMIV).

Der öffentliche Schienennahverkehr (SNV) wird und wurde innerhalb der Region vornehmlich von der Abellio Rail Mitteldeutschland GmbH¹ und der Deutschen Bahn-Regio AG mit insgesamt vier RegionalExpress- und fünf RegionalBahn-Linien und rund 1,9 Mio. jährlichen Fahrplankilometern [118] abgedeckt. Insgesamt existieren 36 Regio-

¹ Im Jahr 2021 Bekanntmachung der Insolvenz. Das Bundesland Sachsen-Anhalt wird die Linien neu vergeben.

Tab. 6:
Übersicht der eingesetzten
Gabelstapler/Niederflurfahr-
zeuge im Salzlandkreis

nalbahnhöfe [91] innerhalb des Schienennetzes. Wichtigster Knotenpunkt hierbei ist der Bahnhof in Aschersleben, er verbindet die Linien von Goslar nach Halle (Saale) mit den Linien nach Magdeburg, Dessau und Erfurt. Ein Großteil des Schienennetzes ist nicht elektrifiziert und wird mit Dieseltriebwagen betrieben.

Neben dem SNV ist der busbasierte ÖPNV die zweite Säule des Personennahverkehrs (PNV). Dieser wird durch die Kreisverkehrsgesellschaft Salzland mbH (KVG) durchgeführt. Von den drei Betriebshöfen Aschersleben, Calbe und Bernburg werden aktuell 10 Stadtlinien [119] und 36 Regionallinien [119] und 6 Linien [91] über die Landesgrenze hinweg mit rund 100 Bussen [91] bedient. Die jährliche Fahrplankilometerleistung liegt bei ca. 4,9 Mio. Kilometern. Das Durchschnittsalter der Busse liegt 8,3 Jahren. Neben dem Linienverkehr ist die KVG Salzland auch für die Beförderung der rund 15.000 Schüler [118] innerhalb der Region verantwortlich.

3.6

Übersicht der gegenwärtigen Energie- und Wasserstoffinfrastruktur

Mit einem Anteil von rund 70% [120] der Bruttostromerzeugung aus Erneuerbaren Energien liegt das Land Sachsen-Anhalt im Bundesländervergleich an einer der führenden Stellen innerhalb des Energiesektors. Verschiedene Regionen des Landes können sich bereits heute rechnerisch zu 100% [120] mit Energie aus regenerativen Quellen versorgen. Neben der Stromerzeugung soll in naher Zukunft auch Wasserstoff eine wichtige Rolle in der Energiewende des Landes spielen. In den folgenden beiden Kapiteln wird die aktuelle Situation im Bereich der Energieerzeugung und der Wasserstoffinfrastruktur innerhalb des Salzlandkreises beschrieben.

3.6.1

Darlegung der verschiedenen Energiequellen

Vergleichbar der Situation im gesamten Bundesland Sachsen-Anhalt verhält sich auch die aktuelle Situation im Bereich der Energieerzeugung aus regenerativen Quellen innerhalb des Salzlandkreises. Wie bereits in Kapitel 3.4.1. beschrieben, sind in der Region hauptsächlich die örtlichen Stadtwerke bzw. regionale Energiedienstleister an den verschiedenen Energieanlagen beteiligt. In den Abbildungen 7 und 8 ist ganz deutlich eine örtliche Anhäufung im Bereich der Windkraft- bzw. der Flächensolaranlagen erkennbar. Mit einer installierten Gesamtnennleistung von rund 700 MW_{pel} [93, 121, 122] sind Windkraftanlagen der Hauptlieferant an Erneuerbaren Energien in der Region. Hierbei liegen die größten Windparks im Raum Bernburg, Egelin und Staßfurt.

Bei den Freiflächen-Photovoltaikanlagen liegen die größten Anlagen im Bereich Bernburg, Calbe, Schönebeck und Staßfurt. Bei den Solaranlagen liegt die installierte Gesamtnennleistung bei rund 110 MW_{pel} [122, 93, 121].

In Abbildung 9 werden die verschiedenen Standorte für Biogasanlagen und Wasserkraftwerke dargestellt. Die Anlagen sind innerhalb der Region gleichmäßig verteilt und nicht geclustert. Die installierte Gesamtnennleistung der Biogasanlagen liegt bei ca. 8,9 MW_{pel} [93], die der Wasserkraftanlagen bei rund 6,12 MW_{pel} [93].

Neben der Energieerzeugung aus regenerativen Quellen befindet sich im Salzlandkreis auch einer der größten Untergrundgasspeicher Europas. Nach dem Abbau des Salzes in 500m – 700 m Tiefe wurden die insgesamt 33 [99] Salzkavernen ausgebaut und seit 1974 zur Speicherung von Erdgas genutzt. Die Anlage hat ein Gesamtspeicherkapazität von 1,03 Mrd. m³ [99] und es können täglich bis zu 12 Mio. m³ [99] Gas aus gespeichert bzw. bis zu 35 Mio. m³ [99] eingespeichert werden.

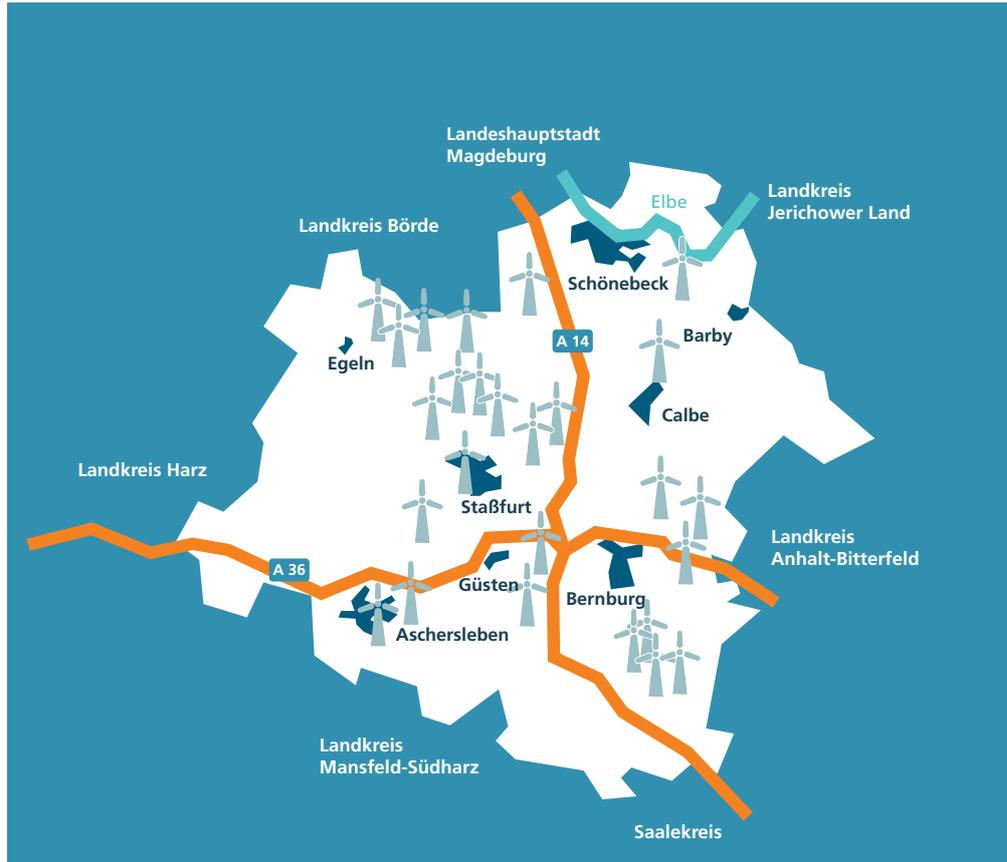


Abb. 7:
Graphische Darstellung der
Windparkanlagen innerhalb
des Salzlandkreises [87] mit
eigenen Ergänzungen



Abb. 8:
Graphische Darstellung der
Solarparkanlagen innerhalb
des Salzlandkreises [87] mit
eigenen Ergänzungen



Abb. 9: Graphische Darstellung der Biogas- und Wasserkraftanlagen innerhalb des Salzlandkreises [87] mit eigenen Ergänzungen

3.6.2 Übersicht – Tankstellennetz in der Salzlandregion

Aktuell gibt es im Salzlandkreis keine Möglichkeit wasserstoffbetriebene Fahrzeuge zu betanken. Die nächsten Möglichkeiten sind Wasserstoff-Tankstellen in Magdeburg, Halle oder Leipzig, welche aber nur für eine Versorgung von Pkw ausgerüstet sind. Die nächste Möglichkeit für den Schwerlastverkehr befindet sich in Berlin und einer Entfernung von knapp 200 km. Für die Versorgung mit konventionellen Kraftstoffen für Pkw und Lkw gibt es 34 Tankstellen [123] innerhalb des Kreises, die Schwerpunkte liegen in den vier Städten Aschersleben, Bernburg, Schönebeck und Staßfurt. Zusätzlich zur Versorgung mit konventionellen Treibstoffen stehen in Bernburg drei Erdgastankstellen zur Verfügung. Zwei davon sind öffentlich, die dritte versorgt den erdgasbetriebenen Fuhrpark der Kreisverkehrsgesellschaft Salzlandkreis und befindet sich auf dem Betriebshof der Stadtwerke Bernburg [124].

4 Anforderungen an einen zukünftigen Ausbau der Wasserstoffinfrastruktur am Beispiel Staßfurt sowie Salzlandkreis

Im »Grünbuch zur Entwicklung einer Wasserstoffstrategie« der Landesregierung Sachsen-Anhalt [125] wird die Frage gestellt, wie eine zukünftige Wasserstoffinfrastruktur innerhalb des Landes aussehen könnte. Um sich mit dem Thema des Ausbaus einer Wasserstoffinfrastruktur auseinander zu setzen, gibt es unterschiedliche Beweggründe. Hauptmotivationen sind die ausgeweiteten Aktivitäten sowohl auf nationaler als auch auf europäischer Ebene zur Entwicklung und Umsetzung einer Wasserstoffwirtschaft auf Basis von »grünen Wasserstoff« und die damit verbundenen Erreichung der Klimaziele 2030 bzw. 2050. Die Zielstellung der Landesregierung ist es Sachsen-Anhalt zu einer Wasserstoff-Modellregion zu entwickeln.

Ziele für 2030:

- Aufbau von mindestens 1 GW Elektrolyseleistung
- Herstellung von mindestens 5 TWh (1,67 Mrd.Nm³) grünem Wasserstoff
- Aufbau von zusätzlich 5 GW Leistung an Wind- und Photovoltaikanlagen
- Aufbau eines lokalen Wasserstoffnetzes inkl. H₂-Tankstellen
- Umsetzung von Musteranwendungen im Verkehr (beispielsweise für eine nachhaltige Logistik)

Ziele für 2050:

- Deckung des Wasserstoffbedarfs zu wettbewerbsfähigen Preisen
- Großskalierte Herstellung von CO₂-freiem und -neutralem Wasserstoff in Sachsen-Anhalt zur regionalen Wertschöpfungen
- Aufbau der Infrastruktur zur flächendeckenden Wasserstoffversorgung im Land, um sektorenübergreifende Nutzung von Wasserstoff zu ermöglichen
- Flächendeckender Einsatz von grünem Wasserstoff im öffentlichen Personennahverkehr

Eine elementare Rolle zur Umsetzung dieser Ziele wird die Sektorenkopplung spielen, d.h. die Vernetzung der verschiedenen Sektoren wie Energiewirtschaft, Industrie und Verkehr [126].

Das Kapitel 4 befasst sich unter anderem mit der Analyse und Bewertung der Energieverteilung innerhalb der Region. Wichtige Partner werden anhand der Beschreibung aus Kapitel 3 hinsichtlich ihres Potentials zum Einsatz der Wasserstofftechnologie betrachtet und bewertet. Anschließend wird mit Hilfe der Bewertung und eines auf die Region zugeschnittenen Modells ein Szenario zum Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur für den Zeitraum bis 2050 erstellt.

4.1

Ist-Analyse der Energieverteilung am Standort Staßfurt respektive Salzlandkreis

Wie im Kapitel 3.6.1. beschrieben, betreiben mehrere national und international agierende Energiedienstleister unterschiedlichste Energieanlagen zur Herstellung Erneuerbarer Energien im Salzlandkreis. In den folgenden Unterkapiteln werden die verschiedenen Standorte der Energieanlagen genauer betrachtet und am Ende des Abschnitts 4.1.3. gibt es eine tabellarische Übersicht über alle Energieanlagen in der Region.

4.1.1 Windkraftanlagen

Windkraftanlagen sind der Hauptlieferant von erneuerbarer Energie innerhalb des Salzlandkreises. Im Netzgebiet Staßfurt befinden sich ca. fünfzehn Windparkanlagen mit über 40 MWpel installierter Nennleistung. Die räumliche Verteilung der leistungsstärksten Anlagen erstreckt sich über Aschersleben, Borne, Egel, Förderstedt, Giersleben und Könnern, wodurch sie für ein zukünftiges Wasserstoffinfrastrukturprojekt die interessantesten Windparks im Salzlandkreis sind. Mit insgesamt ca. 350 MWpel installierter Nennleistung bzw. einer durchschnittlichen jährlichen Leistung von ca. 618.500 MWh stellen diese 6 Windparks rund 55 % der Gesamtenergie aus Windkraft zur Verfügung. Sowohl die verfügbare Energie als auch die geographische Lage im Kreis, sind die wichtigsten Kriterien zur Integration in ein Wasserstoffversorgungssystem. Dies stellt mit der entsprechend gekoppelten Technik eine sehr hohe Wasserstoffproduktion und kurze

Transportwege zu den Verbrauchsstellen sicher. Insgesamt sind in der Region Windkraftanlagen mit einer Gesamtleistung von ca. 680 MW_{pel} bzw. 1.193.000 MWh installiert (siehe Tabelle 7).

4.1.2 Photovoltaikanlagen (Freifläche)

Eine weitere relevante Rolle zur Erzeugung grünen Wasserstoffs aus Erneuerbarer Energie in der Region könnten die aktuell installierten Photovoltaikanlagen (PV) spielen. Es wurden nur die Anlagen betrachtet, welche auf Freiflächen und nicht an Gebäuden installiert sind. Hintergrund der Betrachtung war der benötigte Platz für eine Wasserstoffherstellung in unmittelbarer Nähe der Energieerzeugung. Bei Freiflächenanlagen steht dieser weitaus öfter zur Verfügung, um z.B. eine Elektrolyseanlage, Speicheranlagen oder eine Tankstelle zu errichten.

Die installierte Nennleistung aller PV-Freiflächenanlagen beträgt mit ca. 107 MW_{pel} nur 15 % der Leistung der installierten Windkraftanlagen. Die durchschnittliche jährliche Gesamtenergie im Vergleich zur Windkraft beträgt sogar nur rund 6 %. Photovoltaikanlagen zur Herstellung grünen Wasserstoffs spielen somit nur eine Rolle in Bereichen, wo Windkraftanlagen nicht installiert werden können und Transport- bzw. Speicherkosten so hoch sind, dass eine Erzeugung mit Hilfe von PV-Anlagen wesentlich wirtschaftlicher ist.

4.1.3 Biogas- und Wasserkraftanlagen

Einer der größten Biogasanlagen befindet sich im Süden des Salzlandkreises und wird durch die Nordmethan Unternehmensgruppe betrieben. In der 2008 in Betrieb genommenen Anlage werden jährlich ca. 120.000 t Frischmasse in vier Modulen zu Biogas verarbeitet [100]. Neben der Nordmethan Unternehmensgruppe betreibt die MVV Umwelt GmbH eine Biomethanganlage in Staßfurt, in der 62.000 t Frischmasse zu Biogas fermentiert wird. Insgesamt sind an 13 Standorten (siehe Tabelle 7) Biogasanlagen mit einer installierten Gesamtnennleistung von ca. 8,9 MW_{pel} errichtet worden. Der durchschnittliche jährliche Gesamtertrag aller Biogasanlagen liegt bei rund 43.000 MWh.

Wie in Kapitel 2.2.6. beschrieben, ist die Herstellung von Wasserstoff aus Biomasse aktuell noch im Entwicklungsstatus und nur im Labormaßstab oder Technikumsmaßstab umgesetzt. Je nach Weiterentwicklung des Verfahrens könnten die Biogasanlagen im Salzlandkreis voraussichtlich frühestens ab dem Jahre 2030 in ein bis dahin bestehendes Infrastruktursystem integriert werden.

Der kleinste Sektor zur Energiegewinnung aus erneuerbaren Ressourcen innerhalb der Region sind Wasserkraftwerke. In einer ehemaligen Getreidemühle im Zentrum von Bernburg bzw. in einer alten Papierfabrik in Calbe wird Wasserkraft zur Energiegewinnung genutzt. Das dritte und kleinste Wasserkraftwerk befindet sich in Alsleben. Alle drei Anlagen haben zusammen eine installierte Nennleistung von rund 6,12 MW_{pel} und erzeugen jährlich eine durchschnittliche Gesamtenergie von ca. 26.700 MWh.

Aufgrund der historisch gewachsenen Standorte der Wasserkraftanlagen und der dadurch bestehenden engen Platzverhältnisse würde eine Integration aller drei Wasserkraftanlagen in eine Wasserstoffinfrastruktur voraussichtlich nicht in Frage kommen.

Anforderungen an einen
zukünftigen Ausbau der
Wasserstoffinfrastruktur am
Beispiel Staßfurt sowie
Salzlandkreis

Ort	Energieanlagentyp mit instl. Nennleistung [MWpel]				Energieanlagentyp mit durchschn. Jahresenergiemenge [MWh]			
	Wind	Solar	Biogas	Wasserkraft	Wind	Solar	Biogas	Wasserkraft
Alsleben		1,25		0,75		1257		3532
Aschersleben	67,25				118591			
Barby		5,90	0,80			4247	2625	
Bernburg	20,85	19,38	1,26	2,76	32991	9915	7248	9147
Börde-Hakel	13,80				26906			
Borne	64,90				162725			
Calbe		12,90	0,53	2,61		10496	2428	14098
Egeln	62,40	2,20			107150	480		
Etgersleben	9,50				13010			
Förderstedt	40,50				80933			
Frose	30,50				65804			
Gattersleben			1,23				6546	
Giersleben	60,75				51432			
Güsten	5,40	6,40			8521	o.A.*		
Hakeborn			0,52				3507	
Ilberstedt	34,50	3,30			57279	o.A.*		
Kleinmühlhingen			0,55				2579	
Könnern	56,10		o.A.*		97666		o.A.*	
Nienburg	7,50				11526			
Sachsendorf			0,56				2881	
Schönebeck		5,64	0,84			5420	1664	
Staßfurt	12,20	9,41	o.A.*		15545	8295	o.A.*	
Tornitz			0,53				2397	
Unseburg	24,90	1,00			39957	889		

Ort	Energieanlagentyp mit instl. Nennleistung [MWpel]				Energieanlagentyp mit durchschn. Jahresenergiemenge [MWh]			
	Wind	Solar	Biogas	Wasserkraft	Wind	Solar	Biogas	Wasserkraft
Westeregeln		2,40	1,48			2377	8757	
Wolmirsleben			0,60				2851	
Eickendorf		2,5				2567		
∑ instl. Nennleistung	511,05	72,28	8,90	6,12				
∑ durchschn. Jahresenergiemenge					890036	45943	43483	26777
Differenz – Liste Avacon AG	174,00	31,00			303035	19704		
Differenz – Liste Schönebeck		4,40				2797		
Einzelbeträge **	685,05	107,68	8,90	6,12	1193071	68444	43483	26777
Gesamtbetrag ***				807,75				1331776

* Daten wurden für das Jahr 2020 durch die Energiedienstleister aktualisiert, aber keinem Standort zugeordnet

** Summe aus eigener Datenermittlung und den Differenzbeträgen von Avacon AG und Schönebeck

*** Summe der aktualisierten Einzelbeträge

Tab. 7:
Übersicht der instl. Nennleistung und der durchschn. Jahresleistung der verschiedenen Energieanlagen im Salzlandkreis

Aus der im vorangegangenen Abschnitt ermittelten jährlichen Leistung der verschiedenen Anlagen wird nachfolgend die maximale jährliche Wasserstoffkapazität berechnet. Die aktuellen Systeme von PEM-Elektrolyseuren haben einschließlich aller benötigten Aggregate einen spezifischen Energieverbrauch von ca. 5 kWh für einen Normkubikmeter Wasserstoff. Somit werden für ein Kilogramm Wasserstoff 55,55 kWh Energie benötigt ($1\text{Nm}^3 \text{H}_2 \hat{=} \text{ca.}0,09\text{kg H}_2$) [11, 127]. In der folgenden Tabelle wird sowohl die maximale jährliche Wasserstoffkapazität der einzelnen Energieanlagen als auch die jährliche maximale Wasserstoffkapazität aller Anlagen innerhalb des Salzlandkreises dargestellt.

Anforderungen an einen zukünftigen Ausbau der Wasserstoffinfrastruktur am Beispiel Staßfurt sowie Salzlandkreis

Ort	Energieanlagentyp mit maximal produzierbarer Jahresmenge Wasserstoff ¹ [t]			
	Wind	Solar	Biogas	Wasserkraft
Alsleben			23	64
Aschersleben	2156			
Barby		77	48	
Bernburg	600	180	132	166
Börde-Hakel	489			
Borne	229			
Calbe		191	44	256
Egeln	1948	8727		
Etgersleben	237			
Förderstedt	1472			
Frose	1196			
Gattersleben			119	
Giersleben	935			
Güsten	155	o.A.*		
Hakeborn			64	
Ilberstedt	1041	o.A.*		
Kleinmühligen			47	
Könnern	1776		o.A.*	
Nienburg	210			
Sachsendorf			52	
Schönebeck		99	30	
Staßfurt	283	151	o.A.*	
Tornitz			44	

Ort	Energieanlagentyp mit maximal produzierbarer Jahresmenge Wasserstoff1 [t]			
	Wind	Solar	Biogas	Wasserkraft
Unseburg	726	16		
Westeregeln			43	159
Wolmirsleben				52
Eickendorf			47	
Ø max. jährliche Wasserstofftertrag [t]	11.296	9.531	791	423
Ø max. jährliche Wasserstofftertrag aller Anlagen [t]	22.040			
Differenz Liste Avacon AG*	5.510	358		
Differenz Liste Schönebeck*		51		
Ø max. jährliche Wasserstofftertrag mit Aktualisierung [t]	16.806	9.940	791	423
Ø max. jährliche Wasserstofftertrag aller Anlagen mit Aktualisierung [t]	27.959			

Anforderungen an einen zukünftigen Ausbau der Wasserstoffinfrastruktur am Beispiel Staßfurt sowie Salzlandkreis

Tab. 8:
Übersicht der durchschnittlichen jährlichen Wasserstoffmenge für die verschiedenen Energieanlagen im Salzlandkreis

* Daten wurden für das Jahr 2020 durch die Energiedienstleister aktualisiert, aber keinem Standort zugeordnet

¹ Berechnungsgrundlage ist Tabelle 7 i.V.m. Konvertierungswert von Wasserstoff

4.1.4 Speicherung und Transport

Während die Grundlagen zur Erzeugung von grünem Wasserstoff in der Region Salzlandkreis bereits durch die im Kapitel 4.1.1. und 4.1.2. beschriebenen Energieanlagen gegeben sind, fehlt es in der Region generell an Speicher- und Transportkapazitäten. Gegenwärtig besteht somit keine Möglichkeit, Wasserstoff über einen längeren Zeitraum vor Ort zu speichern. Die benötigten Speicher- und Transportkapazitäten ergeben sich aus den ermittelten jährlichen Durchschnittsgesamtertrag der Energieanlagen und des in Kapitel 4.2. zu ermittelnden möglichen Wasserstoffbedarfs. In Kapitel 4.3.3. werden anschließend die verschiedenen Speicher- und Transportkapazitäten dem Modell zugewiesen.

Vorab ist zu bemerken, dass aufgrund der Möglichkeit der vor Ort Herstellung von Wasserstoff und der kurzen Entfernung zwischen Produktionsort und Wasserstofftankstelle und des täglichen Wasserstoffbedarfs voraussichtlich nur mobile Speicher sinnvoll sein werden. Die Aussage stützt sich auf die wissenschaftliche Untersuchung von [128]. Hier wird der Einsatz von Pipeline und Trailer in Verbindung mit dem H₂-Bedarf und der Transportdistanz sowie des Aggregatzustands analysiert bzw. dargestellt. Gemäß [128] ist der Einsatz von Pipelines zum Transport von gasförmigem Wasserstoff erst ab einer Bedarfsmenge von ca. 70 t täglich und einer Entfernung von mindestens 100 km zwischen Herstellungsort und Tankstelle wirtschaftlich. Für Entfernungen <100 km, wie sie in der betrachteten Region vorkommen kann, ist der Transport sowohl von gasförmigen als auch flüssigem Wasserstoff mit Hilfe mobiler Speicher auf Basis eines Lkw wirtschaftlicher [128].

4.2 Beurteilung der verschiedenen Akteure innerhalb einer zukünftigen Wasserstoffinfrastruktur

In diesem Kapitel wird das Potential der verschiedenen Akteure hinsichtlich einer Integration in ein zukünftiges Wasserstoffinfrastruktursystem betrachtet. Basis hierfür ist unter anderem die Anzahl der Fahrzeuge der verschiedenen Betriebe, der jährliche Dieselverbrauch und das sich daraus ergebende Wasserstoffäquivalent.

4.2.1 Kommunale Verwaltung

Als Grundlage für die Berechnung des Wasserstoffbedarfs im Bereich der kommunalen Verwaltungen im Salzlandkreis haben die Kreiswirtschaftsbetriebe und die Kreisverwaltung Bernburg aktuelle Daten zur Verfügung gestellt. Aus den Daten der Stadt Staßfurt wurden wiederum die Daten für die Städte Aschersleben und Schönebeck abgeschätzt, unter der Annahme, dass aufgrund der ähnlichen Einwohnerzahlen die Stadtverwaltungen auch einen vergleichbaren Fuhrpark unterhalten.

Die Kreiswirtschaftsbetriebe Salzlandkreis haben gegenwärtig insgesamt 43 [129, 130] Fahrzeuge im Einsatz. Für den durchschnittlichen Verbrauch und die tägliche durchschnittliche Fahrleistung wurden entsprechende Annahmen aufgrund von Recherchen getroffen. Aus diesen beiden Werten ergibt sich der tägliche Durchschnittsverbrauch pro Fahrzeug. Dieser wiederum war mit der Anzahl der Fahrzeuge und einer jährlichen Einsatzzeit von 200 Tagen Grundlage zur Berechnung des Dieselverbrauchs bzw. des jährlichen Wasserstoffbedarfs. Die Berechnung für insgesamt 43 Fahrzeuge der Kreiswirtschaftsbetriebe ergeben einen jährlichen Dieselverbrauch von ca. 360.000 Litern. Dieser Verbrauch entspricht einem jährlichem Wasserstoffbedarf von ca. 74.000 kg Wasserstoffäquivalent bzw. rund 820.000 m³ (siehe Tabelle 9).

Die Daten für den kommunalen Fuhrpark Salzlandkreis wurden durch die Kreisverwaltung Salzlandkreis mit Sitz in Bernburg und durch die Stadtwerke Staßfurt zur Verfügung gestellt. Aufgrund der fehlenden Daten für die Fahrzeuge in Aschersleben und Schönebeck wurden diese auf Basis der Einwohnerzahlen abgeschätzt. Somit werden ca. 84 Pkw, 60 Nutzfahrzeuge <7,5t und 16 Nutzfahrzeuge >7,5t im gesamten Kreis eingesetzt [131], die für einen zukünftigen Austausch gegen wasserstoffbetriebene Fahrzeuge in Frage kämen. Hochgerechnet wäre das ein jährlicher Dieselverbrauch von ca. 179.500 Litern, was ein Wasserstoffäquivalent von ca. 62.000 kg bzw. ca. 690.000 m³ bedeuten würde (siehe Tabelle 10).

	Anzahl Dieselfahrzeuge	Ø-Verbrauch/ 100 km [l]	Ø tägl. km/ Fahrzeug	Ø tägl. Verbrauch/ Fahrzeug [l]
Pressmüllfahrzeuge	36	40	120	48
Lkw-Kipper	4	25	70	17,5
Sattelzugmaschine	2	o.A.	o.A.	o.A.
Kehrmaschinen	1	o.A.	o.A.	o.A.
vergleichbar H ₂ -Pressmüllfahrzeug		8	120	10
vergleichbar H ₂ -Lkw-Kipper		8	70	6

Anforderungen an einen zukünftigen Ausbau der Wasserstoffinfrastruktur am Beispiel Staßfurt sowie Salzlandkreis

Jährlicher Treibstoffbedarf Diesel [l] gesamt*

Diesel [l] gesamt*	359.600
H _{2aq} [kg] gesamt*	73.600
H _{2aq} [m ³] gesamt ³⁾	817.778
Diesel Gesamtkosten [€] ¹⁾	485.460
H _{2aq} Gesamtkosten [€] ²⁾	699.200

Tab. 9:
Übersicht der jährlichen Treibstoffbedarfe und -kosten sowie Wasserstoff-äquivalente – Kreiswirtschaftsbetriebe

* bei 200 Einsatztagen im Jahr

¹⁾ Diesel 1,35€/l, Stand Juni.2021, Quelle: ADAC Kraftstoffpreisentwicklung

²⁾ H₂ 9,50€/kg, Stand Juni 2021, Quelle: <https://h2.live/>

³⁾ 0,09kg Wasserstoff entsprechen 1Nm³

Zum Einsatz im Pkw-Bereich könnten die Fahrzeuge Hyundai Nexa oder Toyota Mirai II kommen. Für den Nutzfahrzeubereich wäre unter anderem der H₂ Panel Van von DHL oder der Peugeot E-Expert-Hydrogen vorstellbar. Nutzfahrzeuge >7,5t könnten als Wasserstoffumbauten der Firmen Faun oder Clean Logistics eingesetzt werden.

Anforderungen an einen zukünftigen Ausbau der Wasserstoffinfrastruktur am Beispiel Staßfurt sowie Salzlandkreis

	Anzahl	Ø-Verbrauch/ 100 km [l]	Ø tägl. km/ Fahrzeug	Ø tägl. Verbrauch/ Fahrzeug [l]
Pkw Benzin	56	6,97	37	2,58
Pkw Gas	28	5,4	55	2,97
Pkw Diesel	28	5,86	22	1,29
Nutzfahrzeuge <7,5t	60	11,90	54	6,43
Nutzfahrzeuge >7,5t	16	28,10	60	16,86
vergleichbare H ₂ -Pkw*	84	1,1	30	0,33
vergleichbare Nutzfahrzeuge <7,5t	60	6	54	3,24
vergleichbare Nutzfahrzeuge >7,5t	16	9	60	4,80

Jährlicher Treibstoffbedarf

Diesel [l] gesamt*	179.420
H _{2äq} [kg] gesamt*	61.794
H _{2äq} [m ³] gesamt ³⁾	685.600
Diesel Gesamtkosten [€] ¹⁾	242.217
H _{2äq} Gesamtkosten [€] ²⁾	586.188

* als Ersatz für Benzin-/Dieselantrieb

** Quelle: Stadtwerke Staßfurt, Stand 2018

*** bei 200 Einsatztagen im Jahr

¹⁾ Diesel 1,35€/l, Stand Juni.2021, Quelle: ADAC Kraftstoffpreisentwicklung

²⁾ H₂ 9,50€/kg, Stand Juni 2021, Quelle: <https://h2.live/>

³⁾ 0,09kg Wasserstoff entsprechen 1Nm³

4.2.2

Logistik- und Schwerlastverkehr

Eine signifikante Rolle im Bereich der Wasserstoffinfrastruktur spielt der Logistik- und der allgemeine Schwerlastverkehr innerhalb des Salzlandkreises. Zum einen sind es die in der Region angemeldeten Fahrzeuge, zum anderen der Schwerlastverkehr, die die beiden Autobahntankstellen an der Bundesautobahn A14 zur Treibstoffversorgung nutzen.

Tab. 10:
Übersicht der jährlichen Treibstoffbedarfe und -kosten sowie Wasserstoff-äquivalente – Stadtwerke Staßfurt bzw. Kreisverwaltung des Salzlandkreis

Als Berechnungsgrundlage zur Ermittlung des Wasserstoffbedarfs für die im Kreis angemeldeten Fahrzeuge wurden die aktuellen Daten des Kraftfahrzeugbundesamtes (KBA) genutzt (siehe Tabelle 11). Dabei wurde davon ausgegangen, dass alle angemeldeten Lkw mit Dieselmotor angetrieben werden. Für den Bereich der angemeldeten Pkw wurden nur die gewerblichen Fahrzeuge betrachtet und davon ausgegangen, dass ca. 60% der Fahrzeuge einen Dieselmotor besitzen. Die jährliche durchschnittliche Fahrleistung entstammt den Daten des KBAs. Der durchschnittliche Verbrauch der Fahrzeuge sowohl im Dieselmotorbereich als auch im Wasserstoffäquivalent basieren auf Abschätzungen. Somit ergibt sich aus den zusammengetragenen Daten ein jährlicher Dieselmotorverbrauch von ca. 38,27 Mio. Litern und ein jährliches Wasserstoffäquivalent von rund 17,42 Mio. kg bzw. 193,58 Mio. m³ für diesen Bereich.

.....
 Anforderungen an einen
 zukünftigen Ausbau der
 Wasserstoffinfrastruktur am
 Beispiel Staßfurt sowie
 Salzlandkreis

	Pkw privat¹⁾	davon Diesel⁷⁾	Pkw gewerb- lich¹⁾	davon Diesel⁸⁾	Lkw¹⁹⁾
Aschersleben	12.956	4.319	1.366	820	989
Bernburg	15.720	5.240	1.769	1.061	1.464
Schönebeck	14.695	4.898	1.404	842	1.471
Staßfurt	13.178	4.393	1.036	622	1.102
restl. Salzlandkreis	48.869	16.290	2.082	1.249	3.852
Gesamt	105.418	35.139	7.657	4.594	8.878

Jährlicher Treibstoffbedarf

Ø jährliche Fahrleistung/ Pkw [km] ²⁾	12.000
Ø jährliche Fahrleistung/ Lkw [km] ²⁾	16.000
Ø Diesel Verbrauch Pkw [l/100 km] ³⁾	5
Ø Diesel Verbrauch Lkw [l/100 km] ³⁾	25
Ø H _{2äq} Verbrauch Pkw [kg/100 km] ³⁾	1,1
Ø H _{2äq} Verbrauch Lkw [kg/100 km] ³⁾	9
jährlicher Dieselmotorverbrauch Pkw [l]	600
jährlicher Dieselmotorverbrauch Lkw [l]	4.000

Anforderungen an einen zukünftigen Ausbau der Wasserstoffinfrastruktur am Beispiel Staßfurt sowie Salzlandkreis

	Pkw privat ¹⁾	davon Diesel ⁷⁾	Pkw gewerblich ¹⁾	davon Diesel ⁸⁾	Lkw ¹⁹⁾
jährliches H _{2äq} Pkw [kg]					132
jährliches H _{2äq} Lkw [kg]					1.440.26
jährlicher Gesamtverbrauch Diesel [l] ⁴⁾					38.268.520
jährliches gesamt H _{2äq} [kg] ⁴⁾					17.422.712
H _{2äq} gesamt [m ³] ¹⁰⁾					193.585.689
Diesel Gesamtkosten [€] ⁵⁾					51.662.502
H _{2äq} Gesamtkosten [€] ⁶⁾					165.515.764

Tab. 11:
Übersicht über die zugelassenen Pkw und Lkw im Salzlandkreis mit Berechnung des Jahrestreibstoffbedarfs

- ¹⁾ angemeldete Fahrzeuge, Quelle: Kraftfahrzeugbundesamt
- ²⁾ Quelle: Kraftfahrzeugbundesamt inländische Fahrleistung
- ³⁾ Quelle: eigene Abschätzung
- ⁴⁾ basierend auf alle Lkw und gewerbliche Pkw
- ⁵⁾ Diesel 1,35€/l, Stand Juni.2021, Quelle: ADAC Kraftstoffpreisentwicklung
- ⁶⁾ H₂ 9,50€/kg, Stand Juni.2021, Quelle: <https://h2.live/>
- ⁷⁾ Vgl. KBA - ca. 30% der angemeldeten Pkw Dieselfahrzeuge
- ⁸⁾ Annahme: 60% der gewerblichen Pkw sind Dieselfahrzeuge
- ⁹⁾ Annahme: 100% aller angemeldeten Lkw sind Dieselfahrzeuge
- ¹⁰⁾ ca. 0,09kg Wasserstoff entsprechen 1Nm³

Neben dem Einsatz der Wasserstofftechnologie im Schwerlastverkehr kann dieser auch ein wichtiger Faktor im Bereich der Logistikhilfsfahrzeuge wie Gabelstapler oder Niederflurfahrzeuge sein. Zusätzlich zur Nutzung eines Antriebes mit nachhaltigem Treibstoff ist vor allem die verfügbare Betriebszeit der Fahrzeuge ein sehr wichtiges Argument für deren Einsatz. Während bei elektrisch betriebenen Fahrzeugen der Ladeprozess relativ lange dauert, ist das wasserstoffangetriebene Fahrzeug innerhalb weniger Minuten wieder einsatzbereit. Gerade bei großen Logistikzentren, wie sie auch im Salzlandkreis vorhanden sind, aber auch bei den Kleinunternehmen mit nur einer geringen Anzahl an Fahrzeugen spielt dies eine wichtige Rolle.

Die Daten zur Berechnung des Wasserstoffbedarfs für die Logistikhilfsfahrzeuge in der Region wurden unter anderem von einem Fahrzeughersteller, dem Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau und zwei Unternehmen mit Distributionslagern in Bernburg bzw. Könnern zur Verfügung gestellt. Aus diesen Daten ergibt sich der Einsatz von rund 460 Fahrzeugen innerhalb der Region. Zur Berechnung des Wasserstoffäquivalents wurde ein Verbrauch von ca. 300 kg Wasserstoff pro 1.000 Betriebsstunden, 200 Arbeitstage im Jahr und ein täglichen Gesamtarbeitseinsatz von fünf Stunden zu Grunde gelegt. Aus diesen Werten ergibt sich ein jährliches Wasserstoffäquivalent von ca. 140.000 kg bzw. 1,55 Mio. m³ (siehe Tabelle 12) [132–135].

	Gabelstapler	Mitgänger Hochhubfahrzeuge	Mitgänger Niederhubfahrzeuge	Gesamt
Lidl ¹⁾				47
Bauerngut ²⁾	1	26	12	39
Restl. Salzlandkreis ³⁾	213	8	160	381

Anforderungen an einen zukünftigen Ausbau der Wasserstoffinfrastruktur am Beispiel Staßfurt sowie Salzlandkreis

Jährlicher Treibstoffbedarf

Ø Betriebsstunden täglich/Fahrzeug ⁴⁾	5
Arbeitstage/Jahr ⁴⁾	200
$H_{2\text{äq}}$ Fahrzeug/1000 Arbeitsstunden [kg] ⁵⁾	300
$H_{2\text{äq}}$ gesamt [kg]	140.100
$H_{2\text{äq}}$ gesamt [m ³] ⁶⁾	1.556.667

¹⁾ Quelle: Lidl, Logistikzentrum Bernburg, Angabe nur Gesamtzahl

²⁾ Quelle: Bauerngut, Bückeburg

³⁾ Quelle: VDMA, Frankfurt

⁴⁾ eigene Abschätzung

⁵⁾ Quelle: Toyota Material Handling

⁶⁾ 0,09 kg Wasserstoff entsprechen 1Nm³

Ein weiterer Wasserstoffbedarf könnte im Bereich des Autohofes Brumby an der Bundesautobahn BAB14 entstehen. Dieser wurde im Jahr 2016 in Betrieb genommen und hat drei Zapfinseln mit insgesamt sechs Pkw-Mehrfachzapfstellen und zwei Zapfinseln mit insgesamt vier Dieselpapfstellen für Lkw. Der zukünftige Wasserstoffbedarf für die Tankstelle des Autohofes Brumby ergibt sich aus einer Annahme des Fraunhofer Institutes ISI aus dem Jahr 2020. Hierbei wurden Tankstellen in die Größen XS bis XXL eingeteilt. Grundlage für die Einteilung war unter anderem die Anzahl der Zapfstellen für

Tab. 12:
Übersicht über die zugelassenen Pkw und Lkw im Salzlandkreis mit Berechnung des Jahrestreibstoffbedarfs

Anzahl der Lkw-Dieselauslässe [Stk.]	4
Anzahl der tgl. Lkw [Stk./d]	150
$H_{2\text{äq}}$ täglich [kg]	7.500
$H_{2\text{äq}}$ Gesamt* [kg]	2.700.000

* Annahme: 360 Arbeitstage/Jahr

Tab. 13:
Darstellung perspektivischer Wasserstoffbedarf/absatz am Autohof Brumby – Wasserstoff-äquivalentbetrachtung für Lkw-Dieselmkraftstoff

Lkw-Diesel. Aufgrund der vier vorhandenen Dieselpumpstellen ergibt sich aus der aufgeführten Tabelle ein täglicher Wasserstoffbedarf von ca. 7,5t. Bei einer weiteren Annahme von 360 Arbeitstagen im Jahr beläuft sich der Jahresbedarf an Wasserstoff auf rund 2.700 t [60] (siehe Tabelle 13).

4.2.3 Personennahverkehr

Der Hauptteil des Personennahverkehrs im Salzlandkreis wird, wie in Kapitel 3.5.3. beschrieben, durch die Kreisverkehrsgesellschaft Salzland mbH durchgeführt. Für die Gebiete Aschersleben, Bernburg und Schönebeck wurden die Daten direkt von der KVG für diese Studie zur Verfügung gestellt. Insgesamt werden im Salzlandkreis 112 [136] hauptsächlich dieselbetriebene Busse eingesetzt. Im Stadtbereich Staßfurt werden jährlich ca. 910.000 km zurückgelegt, für den restlichen Salzlandkreis lagen keine Daten vor. Für die zurückgelegte Fahrstrecke in Staßfurt werden jährlich ca. 350.000 Liter Diesel verbraucht. Für den restlichen Salzlandkreis liegt der jährliche Dieselverbrauch bei ca. 790.000 Litern [136] und der Gasverbrauch bei ca. 253.000 m³ Gas [136]. Aus dem jährlichen Gesamtverbrauch an Dieselmotorkraftstoff von ca. 1.143.000 Litern ergibt sich ein jährlicher Wasserstoffbedarf von rund 284.000 kg bzw. ca. 3.160.000 m³ (siehe Tabelle 14). Ein Austausch der dieselbetriebenen Kraftomnibusse gegen Modelle von Mercedes oder Van Hool wäre generell möglich. Aufgrund der zu erwartenden hohen Investitionssumme wäre ein Anreizprogramm für die Kreisverkehrsgesellschaft Salzland mbH seitens des Landes Sachsen-Anhalt und /oder des Bundes sinnvoll.

Neben dem busbetriebenen ÖPNV ist der schienenbetriebene ÖPNV eine weitere Säule des Nahverkehrs innerhalb der Region. Von den rund 2300 km Schienenstrecke [137] des Landes Sachsen-Anhalt sind rund 48% elektrifiziert [137]. Der andere Teil des Schienennetzes wird durch dieselbetriebene Schienenfahrzeuge abgedeckt. Ähnlich verhält es sich auch mit dem Schienenverkehr des Salzlandkreises. Um den Streckenanteil mit dieselbetriebenen Fahrzeugen weiter zu reduzieren, laufen seitens des Landes Sachsen-Anhalt und der Deutschen Bahn verschiedene Projekte.

- Aktuell wird überprüft, ob die dem Salzlandkreis betreffenden Strecken Goslar – Halle, Aschersleben – Dessau und Schönebeck – Güsten elektrifiziert werden können.
- Mit dem Verein Bahntechnologie Dessau e.V. und weiteren 50 Mitgliedern des Bahntechnologie Bündnisses TRAINS soll zunächst auf der Strecke zwischen Dessau und Wörlitz ein wasserstoffangetriebener Personentriebwagen getestet werden. Nach erfolgreichen Tests sollen weitere Strecken für den Einsatz des Wasserstoffzuges unter anderem auch in der betrachteten Region folgen.

Aufgrund der Komplexität des Themas im Bereich des öffentlichen Nahverkehrs, der aktuellen Situation vor Ort und der fehlenden Daten bzw. Information hinsichtlich der geplanten Umsetzung, wird der Bereich des Schienennahverkehrs im Infrastrukturmodell nicht berücksichtigt. Hierzu sollten weitere Recherchen in einem späteren Zeitraum durchgeführt werden.

Anforderungen an einen zukünftigen Ausbau der Wasserstoffinfrastruktur am Beispiel Staßfurt sowie Salzlandkreis

	KOM ¹⁾	Gelenkbus	15 m KOM ¹⁾	Kleinbus	Gesamt
Dieselantrieb	55		5	5	65
Gasantrieb	19				19
E-Antrieb					0
Hybrid-Antrieb		2			2
Busse Staßfurt extern**					26

Jährlicher Treibstoffbedarf

Diesel [l] KVG*	1793.681
Gas [m ³]*	253.090
Diesel Staßfurt extern**	350.000
Diesel [l] gesamt	1.143.681
H _{2äq} [kg] gesamt	284.286
H _{2äq} [m ³] gesamt ⁶⁾	3.158.738
Ø Diesel [l] pro Bus	10.211
Ø km pro Bus Diesel ²⁾	25.529
Ø H _{2äq} [kg] pro Bus	2.538
Ø km pro Bus H ₂ ³⁾	28.203
Diesel Gesamtkosten [€] ⁴⁾	1.543.969
H _{2äq} Gesamtkosten [€] ⁵⁾	2.700.721

¹⁾ Quelle: Lidl, Logistikzentrum Bernburg, Angabe nur Gesamtzahl

²⁾ Quelle: Bauerngut, Bückeburg

³⁾ Quelle: VDMA, Frankfurt

⁴⁾ eigene Abschätzung

⁵⁾ Quelle: Toyota Material Handling

⁶⁾ 0,09 kg Wasserstoff entsprechen 1Nm³

Tab. 14:
Übersicht über den jährlichen Treibstoffbedarf für die Fahrzeuge der Kreisverkehrsgesellschaft

4.3 Konzeptentwicklung zum Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur am Standort Staßfurt respektive im Salzlandkreis

»Ein Modell ist eine vereinfachte Abbildung der Wirklichkeit. Es bildet dabei nicht die komplette Welt oder das Universum ab, sondern nur einen Ausschnitt daraus. Wie groß dieser Ausschnitt ist, hängt davon ab, wie die Grenzen des Modells festgelegt sind. Außerdem kann das Modell entweder nur sehr wenig von der Wirklichkeit abweichen oder aber sehr stark abstrahiert sein und viele Komponenten der Realität außen vorlassen« [138].

Der Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur in Deutschland steht aktuell in der Startphase. Die Planung und Errichtung der benötigten Systembereiche ist ein zeitlich aufwändiger, komplexer und kostenintensiver Prozess. Um diese Planung für die Beteiligten deutlich zu vereinfachen, gibt es mittlerweile eine Anzahl von verschiedenen Modellen, die sich mit dem Infrastrukturaufbau befassen. Das Kapitel 4.3.1. soll einen Einblick über die verschiedenen Grundtypen von Modellen geben, während sich anschließend das Kapitel 4.3.2. mit der Auswahl des entsprechenden Modells befasst.

4.3.1 Übersicht von verschiedenen Modellarten zur Konzeptionierung einer Infrastruktur

Wie schon in der Einleitung zum Kapitel 4.3. beschrieben, gibt es mittlerweile zahlreiche Modelle, die sich mit dem Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur befassen. Sie befassen sich mit den unterschiedlichsten Bereichen, z.B. nur auf der Makroebene mit der Wechselwirkung der Technologien, oder sie umfassen ein breites Spektrum von Aspekten. Hierbei werden die unterschiedlichsten Daten zugrunde gelegt. Sehr vereinfacht kann festgehalten werden, dass es bei den Modellen vier verschiedene Betrachtungskriterien gibt. Der zeitliche und räumliche Aufbau der Infrastruktur: Hierbei ist eine GIS-basierte Modellierung die Grundlage, d.h. man bedient sich der Technologie der geografischen Informationssysteme (GIS). Diese Systeme befassen sich mit der Erfassung und der Speicherung raumbezogener Daten zum Zweck der anschließenden Analyse und Modellierung. Eingesetzt wird diese Art der Datenerfassung hauptsächlich in den Bereichen Transport, Logistik, Verkehr, aber auch im Bauwesen, der Telekommunikation oder im Umweltbereich. GIS-Systeme lassen sich in verschiedene Systeme unterteilen:

- Land-Informationssysteme
- Raum-Informationssysteme
- Umwelt-Informationssystem
- Netz-Informationssystem

Vor allem GIS-Daten der Bevölkerungsverteilung, der Landschaftsprofile, der Infrastruktur und des Verkehrs sind für Wasserstoffinfrastrukturmodelle von Interesse. Andere Modelle befassen sich mit der Lebenszyklus-Analyse und der Zielsetzung, den Lebenszyklus bzw. den Energie-/Materialfluss des zu betrachtenden Objektes in seine Einzelteile zu zerlegen. Diese werden anschließend unter anderem hinsichtlich der Energieeffizienz, der Treibhausgasemissionen oder allgemeiner Kosten analysiert.

Die Energiesystem-Analyse befasst sich bei der Modellierung nur mit dem Energiesektor, einschließlich der Angebots- und Nachfrageseite. Verschiedene Technologien werden hierbei hinsichtlich eines konkurrierenden Verhaltens hin analysiert. Dabei werden unter anderem unterschiedlichste Einflüsse wie z.B. der Einfluss von Rahmenbedingun-

gen, der Einfluss von zentraler/dezentrale Energieversorgung oder sektorenspezifische Einflüsse auf den Energiebereich untersucht.

Letztes Betrachtungskriterium ist die Gegenüberstellung der aktuell vorhandenen Infrastruktur mit der zukünftigen Wasserstoffnachfrage. In Bezug auf den Ausbaus der H₂-Tankstellennetzes im Vergleich zum zukünftigen Wasserstoffbedarf ist ein wichtiger Punkt, oder der Verbreitungsgrad von wasserstoffangetriebenen Fahrzeugen bzw. die Nutzungshäufigkeit dieser Fahrzeuge [139].

4.3.2 Modellauswahl

Aufgrund der in Kapitel 3 beschriebenen aktuellen Situation am Standort Staßfurt, respektive im Salzlandkreis und der dazu in Kapitel 4.1. und 4.2. erhobenen Daten ergibt sich die Auswahl des MOREHyS-Modells. Ziel des MOREHyS-Modells (Model of Optimisation of Regional Hydrogen Supply) ist es, eine Wasserstoffinfrastruktur hinsichtlich des geographischen und zeitlichen Aufbaus zu entwickeln. Des Weiteren werden verschiedene Bedarfsszenarien betrachtet, um über ökonomische und ökologische Auswirkungen bei der Umsetzung einer Wasserstoffinfrastruktur innerhalb der zu betrachtenden Region Auskunft zu geben.

Die Umsetzung des Salzland-Modells wird angelehnt am MOREHyS-Modell in vier Stufen durchgeführt:

Stufe 1 nutzt die in Kapitel 4.1 ermittelte aktuelle Energiekapazität der verschiedenen Energieanlagen und den in Kapitel 4.2. ermittelten Wasserstoffbedarf aus dem Verkehrssektor. Aus diesen beiden Werten und der entsprechenden Wasserstoffstrategie des Landes Sachsen-Anhalt wird in Stufe 2 die zukünftige Energiekapazität bzw. der Wasserstoffbedarf für die Jahre 2030, 2040 und 2050 ermittelt. Aus den Daten von Stufe 1 und 2 ergibt sich anschließend in Stufe 3 der Bedarf an Speicher- und Transportkapazitäten und die Anzahl der benötigten Wasserstofftankstellen bzw. deren mögliche Standorte. Ergebnis aus der Modellierung der Wasserstoffinfrastruktur wird abschließend in Stufe 4 die Erstellung einer Roadmap für den Raum Staßfurt, respektive des Salzlandkreis, sein.

Des Weiteren wird eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für die Umstellung auf eine Wasserstofftechnologie innerhalb der kommunalen Betriebe inklusive der Kreisverkehrsbetriebe durchgeführt. Diese Berechnung geschieht in der Ausprägung eines best-worst-case Szenarios, d.h. es werden die Auswirkungen verschiedener Preisentwicklungen von Dieselmotorkraftstoff und Wasserstoff auf die jährlichen Treibstoffkosten betrachtet.

4.3.3 Modellübertragung auf den Standort Staßfurt respektive Salzlandkreis

Als Ergebnis dieser Studie soll ein adäquates Infrastrukturmodell für den Einsatz von Wasserstoff im Verkehrssektor entstehen, um aus diesem ein zukünftiges Handeln hinsichtlich Planung und Ausgestaltung abzuleiten. In den folgenden Abschnitten dieses Kapitels wird beschrieben, wie solch ein Modell aussehen könnte.

Die Recherchen zur Erstellung des Modells haben ergeben, dass eine Infrastruktur hinsichtlich des Einsatzes für Wasserstoff innerhalb der Region Salzlandkreis bisher nur teilweise vorhanden ist. Hier sind es vor allem die bestehenden Energieanlagen, die einen Hauptanteil am Modell haben werden. Aktuell ist die Herstellung von Wasserstoff in der Region noch nicht umgesetzt. Unter anderem werden folgende Daten in das Modell einbezogen:

.....
Anforderungen an einen
zukünftigen Ausbau der
Wasserstoffinfrastruktur am
Beispiel Staßfurt sowie
Salzlandkreis
.....

- Der jährliche Gesamtertrag aller installierter Windkraft- und Solaranlagen und die daraus resultierende maximale jährliche Wasserstoffproduktionskapazität. Hierbei wird zugrunde gelegt, dass maximal 30% der Anlagen für die Wasserstoffherstellung zur Verfügung stehen. Die benötigte Speicher- und Transportkapazität ergibt sich daraus und wird folgend bei jedem einzelnen Szenario beschrieben. Aufgrund der örtlichen Gegebenheiten bei den Wasserkraftanlagen und dem Stand der technischen Entwicklung zur Herstellung von Wasserstoff aus Biogas wurden beide Anlagenarten vorerst nicht in die Betrachtung mit einbezogen. Dies sollte in einem späteren Schritt geschehen.
- Der Wasserstoffbedarf für die Bereiche kommunale Fahrzeuge, busbetriebener ÖPNV und Logistikhilfsfahrzeuge. Für den Bereich des Schwerlastverkehrs wird am Anfang der Betrachtung nur die Wasserstoffversorgung am Autohof Brumby betrachtet. Auch hier sollte eine erneute Auswertung aufgrund von Fahrzeugverfügbarkeiten zu einem späteren Zeitraum geschehen.
- Generelle wird im Modell davon ausgegangen, dass im Jahr 2050 alle betrachteten Fahrzeuge auf Wasserstoffantrieb umgestellt wurden und sich somit ein Wasserstoffbedarf von 100% ergibt. Das Markthochlaufszenario für die Jahre 2025 bis 2050 ergibt sich rückgerechnet aus dem Wert von 2050. Der jeweilige Faktor für die entsprechende Jahre wurde aus der Studie [60] (Seite 9, Tabelle 2 »optimistisches Markthochlaufszenario für schwere BZ-Lkw«, Spalte Bestandteil BZ-Lkw am Gesamtmarkt schwerer Lkw) übernommen und stellt den Anteil an der Gesamtmenge von 2050 dar.

Aus der Tabelle 15 gehen somit das Fahrzeugaufkommen der verschiedenen Fahrzeugbereiche und der jeweilige Wasserstoffbedarfe in den Jahren 2025 bis 2050 hervor. Der Zeitraum bis 2025 wurde hierbei nicht betrachtet, da er ausschließlich zur Planungs- und Inbetriebnahmephase zur Verfügung steht.

Der Aufbau des Wasserstoffinfrastruktursystems sollte sich nach der Auswertung der ermittelten Daten aus drei Phasen zusammensetzen.

Eine Aufbauphase, in der die vorhandenen Energieanlagen genutzt werden und erste Herstellungsorte für Wasserstoff, Tankstellen und Verteilungssysteme entstehen. Eine Erweiterungsphase, bei der die bestehende Infrastruktur weiter ausgebaut wird, und vor allem die zur Verfügung stehende maximale Wasserstoffkapazität weitestgehend ausgenutzt wird. Dafür werden bestehende Produktionsstandorte je nach Möglichkeit erweitert bzw. nach Bedarf weitere Produktionsstandorte in das System integriert. Das gleiche gilt auch für Transport- und Speicherkapazitäten. In der Ausbauphase wird das Infrastruktursystem auf den maximalen Wasserstoffbedarf im Jahr 2050 ausgelegt. Das bedeutet, dass Energieanlagen ausgebaut oder neu erschlossen werden müssen, da die Kapazität der vorhandenen für den zukünftigen Wasserstoffbedarf nicht ausreicht. Vergleichbar wird die Situation dann auch bei den Herstellungs-, Speicher- und Transportkapazitäten sein. Nachfolgend werden alle drei Phasen detailliert beschrieben.

Die Aufbauphase (2020 – 2030) startet mit dem Ausbau des Windparks »Förderstedt« Staßfurt zum ersten Produktionsstandort für grünen Wasserstoff in der Region. Aktuell ist dort vor Ort ein Windkraftanlagenpark mit einer Nennleistung von rund 40 MWpel mit einer jährlichen Energiemenge von 1.500 MWh in Betrieb (siehe Tabelle 7). Bei einer Nutzung von 30% der jährlichen Leistung und einer entsprechend ausgelegten Elektrolyseanlagen ergibt sich daraus ein Gesamtwasserstofftertrag von ca. 500 t Wasserstoff pro Jahr. Dieser Ertrag wäre voraussichtlich ausreichend, um bis in das Jahr 2030 vier Busse des ÖPNV, fünf Fahrzeuge der kommunalen Dienste > 2,8 t, ca. 20 Logistikhilfsfahrzeuge in den ansässigen Logistikzentren und weitere 33 wasserstoffbetriebene Lkw täglich mit Wasserstoff zu versorgen. Für die Versorgung im Jahr 2025 reicht eine Wasserstofftankstelle auf dem Betriebshof der Kreisverkehrsbetriebe, welche

	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Bestand an der Gesamtmenge in der Region [%]	7	22	35	61	85	100
Anzahl der Lkw	25	354	1.611	4.603	7.546	8.878
Anzahl der Busse (ÖPNV)	2	4	20	58	95	112
Anzahl der kommunalen	2	5	22	62	102	120
Nutzfahrzeuge > 2,8t	13	183	834	2.382	3.905	4.594
Anzahl der Pkw gewerblich	5	19	85	242	397	467
Anzahl der Logistikhilfsfahrzeuge	11	33	53	92	128	150
Anzahl der tgl. Lkw-Tankungen (Autohof Brumby)	7	22	35	61	85	100

Anforderungen an einen zukünftigen Ausbau der Wasserstoffinfrastruktur am Beispiel Staßfurt sowie Salzlandkreis

Perspektivische Wasserstoffbedarfe	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Wasserstoffbedarf anteilig [%]	7	22	35	61	85	100
jährlicher $H_{2\text{äq}}$ (Pkw und Lkw) [t]	49	696	3.162	9.034	14.809	17.423
jährlicher $H_{2\text{äq}}$ (Bus) [t]	1	11	52	147	242	284
jährlicher $H_{2\text{äq}}$ (Komm. Nutzfahrzeug) [t]	1	6	27	77	126	148
jährlicher $H_{2\text{äq}}$ (Logistikhilfsfahrzeug) [t]	1	6	25	73	119	140
jährlicher $H_{2\text{äq}}$ (Autohof Brumby) [t]	100	594	945	1.647	2.295	2.700
jährlicher $H_{2\text{äq}}$ gesamt [t]	151	1.312	4.211	10.977	17.591	20.695

Tab. 15:
Übersicht über das Fahrzeugaufkommen verschiedener Bereiche und Wasserstoffäquivalente – Salzlandkreis

sowohl die eigenen Busse als auch die kommunalen Fahrzeuge und die ersten wasserstoffbetriebenen Lkw versorgen kann. Bis ins Jahr 2030 sollte dann eine weitere Wasserstofftankstelle am Autohof Brumby in Betrieb gehen. Ursache einer möglichst schnellen Inbetriebnahme einer Wasserstofftankstelle an der Bundesautobahn BAB 14 ist die Versorgung des Schwerlastverkehrs mit Wasserstoff. Aktuell ist es nicht möglich, die Versorgung eines wasserstoffbetriebenen Lkw auf einer Tour z.B. von Hamburg bzw. Rostock nach Frankfurt oder München sicherzustellen (siehe Abbildung 10). Eine Wasserstofftankstelle am Standort Brumby würde diese Lücke schließen. Des Weiteren sollten 2030 stationäre Speicher an der Elektrolyse-Anlage und den Tankstellen von jeweils ca. 500 kg Kapazität installiert werden. Zum Transport des Gases vom Produktionsstandort zu Tankstelle ist zu diesem Zeitpunkt ein Versorgungs-Lkw und drei mobile Speicher mit jeweils rund 350 kg Kapazität ausreichend. Diese Speicher- und Transportkapazitäten sollten bis in das Jahr 2030 so weit ausgebaut werden, dass eine tägliche Versorgung mit rund 1,7 t Wasserstoff Gesamtspeicherkapazität pro Tag gewährleistet ist. Voraussichtlich ab dem Jahr 2030 wird die Kapazität zur Wasserstoffproduktion am Standort Staßfurt Förderstedt an ihre Grenzen stoßen. Die Zahl der wasserstoffbetriebenen Fahrzeuge wird stetig und voraussichtlich sehr schnell steigen. Vergleichbar werden auch die Nutzfahrzeughersteller wie Faun Umwelttechnik GmbH ihre Kapazitäten ausbauen.

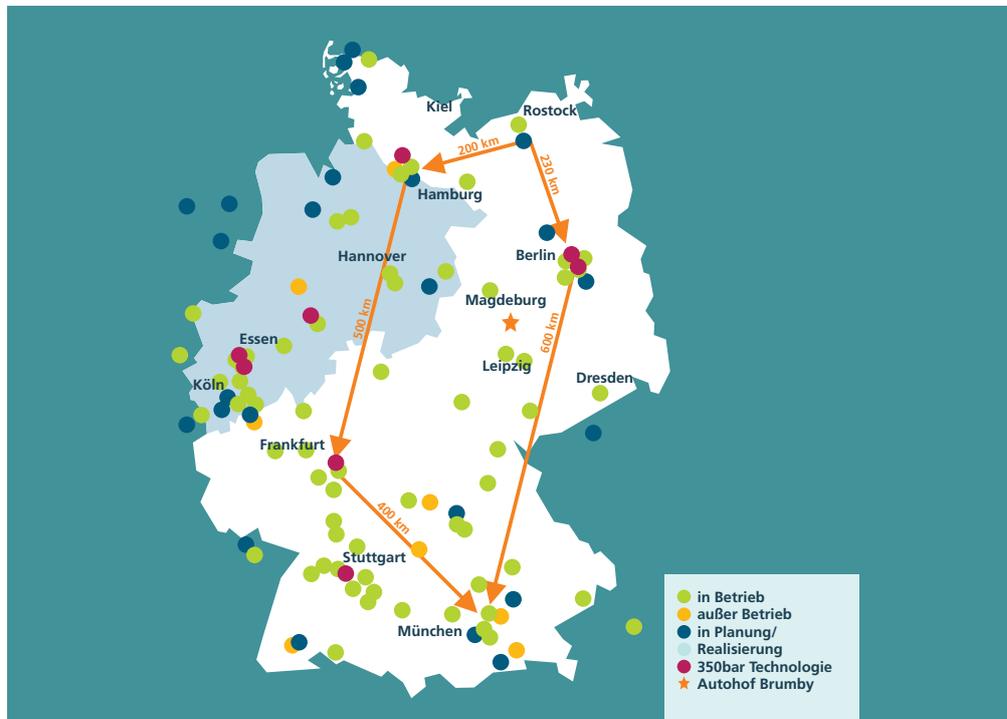


Abb. 10: Übersicht über Wasserstoff-tankstellen in Deutschland und Darstellung der Abdeckungsproblematik hinsichtlich der Versorgung von Lkw, [7] Stand 2021

Das Wasserstoffinfrastrukturprojekt des Salzlandkreises würde somit voraussichtlich ab dem Jahr 2030 in die Erweiterungsphase gehen. Zu diesem Zeitpunkt ist absehbar, dass vor allem am Autohof Brumby der Wasserstoffbedarf signifikant steigen wird. Aus diesem Grund sollte ab dem Jahr 2030 zum Beispiel am Windpark Könnern bzw. in der Umgebung, eine weitere Wasserstoffproduktionsstätte errichtet werden. Mit kurzen Wegen zum Autohof Brumby und zur Wasserstofftankstelle des Kreisverkehrsverbundes am Betriebshof wäre der Standort Könnern aus logistischer Sicht optimal. Die Erweiterung würde eine Erhöhung der Wasserstoffkapazität um ca. 600 t/Jahr bedeuten. Beide Produktionsstätten könnten somit den Bedarf von ca. 1.000 t/Jahr Wasserstoff für die zu erwartenden ca. 100 Fahrzeuge im Nutz- und Schwerlastverkehr bzw. der ca. 85 Logistikhilfsfahrzeuge in der Region abdecken. Aufgrund der aktuellen Strategie des Ausbaus der Infrastruktur für elektrobetriebene Fahrzeug und der fehlenden Alternative im Wasserstoffbereich wurden für das Szenario der Bedarf für im Salzlandkreis angemeldete Pkw bzw. Lkw bis zum Jahr 2035 nicht berücksichtigt.

Der nächste Erweiterungsschritt wäre ca. ab dem Jahr 2035 zu erwarten. Der Wasserstoffbedarf für den Nutz- bzw. Schwerlastverkehr, inklusive der Logistikhilfsfahrzeuge würde auf rund 2.000 t jährlich steigen. An weiteren Windparks innerhalb der Region wie z.B. dem Windpark Aschersleben bzw. Egelin müssten Elektrolyseanlagen errichtet werden. Würde sich die Strategie im Bereich der elektrobetriebenen Pkw ändern bzw. die Produktion der wasserstoffbetriebenen Pkw ausgebaut, könnte die Wasserstoffkapazität mit dem Ausbau des Solarparks um weitere rund 2.500 t jährlich erweitert werden. Parallel zum Ausbau der Energieanlagen mit Elektrolyseanlagen müssen auch die Speicher- und Transportkapazitäten an die jeweilige Situation vor Ort angepasst werden. Die stationären Speicher an den Produktionsstätten und den Tankstellen müssen erweitert und die Anzahl der mobilen Speichereinheiten bzw. Transport Lkw deutlich erhöht werden. Eventuell sollte eine weitere Wasserstofftankstelle im Bereich der Energieanlagen in Egelin errichtet werden (siehe Abbildung 11).

Anforderungen an einen zukünftigen Ausbau der Wasserstoffinfrastruktur am Beispiel Staßfurt sowie Salzlandkreis



Abb. 11: Graphische Darstellung der Erweiterungsphase im Ausbau einer Wasserstoffinfrastruktur im Salzlandkreis im Jahr 2040 [87] mit eigenen Ergänzungen

Je nach Entwicklung der allgemeinen Situation hinsichtlich der Wasserstofftechnologie wird um das Jahr 2040 die dritte und letzte Phase der regionalen Wasserstoffinfrastruktur beginnen: die Ausbauphase. In dem Zeitraum von 2040 bis 2045 wird sich der Wasserstoffbedarf in der Region für Nutz- und Schwerlastfahrzeug bzw. ÖPNV-Fahrzeuge um ca. weitere rund 50% steigern, das bedeutet das weitere 900 t Wasserstoff zusätzlich benötigt werden. Wird bis zum Jahr 2045 zusätzlich ein Anteil von ca. 30% der im Kreis zugelassenen Pkw bzw. Lkw auch auf Wasserstoffantrieb umgestellt worden sein, so reicht die jährliche Gesamtwasserstoffkapazität von rund 8.400 t jährlich nicht mehr zur Deckung des Bedarfs aus. Bestehende Anlagen müssten erweitert oder neue Möglichkeiten für Energieanlagen erschlossen werden. Bei einer hundertprozentigen Umstellung aller Fahrzeuge innerhalb der Region und deren Einbindung in ein Wasserstoffinfrastruktursystem bis 2050, was eine weitere Steigerung des Wasserstoffbedarfs um das Doppelte im Vergleich zum Jahr 2045 bedeuten würde, müsste der Wasserstofftrag der bestehenden und der zu erwartenden Energieanlagen um des 1,5-fache auf rund 21.000 t/Jahr erweitert werden.

Des Weiteren wird für diesen hohen Wasserstoffbedarf eine Speicherung in mobilen Speichern bzw. kleinen stationären Speichern voraussichtlich unwirtschaftlich sein. Das bedeutet, dass eventuell alte Salzkavernen in der Region zu Unterspeichern reaktiviert werden müssen. Das Gleiche gilt für den Transport des Wasserstoffs per Lkw. Eine wirtschaftliche Lösung hierfür könnte die Nutzung des bestehenden Erdgasnetzes sein. Bei dieser Art der Speicherung und des Transportes muss die technologische Weiterentwicklung auch zukünftig beobachtet werden, um eine exakte Aussage treffen zu können.

Zusammenfassend gilt, dass die aktuell betriebenen Energieanlagen den Wasserstoffbedarf, je nach Entwicklung, voraussichtlich bis in das Jahr 2040 abdecken können. Ab dem Jahr 2040 müssen Anlagen erweitert oder neue Anlagen erschlossen werden. Bei den Speicherkapazitäten und Tankstellen muss ein kontinuierlicher Ausbau erfolgen. Ein Technologiewechsel hinsichtlich der Speicher sollte spätestens zwischen den Jahren 2035 und 2040 beginnen, da die aktuelle Technik nicht mehr ausreichen wird. Parallel wird sich die Anzahl der wasserstoffbetriebenen Fahrzeuge, abhängig von den Produktionskapazitäten der Hersteller und der Technologie, in diesem Zeitraum signifikant erhöhen.

4.3.4 Betrachtung der Auswirkung von Preisentwicklungen bei Dieselkraftstoff und Wasserstoff

Ziel der Betrachtung der Auswirkungen verschiedener Preisentwicklungen bei Diesel und Wasserstoff auf die jährlichen Treibstoffkosten ist es darzustellen, wann eine Umstellung der Betriebe auf die Wasserstofftechnologie aus wirtschaftlicher Sicht erfolgreich sein könnte. Zur Betrachtung werden nur die Jahresverbräuche der kommunalen Betriebe des Salzlandkreises und der Kreisverkehrsbetriebe zu Grunde gelegt. Diese wurden in den Kapiteln 4.2.1. und 4.2.2. ermittelt. Investitionskosten in Infrastruktur, Förderungen und Abgaben wurden nicht mit einberechnet. Aus den ermittelten Verbräuchen ergibt sich für alle drei betrachteten Betriebe ein jährlicher Gesamtverbrauch von rund 1,68 Mio. Liter Diesel bzw. ein Wasserstoffäquivalent von ca. 420.000 kg (siehe Tabelle 16).

	Treibstoffart	Diesel [l]	Wasserstoffäquivalent [kg]
Kreisbetriebe			
KVG Salzlandkreis		1.143.681	284.286
Kreiswirtschaft Salzlandkreis		359.600	73.600
Kommunen Salzlandkreis		179.420	61.704
Jährlicher Gesamtverbrauch		1.682.701	419.590

Tab. 16: Übersicht über das Fahrzeugaufkommen verschiedener Bereiche und Wasserstoffäquivalente – Salzlandkreis

Bei der Preisentwicklung der beiden Treibstoffe werden insgesamt vier Szenarien angenommen, die auch für die Herleitung der aktuellen geo- und energiepolitisch beeinflussten Lage eingesetzt werden können:

- *Szenario 1 (Diesel normal)*: Für den Dieselpreis wird eine konservative mittlere lineare Steigerung von 1,35 €/l im Jahr 2020 auf 1,60 €/l im Jahr 2050 angenommen. Bei diesem Szenario wird davon ausgegangen, dass eine CO₂-Bepreisung nicht mit in den Preis inkludiert wird und sich dieser nur aus der allgemeinen Preissteigerung ergibt.

- *Szenario 2 (Diesel CO₂-P)*: Neben der normalen, linearen Preissteigerung wird zusätzlich noch eine CO₂-Bepreisung in die Preisbetrachtung mitbetrachtet. Diese beträgt für das Jahr 2025 55 €/t CO_{2äq} und für das Jahr 2050 260€/t CO_{2äq} [140]. Für das Jahr 2020 wird der Dieselpreis von 1,35 €/l ohne CO₂-Bepreisung zugrunde gelegt.
- *Szenario 3 (Wasserstoff Basis)*: Berechnungsgrundlage für das Jahr 2020 ist der aktuelle Wasserstoffpreis von 12 €/kg und der geschätzte, fallende Preis für die zentrale Wasserstoffherstellung durch Elektrolyse im Jahr 2050 von 5 €/kg [51].
- *Szenario 4 (Wasserstoff Advanced)*: Berechnungsgrundlage für das Jahr 2020 ist der aktuelle Wasserstoffpreis von 12 €/kg und der geschätzte, fallende Preis für die zentrale Wasserstoffherstellung durch Erdgasreformierung im Jahr 2050 von 2 €/kg [51]. Ziel ist es, zukünftig grünen Wasserstoff zu Preisen der Herstellung aus Erdgasreformierung anbieten zu können. Dieses war das Auswahlkriterium für den Preis von 2050.

.....
 Anforderungen an einen
 zukünftigen Ausbau der
 Wasserstoffinfrastruktur am
 Beispiel Staßfurt sowie
 Salzlandkreis

In der folgenden Tabelle werden die ermittelten jährlichen Gesamtkosten für die drei betrachteten Betriebe für die Jahre 2020 und 2050, auf Grundlage des jährlichen Gesamtverbrauches und der verschiedenen Szenarien der Preisentwicklung, dargestellt.

Szenario		2020	2050	2020	2050
		[€/l]	[€/l]	[€]	[€]
normal	Diesel ¹⁾	1,35	1,6	2.271.646	2.692.322
CO ₂ -P	Diesel ²⁾	1,35	2,80	2.271.646	4.711.562
		[€/kg]	[€/kg]	[€]	[€]
Basis	H _{2äq}	12	5	5.035.080	2.097.950
Advanced	H _{2äq}	12	2	5.035.080	839.180

Tab. 17:
Darstellung der einzelnen
Szenarien i.V.m. Treibstoff-
preisentwicklung in den
Jahren 2020 und 2050

¹⁾ ohne CO₂-Bepreisung

²⁾ mit CO₂-Bepreisung (2020= 30€/t CO_{2äq}) und (2050 = 260€/t CO_{2äq})

Aus den berechneten jährlichen Gesamtkosten der vier verschiedenen Szenarien ergibt sich anschließend der Zeitpunkt, ab wann der Einsatz von Wasserstoff als Alternative zu Diesel für die Betriebe wirtschaftlich wird. Bei dieser Berechnung wurde vorausgesetzt, dass alle Fahrzeuge der einzelnen Betriebe zum Berechnungszeitraum komplett auf Wasserstoffantrieb umgestellt sind. Es ergeben sich folgende Ergebnisse i.V.m. Abbildung 12:

- *Szenario 1* Bei einer normalen Preissteigerung beim Diesel (Szenario normal) und einem zu erwartenden Wasserstoffpreis von 5 €/kg im Jahr 2050 (Szenario Basis) liegt der Break-Even-Punkt im Jahr 2045.
- *Szenario 2* Bei einer Preissteigerung beim Diesel mit einberechneter CO₂-Bepreisung (Szenario CO₂-P) und einem zu erwartenden Wasserstoffpreis von 5 €/kg im Jahr 2050 (Szenario Basis) liegt der Break-Even-Punkt im Jahr 2037.

Anforderungen an einen zukünftigen Ausbau der Wasserstoffinfrastruktur am Beispiel Staßfurt sowie Salzlandkreis

- *Szenario 3* Bei einer normalen Preissteigerung beim Diesel (Szenario normal) und einem zu erwartenden Wasserstoffpreis von 2 €/kg im Jahr 2050 (Szenario Advanced) liegt der Break-Even-Punkt im Jahr 2039.
- *Szenario 4* Bei einer Preissteigerung beim Diesel mit einberechneter CO₂-Bepreisung (Szenario CO₂-P) und einem zu erwartenden Wasserstoffpreis von 2 €/kg im Jahr 2050 (Szenario Advanced) liegt der Break-Even-Punkt im Jahr 2033

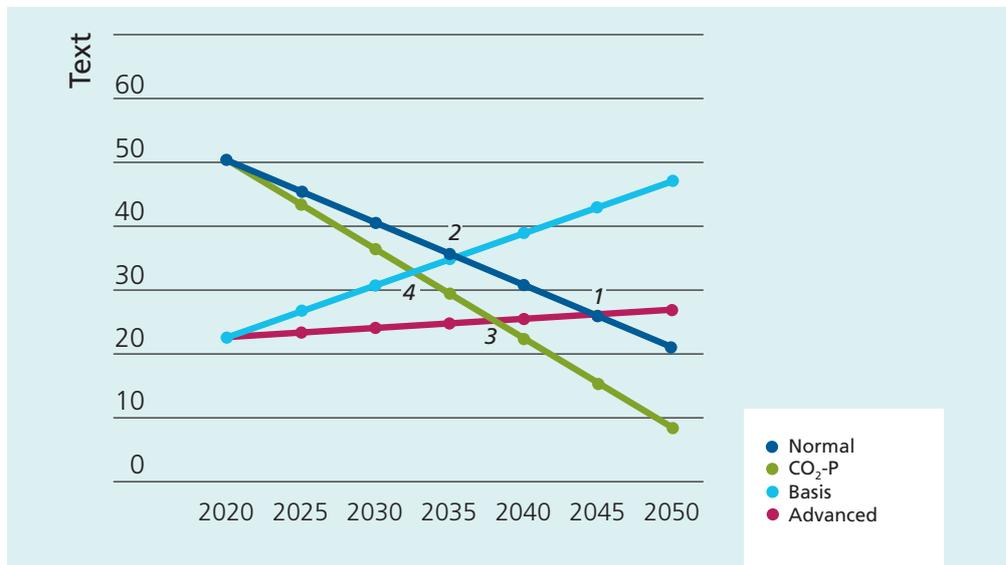


Abb. 12: Darstellung break-even-Point der verschiedenen Preiszenarien

Die Berechnung verdeutlicht die Auswirkungen einer CO₂-Bepreisung auf Dieselkraftstoff und einem zukünftigen Preis für grünen Wasserstoff vergleichbar dem aus Erdgasreformierung auf die Wirtschaftlichkeit für die drei Betriebe. Somit erscheint eine Umstellung der Fahrzeugflotten auf Wasserstofftechnologie sowohl für die kommunalen Betriebe als auch für die Kreisverkehrsgesellschaft möglich und vor allem, je nach Preisentwicklung, früher oder später wirtschaftlich. Diese Abschätzung bezieht sich allein auf die Kosteneinsparungen im Treibstoffbereich, weder Investitionskosten noch laufende Kosten im betrachteten Zeitraum wurden berücksichtigt.

4.3.5 Darstellung der Einsparpotentiale im Bereich Kosten und CO₂ bei Antriebsartumstellung

Neben der Betrachtung der Auswirkung verschiedener Preisentwicklungen bei Dieselkraftstoff und Wasserstoff für die kommunalen Betriebe und die Kreisverkehrsgesellschaft wurde zusätzlich auch das Einsparpotential hinsichtlich der CO₂-Emissionen als auch die dadurch entstehende Kosteneinsparung aufgrund einer CO₂-Bepreisung berechnet.

Bei der Analyse der Auswirkungen von Substitutionsmaßnahmen (fossil - regenerativ) kann zum einen das CO₂-Äquivalent und zum anderen das Global-Warming-Potential (GWP)² berechnet werden. Im dargestellten Anwendungsbereich Mobilität wird die Berechnung von CO₂-Äquivalente gemäß EN 16258 durchgeführt. Es stehen zwei Berechnungswerte zur Verfügung: TTW (Tank-To-Wheel) und WTW (Well-To-Wheel). TTW bezeichnet die direkte energetische Nutzung für das jeweilige Verkehrsmittel, während WTW die Herstellung, den Transport und die Verteilung von Kraftstoff einschließlich der Endverbrennung von Energie umfasst.

² Vgl. [141] – GWP-Ermittlung und Vergleich von wasserstoffgetriebenen Pkw mit Diesel Pkw.

Im vorliegenden Berechnungsszenario wurde die Methode TTW verwendet. Grundlage zur Ermittlung des Einsparpotentials bei den jährlichen CO₂-Emissionen war der jeweilige Dieselanteil am Gesamttreibstoffverbrauch für den Zeitraum 2020 bis 2050. Bei der Berechnung wurde davon ausgegangen, dass im Jahr 2020 der Dieselanteil 100% des Gesamtanteils beträgt und sich dieser bis in das Jahr 2050 linear auf 0% reduziert. Zur Ermittlung vom CO₂-Äquivalent wurde der Dieselanteil mit dem Faktor 2,67 kgCO_{2äq}/l multipliziert [142].

Anforderungen an einen zukünftigen Ausbau der Wasserstoffinfrastruktur am Beispiel Staßfurt sowie Salzlandkreis

Die Berechnungen ergeben ein enormes Einsparpotential an CO₂-Emissionen für die betrachteten Betriebe (siehe Abbildung 13). Aufgrund der hohen Fahrleistungen und der umfangreichen Fahrzeugflotte ist die Auswirkung der Umstellung von Diesel auf Wasserstoff für die Kreisverkehrsgesellschaft am größten. Bei einer Umstellung auf ca. 15% Wasserstoff vom Gesamttreibstoffverbrauch im Jahr 2025 liegt die Einsparung bei ca. 450 t CO₂-Äquivalent. Diese Einsparung steigert sich im Jahr 2035 (65% Wasserstoffanteil) auf ca. 2.000 t CO₂-Äquivalent, und bei kompletter Umstellung wird ein Einsparpotential von über 3.000 t CO₂-Äquivalent jährlich erreicht. Deutlich geringer sieht es bei den Kreiswirtschaftsbetrieben mit einem Einsparpotential von rund 1.000 t CO₂-Äquivalent bzw. bei den Stadtwerken im Salzlandkreis mit ca. 500 t CO₂-Äquivalent jährlich im Jahr 2050 aus.



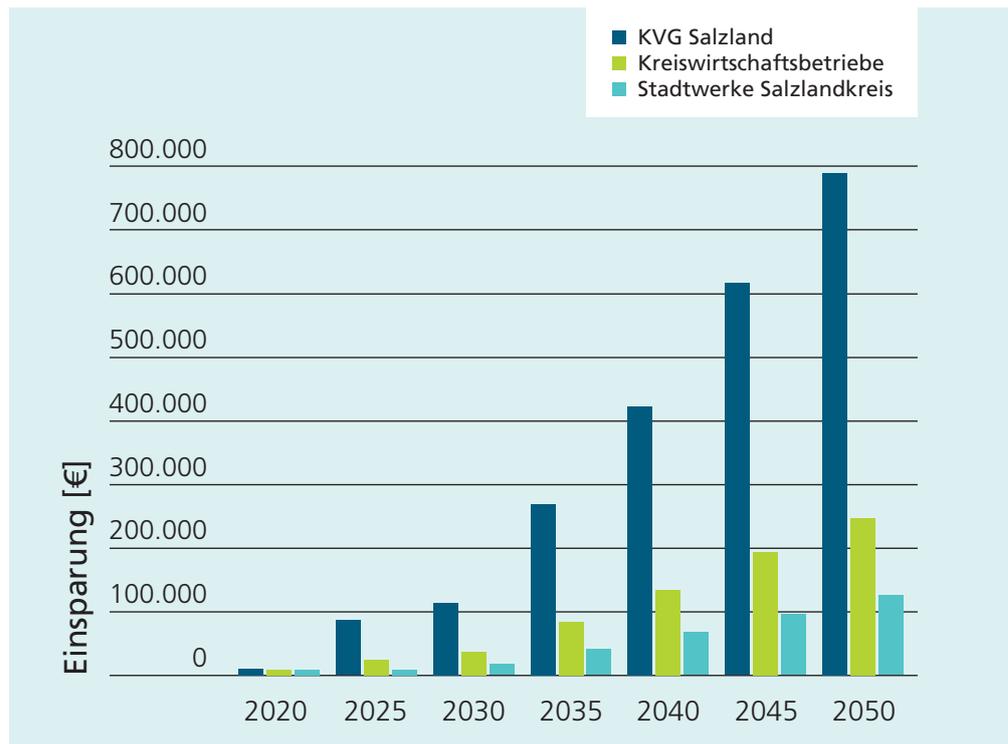
Abb. 13:
Darstellung der jährlichen CO₂-Emissionsreduzierung in den Jahren 2020 bis 2050 für die betrachteten Betriebe

Aus den errechneten Einsparpotentialen an CO₂-Emissionen ergeben sich anschließend die Kosteneinsparungen für die Betriebe bei der zukünftigen Umsetzung einer CO₂-Bepreisung. Zur Berechnung der Kosteneinsparungen wurde die gleiche Staffelung wie bei der Berechnung der verschiedenen Preisszenarien (Kapitel 4.3.4.) als Basis eingesetzt. Diese beträgt für das Jahr 2025 55€/t CO_{2äq} und steigt bis zum Jahr 2050 auf 260€/t CO_{2äq} [140].

Wie vorab bei den CO₂-Emissionseinsparungen zeigt sich bei der Umstellung auf Wasserstoff zusätzlich ein großes Einsparpotential hinsichtlich der jährlichen Kosten für die Betriebe (siehe Abbildung 14). Somit liegen die Kosteneinsparungen für die Kreisverkehrsgesellschaft im Jahr 2025 bei ca. 22.000 €, im Jahr 2035 bei ca. 270.000 € und im Jahr 2050, bei kompletter Umstellung auf Wasserstofftechnologie, über 800.000 €. Auch hier ist das Einsparpotential mit ca. 250.000 € bei den Kreiswirtschaftsbetrieben des Salzlandkreises bzw. rund 125.000 € bei den Stadtwerken im Jahr 2050 deutlich geringer, stellt aber dennoch einen wirtschaftlichen Faktor dar.

Anforderungen an einen zukünftigen Ausbau der Wasserstoffinfrastruktur am Beispiel Staßfurt sowie Salzlandkreis

Abb. 14:
Darstellung der jährlichen Kosteneinsparungen in den Jahren 2020 bis 2050 für die betrachteten Betriebe



Beide Berechnungen hinsichtlich einer CO₂-Emissionseinsparung bzw. einer Kosteneinsparung zeigen, dass eine Umstellung von Diesel auf Wasserstofftechnologie sowohl ökonomisch als auch ökologisch sehr interessant für die verschiedenen Betriebe der Region sein kann.

4.3.6 Potentialbetrachtung der regionalen Unternehmen hinsichtlich einer Wasserstoffmobilitätstransformation

Das hohe Potential hinsichtlich des Einsatzes der Wasserstofftechnologie innerhalb der Region Salzlandkreis wird durch die Unterstützung verschiedenster Akteure verdeutlicht. Neben den zu erwartenden langfristigen Kosteneinsparungen im Bereich der Treibstoffe ist der Beitrag zur Dekarbonisierung des Verkehrssektors in der Region ein wesentlicher Treiber für die unterschiedlichen Akteure. Vor allem vor dem Hintergrund einer CO₂-Bepreisung, wie im vorherigen Kapitel beschrieben, ist von einer hohen Nachfrage vor allem ab dem Jahr 2030/2035 auszugehen. Zu diesem Zeitpunkt sollte die erste Phase des Infrastrukturaufbaus abgeschlossen sein und die Technologie den Akteuren zur Verfügung stehen.

Neben der CO₂-Bepreisung und der Kosteneinsparung sprechen noch zwei weitere Punkte für eine hohe Nachfrage hinsichtlich einer Transformation zur Wasserstofftechnologie. Zum einem ist es die schnelle Verfügbarkeit der Fahrzeuge nach dem Tankvorgang. Dieser ist aktuell vergleichbar zu einem Tankvorgang wie bei dieselbetriebenen Fahrzeugen und somit deutlich schneller als der Ladevorgang bei elektrisch angetriebenen Fahrzeugen - Stillstandzeiten und somit unproduktive Zeiten werden vermieden, die vor allem im Bereich der Logistikhilfsfahrzeuge eine wesentliche Rolle spielen. Zum anderen ist das zulässige Gesamtgewicht bzw. die Zuladung ein weiteres, ausschlaggebendes Argument. Beides ist im Vergleich zu Dieselfahrzeugen etwa vergleichbar. Im Vergleich zu Fahrzeugen mit Elektroantrieb ist die Zuladung höher, da das Systemgewicht der Brennstoffzelle und des Wasserstofftanks deutlich niedriger als ein Batteriepaket für vergleichbare Reichweite ist. Somit kann sowohl im Schwerlastverkehr als auch bei Müllpressfahrzeugen mehr Ladung transportiert werden.

Negativ auf die Nachfrage könnten sich die hohen Investitionskosten für Infrastruktur bzw. Fahrzeuge bemerkbar machen. Hier sollten Anreize gesetzt werden, wie sie auch für andere Projekte schon umgesetzt wurden. Zur Förderung des Infrastrukturausbaus wäre dies z.B. durch die Weiterführung des Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie Phase II (NIP II) über das Jahr 2026 hinaus. Mit diesem Programm könnten bis zu 50% eines Projektvolumens durch Fördermittel abgedeckt werden und der Ausbau der Windanlagen bzw. die Installation von Elektrolyseuren und Wasserstofftankstellen für die Akteure interessanter und somit wirtschaftlicher gemacht werden.

Anforderungen an einen zukünftigen Ausbau der Wasserstoffinfrastruktur am Beispiel Staßfurt sowie Salzlandkreis

Des Weiteren sollten die Unternehmen auch bei der Anschaffung von Wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen weiterhin gefördert werden, da hohe Investitionskosten vermutlich ein limitierender Faktor sind. Zum einem müsste die Obergrenze des Umweltbonus für alternativangetriebene Fahrzeuge von ca. 65.000€ angehoben und auf wasserstoffbetriebene Fahrzeuge ausgeweitet werden [143]. Zum anderen wäre der Einsatz eines pay-per-use Modells[62] ein sinnvolles Instrument. Für die nutzenden Unternehmen entstehen keine hohen Erstinvestitionskosten, sondern vergleichbar dem Leasing-Modell nur entsprechende monatliche (verbrauchsabhängige) Kosten. Diese Kosten beinhalten z.B. die Nutzung des Fahrzeuges, Wartungskosten sowie Betriebsmittel und werden anschließend als Kosten pro Kilometer ausgewiesen und bspw. durch den Fahrzeughersteller oder einen Dritten in Rechnung gestellt. Somit könnte das hohe Interesse der verschiedenen Unternehmen an der Transformation und dem damit verbundenen schnellen Ausbau weiter gefördert werden.

5 Interpretation und Auswertung der Studienergebnisse

Die Ausgangsfragestellung dieser Studie war, wie eine zukünftige Wasserstoffinfrastruktur im ländlichen, strukturschwachen Gebiet ausgestaltet werden kann. Zur Beantwortung dieser Frage wurde exemplarisch der Raum Staßfurt, respektive der Salzlandkreis als Modellregion ausgewählt.

Das Ergebnis der Analyse weist auf, dass der Raum Staßfurt bzw. die umliegende Region hinsichtlich der Energieversorgung aus Erneuerbarer Energie zur Herstellung und Nutzung von grünem Wasserstoff sehr gut aufgestellt ist. Die Versorgung mit nachhaltigem Strom zur Wasserstoffherstellung ist bis mindestens in das Jahr 2040 durch die bestehenden Wind- und Solaranlagen gesichert, wenn davon ausgegangen wird, dass max. 30% des jährlichen Energieertrages dafür genutzt wird. Je nach Entwicklung des Wasserstoffbedarfs müssen die Energieanlagen voraussichtlich ab dem Jahr 2040 ausgebaut bzw. es müssen neue Energieparks geplant und erschlossen werden. Die dazu erstellte Roadmap veranschaulicht die verschiedenen Phasen.

Im ersten Abschnitt des Infrastrukturausbaus kann der Wasserstoffbedarf allein durch einen mit Elektrolyseuren erweiterten Windpark »Staßfurt-Förderstedt« bis in das Jahr 2030 abgedeckt werden. Anschließend bedarf es der Erweiterung auf bestehende Energieanlagen innerhalb der Region. Parallel zur Erweiterung muss auch die Errichtung von Elektrolyseanlagen und Speicherkapazitäten voranschreiten. Hierbei ist ein weiterer Meilenstein für den Ausbau des Infrastruktursystems die Erweiterung des Autohofes Staßfurt/Brumby mit einer Wasserstofftankstelle für den Schwerlastverkehr. Die aktuell bestehende Lücke der Wasserstoffversorgung für Lkw auf der Nord-Süd-Strecke kann somit geschlossen werden. Aufgrund der hohen Anzahl an Lkw auf den Bundesautobahnen BAB 14/BAB 36 und der zu erwartenden Zunahme des Fahrzeugaufkommens in der Region wäre dieses ein wichtiger Ausbauschnitt.

Negative Auswirkungen auf den Ausbau einer Wasserstoffinfrastruktur könnten verschiedene Gesetzgebungen sowohl der EU als auch des Bundes haben. Der §35 des Baugesetzbuches (BauGB) regelt den Bau von Anlagen im Außenbereich [82, 84]. Die

Genehmigung obliegt abschließend der Baubehörde und ist Ermessenssache der jeweiligen Behörde und bürgt die Herausforderung einer Verzögerung des Vorhabens oder sogar deren Nichtgenehmigung, durch nicht vorliegende Standardisierung. Des Weiteren könnten Bürgerinitiativen gegen den Ausbau bzw. das Repowering (das Ersetzen alter Kraftwerksteile zur Stromerzeugung durch neue Anlagenteile, beispielsweise mit höherem Wirkungsgrad, wobei Teile der schon vorhandenen Anlagen und der Infrastruktur weiterverwendet werden) vor allem die Erweiterungsphase des Infrastrukturprojektes deutlich verzögern bzw. sogar verhindern. Vertrauensbildende Maßnahmen sind hier anzustreben.

Neben dem bereits erwähnten Wasserstoffbedarf im Schwerlastverkehr und der damit verbundenen möglichen Errichtung einer Wasserstofftankstelle am Autohof Staßfurt/Brumby wurden durch die Analysen weitere wichtige Abnehmer und somit ein großes Wasserstoffpotential ermittelt. Hierbei spielen hauptsächlich die kommunalen Betriebe und die Kreisverkehrsgesellschaft mit ca. 230 Fahrzeugen >2,8 t und einem geschätzten jährlichen Wasserstoffbedarf von rund 400 t, vor allem in der Aufbau- und Erweiterungsphase, eine wichtige Rolle. Aktuell schwer abzuschätzen ist der Einfluss von privaten Pkw bzw. zugelassenen Lkw auf den zukünftigen Wasserstoffbedarf. Aufgrund der hohen Investitionskosten und der aktuell geringen Anzahl an Förderprojekten in diesem Bereich ist die Hürde zur Anschaffung eines wasserstoffangetriebenen Fahrzeuges relativ hoch. Es müssen weitere Anreize geschaffen und Förderprogramme der Europäischen Union als auch Förderprogramme des Bundes verlängert bzw. ausgebaut werden

Ein weiterer Punkt, der den Ausbau im Verkehrssektor negativ beeinflussen könnte, ist das bestehende Angebot an Brennstoffzellen-Fahrzeugen. Mit realistisch betrachtet zwei Anbietern im Pkw- und aktuell nur einem Anbieter für serienreife Fahrzeuge im Lkw-Bereich ist das Angebot sehr gering. Hier müssen weitere Fahrzeughersteller ihre Entwicklungsarbeit vorantreiben, um deutlich mehr Fahrzeuge auf die Straße zu bringen. Wie auch bei der Fahrzeugbeschaffung müssen auch im Bereich der Fahrzeugentwicklung Förderprogramme hauptsächlich des Bundes und der Länder ausgebaut werden, um einen weiteren Anreiz zu schaffen (bspw. Marktanreizprogramme).

Im Bereich der Wasserstoffspeicherung müssen spätestens zur Mitte der Ausbauphase Möglichkeiten ermittelt werden, wie der benötigte Wasserstoff großvolumig gespeichert werden kann. Die zu diesem Zeitpunkt bestehenden Speicher werden für den hohen Bedarf dann nicht mehr ausreichen. Bestehende Salzstollen in der Region sind hinsichtlich einer möglichen Speicherung zu betrachten und gegebenenfalls zu Kavernenspeichern auszubauen.

Neben den technischen Auswirkungen haben die Analysen auch positive Auswirkungen sowohl hinsichtlich ökonomischer als auch ökologischer Gesichtspunkte ergeben. Eine Wirtschaftlichkeitsberechnung hat gezeigt, dass sich eine Umstellung von Diesel- auf Wasserstoffantriebe der Fahrzeuge der kommunalen Betriebe und der Kreisverkehrsgesellschaft signifikant auf die jährlichen Treibstoffkosten auswirken wird. Somit kann bei einer CO₂-Bepreisung auf Dieselmotoren die Senkung des grünen Wasserstoffpreises pro Kilogramm auf das Niveau einer Herstellung aus Erdgasreformierung, der break-even für Treibstoffkosten schon nach ca. 13 Jahren erreicht sein. Das Einsparpotential für die betrachteten Betriebe würde jährlich zwischen 35.000 € und 1,5 Mio. €, je nach Faktor der CO₂-Bepreisung, liegen. Ein weiterer zukünftiger Aspekt wird sich durch die Treibhausgasquote ergeben. Durch die Verpflichtung der teilweisen Kompensation von THG-Emissionen kann die geforderte Quote entweder durch Selbsterfüllung des Quotenerbringers durch z.B. Beimischung von CO₂-armen Kraftstoffen oder durch Dritte z.B. Erwerb von CO₂-Quotenmengen erfüllt werden [144]. Folglich können Betreiber von Wasserstofftankstellen die erzeugten Quotenmengen an Quotenverpflichtende verkaufen und somit direkt am Quotenhandel teilnehmen [144].

Zusätzlich zu den Einsparungen der Treibstoffkosten wirkt sich die Reduzierung der CO₂-Emissionen positiv auf den CO₂-Fußabdruck der Unternehmen in der Region aus. Diese Einsparung würde je nach Anteil des Wasserstoffes am Gesamttreibstoff bei einer Umstellung für diese Unternehmen bei ca. 700 t/a bis zu 4.500 t/a liegen.

Interpretation und Auswertung der Studienergebnisse

Zusammenfassend gilt, dass der Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur innerhalb des Salzlandkreises eine große Chance ist, sich als ländliche, strukturschwache Region technologisch weiterzuentwickeln und als eine der führenden Regionen hinsichtlich Wasserstoffwirtschaft/-infrastruktur innerhalb Deutschlands aufzutreten. Des Weiteren kann von der Region aus, ein nicht unerheblicher Beitrag zur Reduzierung von CO₂-Emissionen und dem damit verbundenen Erreichen der Klimaziele 2030/2050 geleistet werden.

6 Roadmap

	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
	Aufbauphase →		Ausbauphase →		Erweiterungsphase →		
H ₂ -Produktion via Windanlagen [t/a]	← 500 Förderstedt →		← 5.000 Salzlandkreis →				
H ₂ -Produktion via PV-Anlagen [t/a]			← 3.000 Salzlandkreis →		← 8.500 + mind. 13.000 →		
H ₂ -Bedarf [t/a]	150		700	2000	10.000		21.000
Anzahl H ₂ -Busse	2		4	<20	80		112
Anzahl H ₂ -Kommunalfahrzeuge [>2,8 t]	2		22				120
Ø-tägliches Lkw-Aufkommen Autohof Brumby	11		33		95		150
Break-even-Point Treibstoffkosten ÖPNV und kommunale Fahrzeuge				④	②	③	①

Tab. 18:
Roadmap H₂-Infrastruktur im Salzlandkreis

7

Anhang

Anhang

7.1

Übersicht H₂-Fahrzeuge – Pkw und Lkw, Stand: 2022

Fahrzeug	Art des Fahrzeuges	Gewicht des Fahrzeuges in kg	Anzahl der Brennstoffzellen	Gesamteistung der Brennstoffzelle in kw	Motorleistung in kW
PKW					
Toyota Mira II	Limousine	1.900	1	105	134
Hyundai Nexo	SUV	1.900	1	95	120
Hyundai ix35	SUV	1.900	1	100	100
Mercedes Benz GLC F-CeLL	SUV	2.130	1	k.A.	155
Hondo Clarity Fuel Cell	Limousine	1.900	1	103	130
H2X Warrego	PickUp	k.A.	1	60	260
Citroen ë-Jumpy Hydrogen	Van	k.A.	1	45	100
Peugeot e-Expert Hydrogen	Van	k.A.	1	45	100
LKW					
Hyundai Xcient Fuel Cell	Mit Kofferaufbau	19.000	2	190	350
Nicola	Zugmaschine	9.000	k.A.	k.A.	735
Daimler GenH ₂	Zugmaschine	15.000	2	300	460
Scania	Mit Kofferaufbau	27.000	1	90	290
Kenworth	Sattelzug	36.000	1	100	360
Navistar International	Sattelzug	36.000	1	80	320
Toyota Hino XL Fuel Cell	Sattelzug	25.000	2	228	500
VDL	Sattelzug	44.000	k.A.	88	210
Hyzon Motors Class 8	Sattelzug	k.A.	k.A.	110	320 - 450
Hyzon Motors HyMaxSeries	Sattelzug	k.A.	k.A.	80 - 240	160 - 450
Esoro	Mit Kofferaufbau	35.000	k.A.	100	255
Dongfeng	Mit Kofferaufbau	7.500	k.A.	30	k.A.
Clean Logistics	Lkw Umrüster	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Faun	Nutzfahrzeuge	8500 -10200	1 - 3	30 - 90	250
FedEx Van	Sprinter Klasse	8.800	k.A.	20	200
DHL Streetscooter (H ₂ Panel Van)	Sprinter Klasse	4.250	k.A.	26	122

Anzahl der Batterien	Batteriekapazität in kWh gesamt	Anzahl der H ₂ Tanks	Tankdruck in bar	Tankvolumen in kg gesamt	Art des H ₂	Reichweite in km	Verfügbarkeit
1	1,33	3	700	5,6	gas	ca. 650	2021
1	1,56	3	700	6,33	gas	ca. 750	2018
1	0,95	k.A.	700	5,64	gas	ca. 600	nur noch gebraucht
1	1,38	k.A.	700	4,4	gas	ca. 480	aktuell eingestellt
1	k.A.	2	700	5	gas	ca. 650	nicht in DE erhältlich
k.A.	30	1	700	6	gas	ca.450	2023
k.A.	11	1	700	4,4	gas	ca. 400	2023
k.A.	10,5	1	700	4,4	gas	ca. 400	2021
3	73,2	7	350	34,5	gas	ca. 400	2020
k.A.	250	k.A.	700	80	k.A.	ca.1100	2028
1	70	2		80	flüssig	ca. 1200	2023
1	56	k.A.	350	33	gas	ca. 400	2020
1	100	k.A.	350	30	gas	ca. 240	2015
1	26	k.A.	350	20	gas	ca. 300	k.A.
1	12	k.A.	350	60	gas	ca. 600	k.A.
k.A.	72	k.A.	350	30	gas	ca. 350	2020
k.A.	110	k.A.	350	50 - 70	gas	560 - 800	k.A.
k.A.	70 - 140	k.A.	350/700	30 - 95	gas	400 -680	2023
2	120	7	350	31	gas	ca. 400	2016
k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	gas	ca. 200	2018
k.A.	300-400	k.A.	350	45	gas	ca. 500	k.A.
k.A.	85	max. 4	700	4,2 - 16,8	gas	ca. 650	2020
k.A.	80	k.A.	350	11,6	gas	ca. 250	2018
k.A.	40	k.A.	700	6	k.A.	ca. 500	2021

7.2

Übersicht H₂-Fahrzeuge – Bus und Zug, Straßenbahn,
Stand: 2022, eigene Darstellung

Fahrzeug	Art des Fahrzeuges	Gewicht des Fahrzeuges in kg	Anzahl der Brennstoffzellen	Gesamteistung der Brennstoffzelle in kw	Motorleistung in kW
Bus					
Solaris Urbino 12	Omnibus ÖPNV	13.000	1	70	220
Van Hool Exqi.City Fuel Cell	Omnibus ÖPNV	13.600	1	80	210
CaetanoBus H ₂ .CityGold	Omnibus ÖPNV	k.A.	k.A.	60	180
Toyota Sora	Omnibus ÖPNV	k.A.	k.A.	228	226
Mercedes Benz Citaro FuelCell	Omnibus ÖPNV	k.A.	2	120	160
Safra Businova H ₂	Omnibus ÖPNV	k.A.	1	30	250
New Flyer Xcelsior Charge H ₂	Omnibus ÖPNV	32.000/49.000	k.A.	80	160 /320
Hyzon Motors High Floor Coach	Reisebus	k.A.	k.A.	80	195
Optare Metrodecker H ₂	Doppeldecker	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Renault Master	Minibus	k.A.	1	10	56
Hyundai H350	Minibus	k.A.	1	k.A.	100
Zug					
Siemens Mireo	Nahverkehrszug	k.A.	2	200	1700
Alstom Coradia ilint	Nahverkehrszug	k.A.	2	200	220 (2x)
HydroFlex	Nahverkehrszug	k.A.	1	100	k.A.
Stadler Rail Flirt H	Nahverkehrszug	k.A.	k.A.	k.A.	1400
Straßenbahn					
Heiterblick GmbH Leipzig	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Qingdao Sifang Company	k.A.	k.A.	1	200	k.A.
Tangshan Railway Vehicle	k.A.	k.A.	1	60	k.A.
Tig/m ViaTran	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.

Anzahl der Batterien	Batteriekapazität in kWh gesamt	Anzahl der H ₂ Tanks	Tankdruck in bar	Tankvolumen in kg gesamt	Art des H ₂	Reichweite in km	Verfügbarkeit
k.A.	30	5	250	36,8	gas	ca. 400	2019
k.A.	36	10	350	38,2	gas	ca. 350	2019
k.A.	44	5	350	37,5	gas	ca. 400	2020
k.A.	235	10	700	24	k.A.	k.A.	k.A.
k.A.	k.A.	k.A.	350	35	gas	ca. 250	2022
k.A.	130	k.A.	350	30	gas	ca. 350	k.A.
k.A.	85	k.A.	350	37,5/60	gas	ca. 560	2019
k.A.	141	k.A.	350	35	gas	ca. 402	2023
k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	ca. 320	k.A.
k.A.	33	k.A.	700	2,1	gas	ca. 350	2019
k.A.	24	1	700	7,05	gas	ca. 400	2016
2	k.A.	3	k.A.	k.A.	k.A.	ca. 900	2024
2	225	2	350	178	gas	ca. 800	2018
k.A.	k.A.	4	k.A.	20	gas	ca. 140	2019
k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	ca. 600	2024
k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	Prototyp in Planung 2024
k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	gas	ca. 100	2015
k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	12	gas	ca. 50	2015
k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	gas	ca. 2	2018

7.3

Übersicht H₂-Fahrzeuge – Gabelstapler und Entsorgungsfahrzeug, Stand: 2022, eigene Darstellung

Fahrzeug	Art des Fahrzeuges	Gewicht des Fahrzeuges in kg	Anzahl der Brennstoffzellen	Gesamteistung der Brennstoffzelle in kw	Motorleistung in kW
Gabelstapler					
Linde FC 30	Gabelstapler	k.A.	1	12	k.A.
Linde P 30 FC	Schlepper	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Toyota	Gabelstapler	k.A.	1	10	k.A.
Still R60 - 25	Gabelstapler	k.A.	1	12	k.A.
Dan Truck 3000	Gabelstapler	k.A.	1	10	k.A.
Entsorgungsfahrzeuge					
Hyzon Motors Refuse truck	Pressfahrzeug	k.A.	1	110	240
Faun Bluepower	Pressfahrzeug	k.A.			

Anzahl der Batterien	Batteriekapazität in kWh gesamt	Anzahl der H ₂ Tanks	Tankdruck in bar	Tankvolumen in kg gesamt	Art des H ₂	Reichweite in km	Verfügbarkeit
1	12	1	350	1,8	gas	k.A.	2015
k.A.	k.A.	1	350	23/32,5	gas	k.A.	2015
1	27	1	350	1,8	gas	k.A.	2015
1	10	1	350	2,5	gas	k.A.	2014
k.A.	k.A.	1	350	1,5	gas	k.A.	k.A.
k.A.	55	k.A.	350	25	gas	200	2023
k.A.		k.A.	700	16,4	gas	250	2021

8 Literatur

- [1] *Umweltbundesamt*: Treibhausgas-Emissionen in Deutschland – Emissionsentwicklung, 2022, <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland#emissionsentwicklung> [Zugriff am: 26.10.2022].
- [2] *Höltling, P.; Lange, M.*: Verkehr - Entwicklung von quartalsbezogenen Indikatoren zu den Emissionen des Verkehrs im Jahr 2022 – Zusammenstellung von Daten für das erste Quartal.
- [3] *Umweltbundesamt*: Treibhausemissionen, <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland/kohlendioxid-emissionen#herkunft-und-minderung-von-kohlendioxid-emissionen> [Zugriff am: 28.12.2020].
- [4] *Presse- und Informationsamt der Bundesregierung*: Klimaschutzprogramm 2030, 2021, <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/klimaschutzprogramm-2030-1673578>.
- [5] *Mineralölwirtschaftsverband e.V.*: Tankstellenbestand, <https://www.mwv.de/statistiken/tankstellenbestand/> [Zugriff am: 28.12.2020].
- [6] *TransportMedia Verlags- und Veranstaltungs-GmbH*: Firmenauto, <https://www.firmenauto.de/anzahl-der-ladestationen-in-deutschland-es-geht-aufwaerts-11154824.html> [Zugriff am: 28.12.2020].
- [7] *H2 Live*: H2 Tankstellennetz, <https://h2.live/> [Zugriff am: 28.12.2020].
- [8] *HiMedia Deutschland AG*: Kfz Magazin, <https://www.kfz-mag.de/marken-modelle> [Zugriff am: 28.12.2020].
- [9] *ADAC*: ADAC Elektromobilität, <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/elektromobilitaet/kaufen/elektroautos-uebersicht/> [Zugriff am: 28.12.2020].
- [10] *Jordan, T.*: Wasserstofftechnologie. In: 2007.
- [11] *Schmidt, T.*: Wasserstofftechnik – Grundlagen, Systeme, Anwendung, Wirtschaft. Hanser, München, 2020.
- [12] *Dennis Krieg*: Konzept und Kosten eines Pipelinesystems zur Versorgung des deutschen Straßenverkehrs mit Wasserstoff Ausgabe 2012.
- [13] *Dr.- Ing. Bernhard Neumann*: 5. Eigenschaften von Wasserstoff_TU Clausthal. In: 2007/2008.
- [14] *Baehr, H.D.; Kabelac, S.*: Thermodynamik – Grundlagen und technische Anwendungen ; mit zahlreichen Tabellen sowie 76 Beispielen, Springer-Lehrbuch, Springer, Berlin, 2006.
- [15] *Klell, M.; Eichseder, H.; Trattner, A.*: Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik – Erzeugung, Speicherung, Anwendung. Springer Fachmedien Wiesbaden, ATZ/MTZ-Fachbuch, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2018.
- [16] *Kopp, H.*: Kleine selbsttaetig geregelte Wasserstoffverfluessigungsanlage. In: 1964.

- [17] *Torsten Birth; Marcel Scheffler; Sebastian Jentsch*: Wasserstoff aus Holzgas: verfahrenstechnische Aspekte. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.35744.71681>.
- [18] *Matthias Block, Steffen Giesel, Andreas Herrmann und Norman Klüber*: Das Projekt H2home – Stationäre Strom- und Wärmeversorgung mit wasserstoffbetriebenen Brennstoffzellen-BHKW. In: *gwf Gas + Energie* (2019).
- [19] *Horng, P.; Kalis, M.*: Wasserstoff-Farbenlehre – Rechtswissenschaftliche und rechtspolitische Kurzstudie (2020).
- [20] VNG AG: Kleine Wasserstoff Farbenlehre, <https://vng.de/de/kleine-wasserstoff-farbenlehre> [Zugriff am: 24.12.2020].
- [21] *Agrafiotis, C.; Brendelberger, S.; Budama, V. et al.*: Wasserstoff als ein Fundament der Energiewende – Teil 1: Technologien und Perspektiven für eine nachhaltige und ökonomische Wasserstoffversorgung, Köln Ausgabe September 2020.
- [22] *Jentsch, S.; Scheffler, M.; Hayen, S. et al.*: Wasser als kritische Ressource für die Wasserstofferzeugung. In: *gwf Wasser|Abwasser* (2021), Heft 09, S. 73-88. <https://doi.org/10.17560/gwfw.v162i09.2574>.
- [23] *Geert Tjarks*: PEM-Elektrolyse-Systeme zur Anwendung in Power-to-Gas Anlagen. In: 2017.
- [24] *Prof. Dr. Markus Friedl, Boris Meier; Fabian Ruoss, L.S.*: Thermodynamik von Power-to-Gas. In: 2016.
- [25] *Sterner, M.; Stadler, I.*: Energiespeicher – Bedarf, Technologien, Integration. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2016.
- [26] *Gert Müller-Syring et. al.*: Entwicklung von modularen Konzepten zur Erzeugung, Speicherung und Einspeisung von Wasserstoff und Methan ins Erdgasnetz (2013).
- [27] *Ruiu, T., Mitzel, J., Reissner, R., Schulze, M., Biswas, I., Gülzow, E.*: INSIDE – In-situ Diagnostics in Water Electrolysers (2016).
- [28] *Christoph Noack, Dr. Fabian Burggraf, Seyed Schwan; Dr. Thomas Pregger, Karl Kiên Cao, Dr. Dominik Heide; Dr. Ulrich Bünger, Jan Michalski, Tetyana Raksha, Christopher Voglstätter, Dr. Tom Smolinka, Fritz Crotofino, Sabine Donadei, Peter-Laszlo Horvath*: Studie über die Planung einer Demonstrationsanlage zur Wasserstoff-Kraftstoffgewinnung durch Elektrolyse mit Zwischenspeicherung in Salzkavernen unter Druck (2014).
- [29] *Laguna-Bercero, M.A.*: Recent advances in high temperature electrolysis using solid oxide fuel cells: A review. In: *Journal of Power Sources* 203 (2012), S. 4-16. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011.12.019>.
- [30] *Brisse, A., Zeller, M. und Ludwig, B.*: Errichtung und erstmalige Erprobung einer neuartigen Solar-Wasserstoff Hochtemperaturelektrolyse (SOEC) Ausgabe 2018.
- [31] ASTM International: ASTM American Society for Testing and Materials – Specification for Reagent Water Ausgabe 2018.
- [32] *Lundberg, M.*: Model calculations on some feasible two-step water splitting processes. In: *International Journal of Hydrogen Energy* 18 (1993), Heft 5, S. 369-376. [https://doi.org/10.1016/0360-3199\(93\)90214-U](https://doi.org/10.1016/0360-3199(93)90214-U).

- [33] *C. Marchetti*: Hydrogen and Energy. In: Chemical Economy & Engineering Review (1973).
- [34] *Roeb, M.; Monnerie, N.; Houaijia, A. et al.*: Solar Thermal Water Splitting. In: Gandía, L.M. (ed.): Renewable hydrogen technologies – Production, purification, storage, applications and safety. Elsevier, Amsterdam, 2013, pp. 63-86. ISBN 9780444563521.
- [35] *Nadja Podbregar*: Der direkte Weg – Thermochemische und photokatalytische Wasserstoffproduktion. scinexx | Das Wissensmagazin, 2020, <https://www.scinexx.de/dossierartikel/der-direkte-weg/> [Zugriff am: 26.10.2022].
- [36] *Norman, J.H.; Besenbruch, G.E.; Brown, L.C. et al.*: Thermochemical water-splitting cycle, bench-scale investigations, and process engineering. Final report, February 1977-December 31, 1981 Ausgabe 1982.
- [37] *Gorensek, M.B.; Corgnale, C.; Summers, W.A.*: Development of the hybrid sulfur cycle for use with concentrated solar heat. I. Conceptual design. In: International Journal of Hydrogen Energy 42 (2017), Heft 33, S. 20939-20954. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.06.241>.
- [38] *Onuki, K.; Kubo, S.; Terada, A. et al.*: Thermochemical water-splitting cycle using iodine and sulfur. In: Energy & Environmental Science 2 (2009), Heft 5, S. 491. <https://doi.org/10.1039/b821113m>.
- [39] *BRECHER, L.; SPEWOCK, S.; WARDE, C.*: The Westinghouse Sulfur Cycle for the thermochemical decomposition of water. In: International Journal of Hydrogen Energy 2 (1977), Heft 1, S. 7-15. [https://doi.org/10.1016/0360-3199\(77\)90061-1](https://doi.org/10.1016/0360-3199(77)90061-1).
- [40] *Leuschner, U.*: Die deutsche Gasversorgung von den Anfängen bis 1998.
- [41] *Krzack, S.; Gutte, H.; Meyer, B. (Hrsg.)*: Stoffliche Nutzung von Braunkohle. Springer-Verlag GmbH. Springer Vieweg, Berlin, 2018.
- [42] *Nagel, F.-P.*: Electricity from wood through the combination of gasification and solid oxide fuel cells: systems analysis and Proof-of-concept, ETH Zurich, 2008.
- [43] *Lenz, B.*: Untersuchungen zur autothermen Reformierung von Kerosin Jet A-1 zur Versorgung oxidkeramischer Festelektrolyt-Brennstoffzellen (SOFC) (2007).
- [44] *Fang, Z.*: Production of Hydrogen from Renewable Resources, Biofuels and Biorefineries Serv.5, Springer Netherlands, Dordrecht, 2015.
- [45] *Kıpçak, E.; Akgün, M.*: Hydrogen Production by Supercritical Water Gasification of Biomass. In: *Fang, Z.; Smith, R.L.; Qi, X.* (Hrsg.): Production of Hydrogen from Renewable Resources, Biofuels and Biorefineries. Springer Netherlands, Dordrecht, 2015, S. 179-220. ISBN 978-94-017-7329-4.
- [46] *Torsten Birth; Natascha Eggers; Fabian Giebner*: HyPerFerment – Wasserstoff durch Dunkelfermentation als AddOn für die Biogasanlage. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.21924.55684>.
- [47] *Torsten Birth; Marcel Scheffler; Wolfram Heineken et al.*: Energy-and Resourceefficient Systems – Climate-neutral production using the hydrogen factory of the future – Challenges of system integration. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.32687.20648>.

- [48] *Fraunhofer IFF Magdeburg*: Jahresbericht 2021 des Fraunhofer IFF.
- [49] *Töpler, J.; Lehmann, J. (Hrsg.): Wasserstoff und Brennstoffzelle – Technologien und Marktperspektiven*. Springer-Verlag GmbH. Springer Vieweg, Berlin, 2017.
- [50] *Flüssiggas1.de GmbH*: Wasserstofftank für die Industrie mieten oder kaufen, <https://www.gasido.de/wasserstofftank#lieferung> [Zugriff am: 04.01.2021].
- [51] *Adolf, J.; Arnold, K.; Balzer, C.H. et al.*: Shell Wasserstoffstudie, Hamburg Ausgabe 2017.
- [52] *EMCEL*: EMCEL Wasserstoffdruckbehälter, <https://emcel.com/de/wasserstoffdruckbehälter/> [Zugriff am: 04.01.2021].
- [53] *Torsten Birth; Marcel Scheffler*: Wasserstoff -Versorgung von Industrie- und Gewerbestandorten mittels Kleinverteilssystemen. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.12497.45923>.
- [54] *Sehr, G.M.; Vorbrocker, M.; Birth, T. et al.*: Automated Route Planning of Hydrogen Deliveries. <https://doi.org/10.1109/MELECON53508.2022.9842999>.
- [55] *INES*: Initiative Erdgasspeicherung, <https://erdgasspeicher.de/erdgasspeicher/gasspeicherstandorte/> [Zugriff am: 29.12.2020].
- [56] *Statista*: Erdgasverbrauch Deutschland, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/41033/umfrage/deutschland---erdgasverbrauch-in-milliarden-kubikmeter/#:~:text=Erdgasverbrauch%20in%20Deutschland%20auf%20hohem,Niveau%20von%2089%20Milliarden%20Kubikmeter> [Zugriff am: 29.12.2020].
- [57] *VNG AG*: Untergrundgasspeicher, https://www.vng-gasspeicher.de/documents/10184/22763/VGS_Broschuere_BDL.pdf/ccd80deb-4934-4a91-8e31-1dd05db3336f [Zugriff am: 29.12.2020].
- [58] *H2-Mobility Deutschland GmbH&Co.KG*: Wasserstoffbetankung von Schwerlastfahrzeugen – die Optionen im Überblick (2021).
- [59] *Sicha, E.; Smolinka, T.; Voglstätter, C.*: WASSERSTOFF-INFRASTRUKTUR FÜR EINE NACHHALTIGE MOBILITÄT, Stuttgart Ausgabe März 2013.
- [60] *Gnann, T.; Rose, P.; Wietschel, M.*: Wie könnte ein Tankstellenaufbau für Brennstoffzellen-Lkw in Deutschland aussehen?, Karlsruhe Ausgabe September 2020.
- [61] *Westfalen AG*: Factsheet zur mobilen Wasserstofftankstelle in Kooperation mit NanoSun (Prototyp).
- [62] *Wystrach GmbH*: Product Data Sheet WyRefueler 350 (2021).
- [63] *Wystrach GmbH*: Customized solutions in high pressure, <https://www.wystrach.gmbh/produkt-wyrefueler.html> [Zugriff am: 23.02.2021].
- [64] *FNB Gas*: Das zukünftige Wasserstoffnetz aus Sicht der Fernleitungsnetzbetreiber, <https://www.fnb-gas.de/fnb-gas/veroeffentlichungen/beitraege/das-zukuenftige-wasserstoffnetz-aus-sicht-der-fernleitungsnetzbetreiber/> [Zugriff am: 01.03.2021].

- [65] *fnb_gas_h2_startnetz_2030-scaled-1-927x1024-1.jpg* (JPEG-Grafik, 921 × 938 Pixel) - Skaliert (75%), 2021 [Zugriff am: 21.11.2022].
- [66] *Bayer, T.; Bude, S.; Horn, E. et al.*: Potenzialbeschreibung Wasserstofftransport über das Schienennetz, Wiesbaden Ausgabe Juni 2020.
- [67] *Landesagentur für neue Mobilitätslösungen und Automotive Baden-Württemberg*: Wissen Kompakt: Potenziale in der Wasserstoff-Tankstellentechnologie (2022).
- [68] *Nexant, Inc., Air Liquide, Argonne National Laboratory, Chevron Technology Venture, Gas Technology Institute, National Renewable Energy Laboratory, Pacific Northwest National Laboratory, and TIAX LLC*: 2H2A Hydrogen Delivery Infrastructure Analysis Models and Conventional Pathway Options Analysis Results – Interim Report (2008).
- [69] Fuel Cell Technologies Office Multi-Year Research, Development, and Demonstration Plan – Section 3.2 Hydrogen Delivery (2015).
- [70] *Brinner, A.; Schmidt, M.; Schwarz, S. et al.*: Technologiebericht 4.1 Power-to-gas (Wasserstoff) innerhalb des Forschungsprojekts TF_Energiewende, Stuttgart Ausgabe April 2018.
- [71] *Linde AG*: Die treibende Kraft. Mit Linde Wasserstoffprojekte realisieren., Pullach Ausgabe ohne Datum.
- [72] *Reuter, B.; Faltenbacher, M.; Schuller, O. et al.*: NewBus ReFuelling for European Hydrogen Bus Depots – Guidance Document on Large Scale Hydrogen Bus Refuelling (2017).
- [73] *Quack, H.*: Die Schlüsselrolle der Kryotechnik in der Wasserstoff-Energiewirtschaft, Dresden Ausgabe ohne Angabe.
- [74] *Kurzweil, P.*: Brennstoffzellentechnik – Grundlagen, Materialien, Anwendungen, Gaserzeugung. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2016.
- [75] *Reich, G.; Reppich, M.*: Regenerative Energietechnik – Überblick über ausgewählte Technologien zur nachhaltigen Energieversorgung, Springer eBook Collection Computer Science and Engineering, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2013.
- [76] *Springer Professional*: Erlebt der Wasserstoff-Verbrennungsmotor eine Renaissance?, <https://www.springerprofessional.de/betriebsstoffe/nutzfahrzeuge/erlebt-der-wasserstoff-verbrennungsmotor-eine-renaissance-/14234768> [Zugriff am: 26.03.2021].
- [77] *Thomas Ebert, Daniel Koch, Alvaro Suosa*: MTZ, Motortechnische Zeitung – Nachhaltiger Güterverkehr. In: , S. 30-39.
- [78] *Hilgers, M.*: Alternative Antriebe und Ergänzungen zum konventionellen Antrieb. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Nutzfahrzeugtechnik lernenSammelordner für 9 Lehrhefte, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Wiesbaden, 2017.
- [79] *Langemann, M.*: Bipolarplattenmaterialien für Polymer-Elektrolyt-Membran Elektrolyse, Schriften des Forschungszentrums Jülich. Reihe Energie & Umwelt-Band/volume 348, Forschungszentrum Jülich GmbH, Zentralbibliothek, Jülich, opyright 2016.

- [80] *Jens Conrad*: Aufbau Europas größter Brennstoffzellen-Busflotte – Ein Erfahrungsbericht der Regionalverkehr Köln GmbH, 2021.
- [81] *H2 Energy AG*: HYUNDAI MOTORS LIEFERT DIE ERSTEN XCIENT FUEL CELL TRUCKS IN DER SCHWEIZ AUS UND KÜNDET DIE EXPANSION AUF DIE GLOBALEN NUTZFAHRZEUGMÄRKTE AN, <https://h2energy.ch/hyundai-motors-liefert-die-ersten-xcient-fuel-cell-trucks-in-der-schweiz-aus-und-kuendet-die-expansion-auf-die-globalen-nutzfahrzeugmaerkte-an/> [Zugriff am: 27.03.2021].
- [82] *Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat*: Baugesetzbuch – BauGB. Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat.
- [83] *Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat*: Verordnung über die bauliche Nutzung der Grundstücke – Baunutzungsverordnung – BauNVO. Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat, 2017.
- [84] *GP Joule*: Gesetzliche Grundlage Windanlage/Elektrolyseur. E-Mail, 2021.
- [85] *Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit*: Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge – Bundes-Immissionsschutzgesetz – BImSchG. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, 2020.
- [86] *Dr. Julian Asmus Nebel*: Wasserstoff und Recht – Webinar Mission Hydrogen GmbH, 21.07.
- [87] *Salzlandkreis*: Familienfreundlicher Salzlandkreis – Wegweiser mit Tipps, Antworten und Ansprechpartnern Ausgabe Februar 2010.
- [88] *M. Bauer*: Salzlandkreis, 2020, <https://www.salzlandkreis.de/> [Zugriff am: 20.04.2021].
- [89] *AdminStat.*: Demographie Salzlandkreis, 2021, <https://ugeo.urbistat.com/AdminStat/de/de/demografia/eta/salzlandkreis/15089/3> [Zugriff am: 20.04.2021].
- [90] *Statistisches Landesamt Sachsen-Anhalt*: Erwerbstätigkeit – Pendlerströme der sozialversicherungspflichtig Beschäftigten, Halle (Saale) Ausgabe Juni 2018.
- [91] *Salzlandkreis*: Nahverkehrsplan 2020 – 2030 für den Salzlandkreis – n der Fassung des Beschlusses des Kreistages vom 05.12.2018, Beschluss-Nr. B/0826/2018/16, Dresden Ausgabe Dezember 2018.
- [92] *Thomas Scheid*: Eigenbetriebe des Salzlandkreises, <https://www.kwb-slk.de/>.
- [93] *Tomi Engel*: EnergyMap.Info – Salzlandkreis, 2015, <http://www.energymap.info/energieregionen/DE/105/122/305.html>.
- [94] *Mitteldeutsche Netzgesellschaft Strom mbH*: Unternehmensprofil – Intelligent vernetzt, Kabelsketal Ausgabe 2020.
- [95] *Avacon AG*: Netze für neue Energie – Innovative Energiedienstleistungen für die Region, Helmstedt.
- [96] *MVV Energie AG*: Unternehmensgruppe – Unternehmen des MVV Energie Konzerns, 2021, <https://www.mvv.de/de/ueber-uns/unternehmensgruppe>.

- [97] *Sven Haberland: Alarm- und Gefahrenabwehrplan gemäß § 10 Störfallverordnung für den Betriebsbereich der Biomethananlage Staßfurt GmbH – Biomethananlage Staßfurt GmbH, MVV Umwelt O&M GmbH. In: 2017.*
- [98] *Erdgas Mittelsachsen GmbH: Zahlen und Fakten – Einblicke in unser Unternehmen, 2021, <https://www.e-ms.de/index.php?id=92>.*
- [99] *VNG AG: VNG Gasspeicher GmbH – Europäischer Speicherprofi mit mitteldeutschen Wurzeln, 2020, https://www.vng-gasspeicher.de/wer_wir_sind [Zugriff am: 01.05.2021].*
- [100] *Nordmethan Unternehmensgruppe: Die Biomethanraffinerie Könnern, <https://www.nordmethan.de/eigenanlagen/koennern.html> [Zugriff am: 01.05.2021].*
- [101] *CIECH GROUP: CIECH SODA DEUTSCHLAND, <https://ciechgroup.com/de/ciech-gruppe/gesellschaften-der-ciech-gruppe/ciech-soda-deutschland/> [Zugriff am: 01.05.2021].*
- [102] *Solvay GmbH: Standort Bernburg – In Bernburg wird seit über 130 Jahren Soda hergestellt, 2021, <https://www.solvay.de/standorte/bernburg> [Zugriff am: 01.05.2021].*
- [103] *Kali & Salz Aktiengesellschaft: Kali&Salz Minerals and Agricultur GmbH – Standort Bernburg, 2019, <https://www.kpluss.com/de-de/ueber-ks/standorte/europa/bernburg/index.html> [Zugriff am: 01.05.2021].*
- [104] *TechniSat Digital GmbH: Standorte – Hier entsteht Qualität, 2021, https://www.technisat.com/de_DE/Standorte/352-13/ [Zugriff am: 02.05.2021].*
- [105] *SCHWENK Zement GmbH & Co. KG: SCHWENK Zementwerk Bernburg, 2020, <https://www.schwenk.de/zementwerk/schwenk-zementwerk-bernburg/> [Zugriff am: 02.05.2021].*
- [106] *Verein Deutscher Zementwerke e.V.: Umweltdaten der Deutschen Zementindustrie, 2021, <https://www.vdz-online.de/wissensportal/publikationen/umweltdaten-der-deutschen-zementindustrie-2019> [Zugriff am: 02.05.2021].*
- [107] *Novelis AG: Standorte, <https://de.novelis.com/contact/> [Zugriff am: 02.05.2021].*
- [108] *Mondi Group: Mondi Ascania GmbH – Standort Aschersleben, 2021, www.mondigroup.com/en/about-mondi/where-we-operate/europe/germany/mondi-ascania/ [Zugriff am: 02.05.2021].*
- [109] *Pfeifer & Langen GmbH & Co. KG: Zucker – aus Leidenschaft. – Standort Könnern, 2021, <https://www.pfeifer-langen.com/> [Zugriff am: 02.05.2021].*
- [110] *MAWEA Majoranwerk Aschersleben GmbH: Das Unternehmen – Gute Thüringer Kräuter – Original Ascherslebener Ware, 2020, <https://www.majoranwerk.de/index.php/ct-menu-item-5>.*
- [111] *Cargill Deutschland GmbH: Standort Barby, 2021, <https://www.cargill.de/de/standort-barby> [Zugriff am: 02.05.2021].*
- [112] *Kreiswirtschaftsbetrieb Salzlandkreis: Fahrzeuge der Kreiswirtschaftsbetriebe. E-Mail, 2021.*

- [113] *PreZero Stiftung & Co. KG*: PreZero Energy Bernburg – Moderne Technik für neue Energien, <https://prezero.com/prezero-energy/> [Zugriff am: 05.05.2021].
- [114] *REMONDIS Thermische Abfallverwertung GmbH*: Unternehmen – Stark vor Ort und in der Region, 2021, <https://www.reta-stassfurt.de/unternehmen/> [Zugriff am: 06.05.2021].
- [115] Die Autobahn GmbH des Bundes: Verkehrsaufkommen BAB 14 und BAB 36; Ihre Anfrage vom 04.05.2021. E-Mail, 2021.
- [116] *Mitteldeutsche Zeitung*: LIDL-LOGISTIKZENTRUM – Lidl-Logistikzentrum: 160 Menschen erbringen logistische Meisterleistung. Mitteldeutsche Zeitung, Halle (Saale), 2008.
- [117] *Kraftfahrt-Bundesamt*: Bestand nach Zulassungsbezirken und Gemeinden, 2021, https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/ZulassungsbezirkeGemeinden/b_zulassungsbezirke_inhalt.html?nn=2601598 [Zugriff am: 09.05.2021].
- [118] *Zweckverband ÖPNV Vogtland*: NAHVERKEHRSPLAN – für den NAHVERKEHRS-RAUM VOGTLAND. Dritte Fortschreibung, Auerbach/Vogtland Ausgabe ohne Datum.
- [119] *Kreisverkehrsgesellschaft Salzland mbH*: Daten und Fakten, 2021, <https://www.kvg-salzland.de/cms/index.php/unternehmen/daten-und-fakten> [Zugriff am: 20.05.2021].
- [120] *MULE, S.-A.*: Sachsen-Anhalt – Das Land der erneuerbaren Energien, 2021.
- [121] *Avacon AG*: Übersicht Windkraft- Solaranlagen der Avacon AG. Email, 2021.
- [122] *STADTWERKE SCHÖNEBECK GMBH*: Übersicht Windkraft- Solaranlagen der Stadt Schönebeck. Email, 2021.
- [123] *Ortsdienst Media GmbH*: Tankstellen Salzlandkreis, keine Datumsangabe, <https://www.ortsdienst.de/sachsen-anhalt/salzlandkreis/tankstelle/?seite=2> [Zugriff am: 20.05.2021].
- [124] *Stadtwerke Bernburg*: Erdgas – Erdgasfahrzeuge - eine lohnende Alternative, 2021, <https://www.stadtwerke-bernburg.de/privatkunden/tanken/erdgas-tanken.html>.
- [125] *Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft und Energie des Landes Sachsen-Anhalt*: Wasserstoffstrategie für Sachsen-Anhalt – H2ST.ST (2021).
- [126] *Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft und Energie*: Grünbuch zur Entwicklung einer Wasserstoffstrategie – für Sachsen-Anhalt, Magdeburg Ausgabe August 2020.
- [127] *Tom Smolinka, , Martin Günther, Jürgen Garche*: »Stand und Entwicklungspotenzial der Wasserelektrolyse zur Herstellung von Wasserstoff aus regenerativen Energien« – Kurzfassung des Abschlussberichts, Freiburg im Breisgau Ausgabe Dezember 2010.
- [128] *Martin Robinius*: Strom- und Gasmärktedesign zur Versorgung des deutschen Straßenverkehrs mit Wasserstoff, Jülich Ausgabe 2015.

- [129] *Kreiswirtschaftsbetrieb des Salzlandkreises*: Fahrzeuge Kreiswirtschaftsbetriebe. E-Mail, 2021.
- [130] Salzlandkreis | 2019-06-27-Pressmüllfahrzeuge, 2022, <https://www.salzlandkreis.de/aktuelles/news/2019-1/2019-06-27-pressmuellfahrzeuge/> [Zugriff am: 21.11.2022].
- [131] Kreisverwaltung Salzlandkreis: Kommunale Fahrzeuge der Stadt Bernburg/des Salzlandkreises. E-Mail, 2021.
- [132] *Bauerngut Fleisch- und Wurstwaren GmbH*: Übersicht Gabelstapler/Niederflurfahrzeuge am Standort Könnern. E-Mail, 2021.
- [133] *Jungheinrich AG*: Jungheinrich Fahrzeuge im Salzlandkreis. E-Mail, 2021.
- [134] *Toyota Material Handling*: Auslieferungsstatistik Salzlandkreis. E-Mail, 2021.
- [135] *VDMA*: Liste Gabelstapler/Niederflurfahrzeuge Salzlandkreis. E-Mail, 2021.
- [136] *KVG Salzland*: Busflotte KVG Salzland. E-mail, 2021.
- [137] *Landtag Sachsen Anhalt*: Elektrifizierung des Schienenverkehrs in Sachsen-Anhalt – Kleine Anfrage durch die Abgeordnete Cornelia Lüddemann (BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN), Magdeburg Ausgabe März 2020.
- [138] *Julian Philip S. Marx*: shribe! master your studies WISSENSCHAFTSTHEORIE – EINFACH ERKLÄRT – Was ist ein Modell? (Wissenschaftstheorie einfach erklärt), 2020, <https://shribe.de/was-ist-ein-modell/> [Zugriff am: 30.05.2021].
- [139] *Noskin, A.*: Die Entwicklung der Wasserstoffwirtschaft – Modelle zur Wasserstoffinfrastruktur. Diplomica-Verl., Hamburg, 2015.
- [140] *RWTH Aachen*: Auswirkungen von CO₂ -Preisen auf den Gebäude-, Verkehrs- und Energiesektor – Kurzstudie, Aachen Ausgabe Oktober 2019.
- [141] *Kalchschmid, V.; Erhart, V.; Angerer, K. et al.*: Decentral Production of Green Hydrogen for Energy Systems: An Economically and Environmentally Viable Solution for Surplus Self-Generated Energy in Manufacturing Companies? In: *MDPI - Sustainability* (2023), Heft 4. <https://doi.org/10.3390/su15042994>.
- [142] *Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur*: Berechnung des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen des ÖPNV – Leitfaden zur Anwendung der europäischen Norm EN 16258.
- [143] *Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle*: Förderung von elektrisch betriebenen Fahrzeugen – Merkblatt für Anträge nach der Richtlinie zur Förderung des Absatzes von elektrisch betriebenen Fahrzeugen (Umweltbonus) vom 21. Oktober 2020, Eschborn Ausgabe Juni 2021.
- [144] *Leon Wagener*: Neuer Business-Case? Quotenhandel von Wasserstoff aus Biomasse, https://gwf-gas.de/wp-content/uploads/2023/01/GE_01_2023_Fokus_Mobilitaet_mit_Gas_Arcanum.pdf [Zugriff am: 12.02.2023].

Impressum

Wasserstoffinfrastrukturentwicklung im ländlichen Raum

Studie zur Analyse und Ausarbeitung eines Modellprojektes für Wasserstoff-Infrastruktur im Verkehrssektor in ländlichen, strukturschwachen Regionen am Beispiel der Energieregion Staßfurt in der H₂-Region Salzlandkreis

am Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb
und -automatisierung IFF, Magdeburg

Herausgeberin
Prof. Dr. Julia C. Arlinghaus, Institutsleiterin

Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb
und -automatisierung IFF
Sandtorstraße 22 | 39106 Magdeburg
Telefon +49 391 4090-0 | Fax +49 391 4090-596
ideen@iff.fraunhofer.de | www.iff.fraunhofer.de

Veröffentlicht am 13. Februar 2023

DOI: 10.24406/publica-398

Autoren
Marcel Scheffler, Torsten Birth, Natascha Eggers,
Przemyslaw Komarnicki

Satz/Layout
Bettina Rohrschneider

Alle Rechte vorbehalten

Für den Inhalt der Vorträge zeichnen die Autorinnen und Autoren verantwortlich. Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften. Soweit in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden ist, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen.

© Fraunhofer IFF, Magdeburg 2023

