HYEXPERTS | Grimm Heimat NORDHESSEN

HyExperts II: Region Nordhessen

Abschlussbericht

August 2023

Gefördert durch:
Bundesministerium für Digitales und Verkehr

Koordiniert durch:
NOW
NOW-GMBH.DE

Projektträger:
ptj
Projektträger Jülich
Forschungszentrum Jülich

IMPRESSUM

Herausgeber

Regionalmanagement Nordhessen GmbH
Ständeplatz
34117 Kassel

im Auftrag der Landkreise Kassel, Werra-Meißner, Waldeck-Frankenberg, Schwalm-Eder, Hersfeld-Rotenburg sowie der Stadt Kassel. Der Werra-Meißner Kreis hat federführend die Antragstellung übernommen.

www.regionnordhessen.de

Inhaltsverzeichnis

Vorwort ... 1

1 Ausgangslage & Zielsetzung ... 2

1.1 Überregionale Einordung und relevante Rahmenbedingungen ... 2

1.2 Ausgangslage – die Region und ihre Herausforderungen ... 2

1.3 Aufgabenstellung – Arbeitspakete und Vorgehensmodell ... 3

1.4 Zielsetzung – geplante Kernergebnisse des Projekts ... 4

2 Analyse – Potenziale in der Region ... 5

2.1 Studien- und datenbasierter Ansatz ... 5

2.1.1 Ausbaustand erneuerbare Energien in Nordhessen ... 5

2.1.2 Potenziale Erneuerbare Energien ... 7

2.1.3 Wasserstoffpotenzial Nordhessen ... 19

2.1.4 Wasserstofferzeugung in anderen HyLand-Projekten ... 21

2.1.5 HYWHEELS ... 22

2.1.6 HyDrive OWL ... 23

2.1.7 MH_2Regio ... 24

2.1.8 Wartburgkreis und Unstrut-Hainich-Kreis ... 25

2.1.9 Clusterbildung von potenziellen Erzeugungsstandorten ... 25

2.1.10 Potenzieller künftiger Wasserstoffbedarf in der Industrie ... 31

2.1.11 Potenzieller künftiger Wasserstoff in Mobilität und Logistik ... 43

2.1.12 Regionales Tankstellennetz ... 68

2.1.13 Potenzielle Sauerstoffbedarfe ... 81

2.1.14 Raumwärme und Quartiere ... 83

2.1.15 Transport und Speicherung ... 85

2.2 Dialog-Ansatz ... 91

2.2.1 Potenzieller künftiger Wasserstoff in der Industrie ... 95

2.2.2 Potenzieller künftiger Wasserstoff in Mobilität und Logistik ... 96

2.2.3 Regionales Tankstellennetz ... 98

2.2.4 Transport und Speicherung Regionale Projekte & Initiativen ... 99

3 Clusterbildung ... 102

3.1 Lupenraumbetrachtung nach der Bottom Up Methode ... 102

3.2 Lupenraum Kläranlage KasselWasser ... 103
3.3 Lupenraum Wabern ... 105
3.4 Lupenraum Knallhütte ... 106
3.5 Lupenraum Volkmarsen ... 108
3.6 Potenziale für ein nachhaltiges Industriegebiet in Waldau ... 109
3.7 Ausblick Lupenräume ... 110
3.8 Akzeptanz und Innovationen ... 111
3.9 Vernetzung und Digitalisierung ... 111
3.9.1 Aufzeigen der Anwendungsfelder zur Vernetzung der relevanten Systeme in der Wertschöpfungskette ... 111
3.9.2 Aufzeigen von Möglichkeiten von smarter Mess- und Überwachungselektronik zur Überwachung von Füllständen und möglicher kritischer Zustände und Ereignisse 125
3.9.3 Ermittlung der erforderlichen Infrastruktur ... 130
3.9.4 Betrachtung Prognosesysteme für Erzeugung und Betankung ... 140
3.9.5 Condition Monitoring / digitale Instandhaltung ... 144
3.9.6 Möglichkeiten für digitale Konzepte im wasserstoffbetriebenen ÖPNV im urbanen und ländlichen Raum ... 147

4 Unsere Vision für Nordhessen und darüber hinaus ... 150

5 Abkürzungsverzeichnis ... 152

6 Abbildungsverzeichnis ... 153

7 Tabellenverzeichnis ... 157

8 Literaturverzeichnis ... 159

9 Anhang ... 169
9.1 Ergänzende Tabellen und Abbildungen zu Wasserstoffpotenzialen ... 169
9.2 Beschreibung der ermittelten Tankstellenstandorte mit Bildmaterial ... 171
9.3 Steckbriefe Wasserstoff-Erzeugungstechnologien ... 180

Vorwort

Sehr geehrte Damen und Herren

mit dem vorliegenden Werk geht ein Jahr intensiver Arbeit im HyExperts *NordH$_2$essen – Wasserstoff verbindet* zu Ende. Gemeinsam mit unseren Partnern Infraserv GmbH & Co. Höchst KG, evety GmbH und dem House of Energy e.V. sowie deren Partnern konnten wir zahlreiche neue und wegweisende Erkenntnisse über die regionale Wasserstoffwirtschaft gewinnen.

Aus meiner Sicht wird es in den nächsten Jahren beginnend ab heute entscheidend sein, das „System Energieversorgung“ im Hinblick auf das Zusammenspiel der Energieträger, Speichertechnologien, Netzinfrastruktur und der angeschlossenen Akteure zukunftsfest weiterzuentwickeln. Das größte Potenzial für eine schnelle und erfolgreiche Dekarbonisierung der Wirtschaft liegt genau in diesem Systemansatz. Hier will Nordhessen für Hessen als quasi Reallabor der Partner im hessischen Innovationsökosystem sein und gewonnene Erkenntnisse, Ergebnisse und Umsetzungsstrategien für ganz Hessen und Deutschland zur Verfügung stellen.

Die vorliegenden Ergebnisse bilden eine wichtige Grundlage für das Entstehen einer sektorübergreifenden nordhessischen Wasserstoffwirtschaft. Gemeinsam mit unseren Partnern aus Wirtschaft und öffentlichem Sektor werden wir die notwendige Verstetigung vorantreiben.

Mit energiegeladenen Grüßen

Kai Georg Bachmann
Geschäftsführer
Regionalmanagement Nordhessen GmbH

1 Ausgangslage & Zielsetzung

1.1 Überregionale Einordung und relevante Rahmenbedingungen

Für das Erreichen der gesetzlichen Klimaziele sind eine deutliche Steigerung der Energieeffizienz sowie ein starker und beschleunigter Ausbau der erneuerbaren Energien unabdingbar. Hierzu müssen alle Sektoren einen anspruchsvollen Beitrag leisten. Die direkte Nutzung von Strom ist im Vergleich zur Nutzung von Wasserstoff mit geringeren Umwandlungsverlusten verbunden. Sie sollte nach Möglichkeit zum Einsatz kommen, wenn sie mit Blick auf die Gesamtsystemeffizienz und Versorgungssicherheit die wirtschaftliche Variante ist. Im Zuge der Transformation wird die sogenannte Sektorenkopplung, durch die zunehmend erneuerbarer Strom in den Bereichen Gebäude, Verkehr und Industrie zur Verfügung stehen wird, wachsende Bedeutung erfahren. Grüner Wasserstoff und dessen Derivate werden hierbei die wichtige Rolle übernehmen, erneuerbare Energie zu speichern und zu transportieren. [1]

Wasserstoff ist das leichteste chemische Element im Periodensystem. Obwohl er elementar im Universum am häufigsten vorkommt, ist er auf der Erde Großteils gebunden. Er besitzt eine hohe gravimetrische (33,33 kWh/kg) und eine geringe volumetrische Energiedichte (3 kWh/m^3). Die in Deutschland produzierten und verbrauchten 55 bis 60 TWh Wasserstoff (2020) werden derzeit hauptsächlich durch Dampfreformierung von Erdgas (95%) gewonnen, wobei CO_2 als Nebenprodukt emittiert wird. Durch Elektrolyse bereitgestellter Wasserstoff liegt mit ca. 5% noch deutlich darunter. [2] In der Nationalen Wasserstoffstrategie wird mit einem Anstieg des Bedarfs auf etwa 110 bis 380 TWh im Jahr 2050 gerechnet. [3] Dieser enorme zusätzliche Bedarf soll hierbei hauptsächlich mit grünem Wasserstoff also aus Elektrolyse mit Hilfe von erneuerbaren Energien gedeckt werden. Da dieser Bedarf die Potenziale zur Wasserstofferzeugung in Deutschland deutlich überschreiten, werden verschiedene Szenarien zum Import von grünem Wasserstoff aus Regionen mit großem Potenzial erneuerbarer Energien erwartet. [4] Strategische Partnerschaften wurden hierbei bereits mit Kanada, Australien, Neuseeland und verschiedenen afrikanischen Staaten Partnerschaften geschlossen. [5] Umso wichtiger ist jedoch, der Abgleich von Erzeugungs- und Nachfragepotenzialen einer Region, um somit die Möglichkeiten einer lokalen Wasserstoffwirtschaft bestmöglich auszunutzen und dementsprechend mit Importen zu ergänzen.

1.2 Ausgangslage – die Region und ihre Herausforderungen

In Nordhessen findet sich eine ausgeprägte Kompetenzstruktur rund um die Themen „Alternative Energien“, „Energiewende“ und „Nachhaltiges Wirtschaften“, die sich beginnend in der Nachwendezeit zu einem „Know-How-Gravitationszentrum“ im nationalen Vergleich etablieren konnte.

Die Region Nordhessen will sich auf dieser Basis als Vorreiterregion im Bereich der Transformation des Energiesystems etablieren und daraus entscheidende Innovations-, Wachstums- und Beschäftigungspotenziale für die Zukunft entlang der gesamten Wertschöpfungskette sichern.

Zu den entscheidenden Kompetenzträgern in Nordhessen gehören im Zentrum die Universität Kassel, zahlreiche Institute wie das Fraunhofer IEE, nordhessische Energieversorger- und Netzbetreiber, Energieunternehmen wie die Viessmann Group GmbH & Co. KG ist und die SMA Solar Technology AG, die Mobilitätsbranche mit der Daimler Truck Holding AG und der

Volkswagen AG, die sich als E-Mobilitätsstandorte etabliert haben und eine Vielzahl in den Clustern dezentrale Energien und Mobilität der Regionalmanagement Nordhessen GmbH organisierte weitere Unternehmen. Das House of Energy e.V. als Bindeglied zur gesamthessischen Energiebranche mit Sitz in Kassel ist hier ebenso ein wichtiger Partner.

Mit der Klimaallianz der nordhessischen Wirtschaft (Industrie- und Handelskammer Kassel Marburg, Handwerkskammer, VHU) hat sich auch die verfasste Wirtschaft in der Region Nordhessen klar zur Transformation des Energiesystems bekannt.

Auf mittlere Sicht wird es in den nächsten Jahren beginnend ab heute entscheidend sein, das „System Energieversorgung“ im Hinblick auf das Zusammenspiel der Energieträger, Speichertechnologien, Netzinfrastruktur und der angeschlossenen Akteure zukunftsfest weiterzuentwickeln. Das größte Potenzial für eine schnelle und erfolgreiche Dekarbonisierung der Wirtschaft liegt genau in diesem Systemansatz. Hier will Nordhessen für Hessen der Partner im hessischen Innovationsökosystem sein und gewonnene Erkenntnisse, Ergebnisse und Umsetzungsstrategien für ganz Hessen und Deutschland zur Verfügung stellen. Hier gilt es insbesondere auch die Innovationspotenziale und Fähigkeiten des Handwerks neben den Potenzialen von Industrie, Wissenschaft und Forschung zusammen zu bringen.

Eine mit dem Land Hessen abgestimmte Wasserstoffstrategie von der Erzeugung über die Übertragung bis hin zur Anwendung von (grünem) Wasserstoff wird ein wichtiger System-Baustein sein. Hier wird neben der Mobilitätswirtschaft vor allem der kaskadierte Einsatz von Wasserstoff als chemischen Speicherelement für die Energiewende im Fokus stehen. Als eine der HyExperts-Regionen Deutschlands will Nordhessen gemeinsam mit der regionalen Wirtschaft, den Planungsträgern, Investoren und Behörden der Region schnell in die Umsetzung der Theorie in die Praxis kommen. Dabei muss stets der Blick auf überregionale Zusammenhänge gerichtet bleiben, sodass die entstehende (nord)hessische Wasserstoffwirtschaft auch bei Anschluss an eine überregionale Pipelineinfrastruktur noch wettbewerbsfähig ist.

Die Motivation für die (nord)hessische Wirtschaft, sich hier zu engagieren besteht auch in der Aussicht auf eine doppelte Dividende: Klimawandel bremsen und Schöpfung bewahren auf der einen Seite, neue und nachhaltige Geschäftsmodelle, die in die dekarbonisierte Zukunft weisen, auf der anderen.

1.3 Aufgabenstellung – Arbeitspakete und Vorgehensmodell

Die Reduzierung lokaler Emissionen ist erforderlich, um die Luftqualität zu verbessern und negative Auswirkungen auf die Gesundheit zu mildern. Die Bundesregierung Deutschlands hat sich zum Ziel gesetzt, bis zum Ende des Jahrzehnts seinen Treibhausgas-Ausstoß um 65 Prozent gegenüber dem Jahr 1990 verringern. Die höheren Ambitionen wirken sich auch auf die CO_2—Kohlendioxid-Minderungsziele bis zum Jahr 2030 in den einzelnen Sektoren aus: in der Energiewirtschaft, der Industrie, im Verkehrssektor, im Gebäudebereich und in der Landwirtschaft. Das Land Hessen hat sich zum Ziel gesetzt, bis 2020 seine Treibhausgasemissionen um 30 Prozent im Vergleich zu 1990 und bis 2025 um 40 Prozent zu reduzieren. Bis 2050 will Hessen klimaneutral werden und strebt eine Reduzierung von mindestens 90 Prozent an. Der Klimaschutzplan unterlegt diese Ziele mit 140 konkreten Maßnahmen. Die Stadt Kassel unterstützt grundsätzlich die Klimaschutzpläne des Bundes und des Landes Hessen. Fossile Brennstoffe erzeugen lokale Schadstoffe wie Stickoxide, Feinstaub und Schwefeldioxid. Die Reduzierung und Vermeidung lokaler Luftverschmutzung und die Abschwächung des Klimawandels gehören auch regional zu den dringlichsten Umweltanliegen, gerade in einer ländlichen Region wie Nordhessen, die auch von Emissionen

aufgrund von Durchgangs- und Logistikverkehr betroffen ist. Um die regionalen und globalen Emissionsreduktionsziele zu erreichen, ist ein konsequenter Umstieg auf erneuerbare Energieträger und Mobilitätskonzepte notwendig.

Mittels des Energieträgers Wasserstoff möchte die Innovationsregion Nordhessen jedoch nicht nur eine Reduzierung lokaler Emissionen bewirken, sondern sie möchte diesen auch als nachhaltige Brücke zwischen urbanen und ländlichen Gegenden, zwischen Industrie, Gewerbe und Mobilität sowie zwischen der Region Nordhessen selbst und weiteren H_2-Pionier-Regionen in Deutschland einsetzen. Die in der Region bereits bestehenden Planungen hinsichtlich einer ganzheitlichen H_2-Wirtschaft sollen dabei im Projekt *NordH$_2$essen – Wasserstoff verbindet* untersucht und in ein umsetzbares Konzept überführt werden.

Folgende Projektziele werden gesetzt:

- Lokale H2-Erzeugung mittels Windenergie, Solarenergie, Biomasse und Abfällen
- Einführung der Wasserstoff-Brennstoffzellen-Technologie (H2-BZ-Technologie) in Mobilitätsanwendungen und der Aufbau regionaler Fahrzeugflotten
- Aufbau eines H2-Tankstellennetzes und Eingliederung in ein nationales Netz
- Anwendung von Wasserstoff bzw. der Abwärme aus der H2-Erzeugung in der Feuerfestindustrie, Prozessindustrie bzw. Wärmebereitstellung
- Aufbau nachhaltiger Gewerbeparks mittels erneuerbarer Energien, grünem Wasserstoff

Die richtigen Voraussetzungen dafür sind in Nordhessen gegeben. Vom Potenzial einer grünen H_2-Erzeugung aus erneuerbaren Energien, Biomasse und Abfällen bis hin zu gesicherten Abnehmern des lokal produzierten Wasserstoffs in den Branchen Logistik, Mobilität, Fahrzeugbau und Energie. Die Innovationsregion hat diverse Standortvorteile und bildet einen idealen Ausgangspunkt für eine H_2-Modellregion mit Übertragbarkeitspotenzial.

1.4 Zielsetzung – geplante Kernergebnisse des Projekts

Das Ziel von HyExperts *NordH$_2$essen* ist es, dass in der Region Nordhessen identifizierte Potenzial bezüglich einer integrierten Nutzung der Wasserstofftechnologie auszubauen. Im Fokus stehen dabei der Aufbau einer regionalen Erzeugungskapazität von grünem Wasserstoff (H_2), die Definition eines regionalen H_2-Tankstellennetzes, welches strategisch in den Aufbau eines nationalen H_2-Tankstellennetzes eingefügt werden kann, und der Aufbau regionaler Fahrzeugflotten insbesondere im ÖPNV, in der Logistik bzw. Spedition sowie im Bereich der kommunalen Fahrzeuge. Ferner soll die Anwendung von Wasserstoff bzw. Abwärme aus der H_2-Erzeugung in der Feuerfestindustrie, in der Prozessindustrie sowie in der Wärmebereitstellung betrachtet werden. Somit kann durch die Kopplung der Sektoren ein essenzieller Beitrag zur Erreichung der gesteckten Ziele auf dem Weg hin zu einer nachhaltigen Mobilität und erneuerbaren Versorgung von Gewerbeparks geleistet werden.

Neben der Identifikation von Potenzialen sollen durch HyExperts *NordH$_2$essen* regionale H_2-Projektideen identifiziert und vorangetrieben werden. Der Schwerpunkt dieser Projekte liegt in dem Bereich Mobilität, aber auch andere Sektoren werden in die umfangreiche Analyse einbezogen.

Die ermittelten Ergebnisse sollen die Umsetzbarkeit der Projekte gezielt ermöglichen und sie beschleunigen.

2 Analyse – Potenziale in der Region

Bei der Durchführung der Potenzialanalyse im Rahmen dieses HyExperts ist es entscheidend, sowohl Analysen basierend auf Studien, statistischen und öffentlich verfügbaren Daten - als auch konkrete Dialoge mit Akteuren aus der Region durchzuführen. Der erste Teil dieses Konzepts konzentriert sich auf die Analyse vorhandener Studien und Daten, um Erkenntnisse über das theoretische Gesamtpotenzial der Region zu gewinnen. Der zweite Teil hingegen legt den Schwerpunkt auf den Dialog mit regionalen Unternehmen und Akteure, um detaillierte Informationen über deren Bedürfnisse, Herausforderungen und Möglichkeiten zu erhalten. Er dient insbesondere dazu, die theoretischen Potenziale aus der Studien- und Datenanalyse zu konkretisieren und zu validieren.

Beide Ansätze ergänzen sich, und jeder Ansatz liefert Informationen für den anderen. Während der studienbasierte Ansatz ein übergeordnetes Potenzial der Region vermittelt, bietet der Dialog-Ansatz eine detailliertere Perspektive vor Ort, die dazu beitragen kann, spezifische Chancen und Hindernisse zu ermitteln. Die Kombination beider Ansätze ermöglicht ein umfassenderes Verständnis des regionalen Wasserstoff- und Energiepotenzials und kann als Grundlage für strategische Entscheidungen und die Entwicklung von Strategien dienen.

2.1 Studien- und datenbasierter Ansatz

Bei diesem Ansatz werden Daten aus verschiedenen Quellen wie staatlichen Statistiken, Berichten und Studien gesammelt, auf den zu betrachtenden Untersuchungsraum angewendet und analysiert, um ein umfassendes Verständnis des regionalen Wasserstoff- zu gewinnen. Dieser Ansatz ermöglicht die Identifizierung von übergreifenden Trends und Möglichkeiten, die dem Wasserstoff- und Energiesektor der Region zugutekommen könnten. Die jeweils innerhalb dieses Projekts verwendeten Daten und Quellen werden an den entsprechenden Stellen innerhalb des Dokuments detailliert referenziert.

2.1.1 Ausbaustand erneuerbare Energien in Nordhessen

Im Rahmen des Feinkonzepts soll die Möglichkeit der grünen Wasserstofferzeugung untersucht und dargestellt werden. Dafür ist die Bereitstellung grünen Stroms aus erneuerbaren Energien essenziell. In einem ersten Schritt wird deshalb der aktuelle Ausbaustand der erneuerbaren Energien in Nordhessen dargestellt, insbesondere in Hinblick auf die H_2-Erzeugungspotenziale aus Wind, Solar, Biomasse, Abfällen und Klärschlamm.

Der Ausbaustand der erneuerbaren Energien in Nordhessen nimmt seit Jahren stetig zu, allen voran die Wind- und Solarkraft, welche mit einer installierten Leistung von 789 MW bzw. 902 MW im Vergleich zur Bioenergie und Wasserkraft den Großteil an erneuerbarem Strom im Jahr 2022 gestellt haben (siehe Abbildung 1). Die Ausbaupotenziale der Wasserkraft gelten in Deutschland als gering, weshalb sich auch deren Potenzial in Nordhessen in den letzten Jahren kaum verändert hat (28 MW im Jahr 2011 vs. 24 MW im Jahr 2020). Jedoch ist Wasserkraft grundlastfähig und im Gegensatz zu Wind- und Solarkraft deutlich geringeren Schwankungen unterworfen. Dies ist wichtig für die Netzstabilität des deutschen Stromnetzes, würde jedoch auch für eine hohe und konstante Auslastung eines Elektrolyseurs für die Produktion von Wasserstoff sorgen.

Bei allen Anlagen gilt, dass sich die Produktion von Wasserstoff mit diesen vermeintlich nur lohnt, wenn diese nicht mehr durch das EEG gefördert werden.

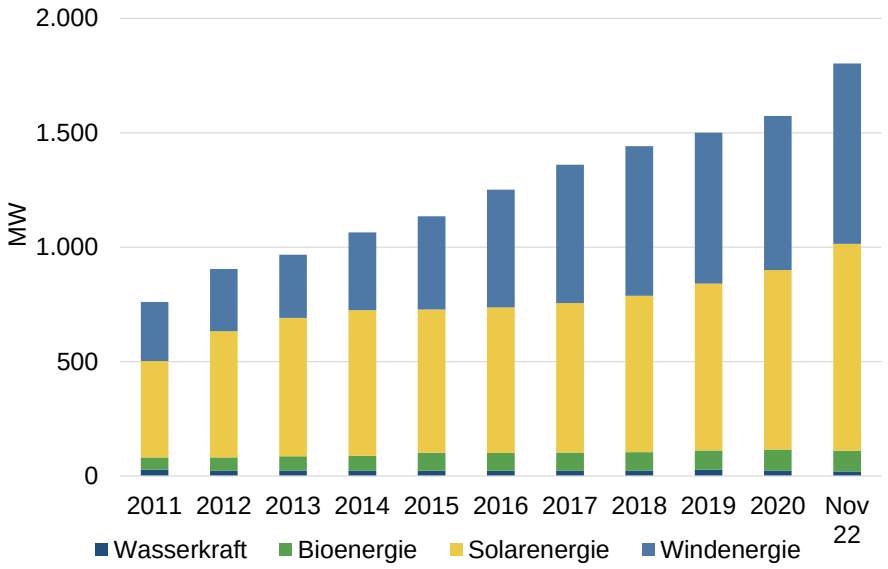


Abbildung 1: Leistung der installierten Erneuerbare Energieanlagen in Nordhessen [6] [7]

Abbildung 2 gibt einen Überblick über die in Nordhessen vorhandenen Energieträger, aufgeschlüsselt nach Art des Energieträgers und der Bruttonennleistung. Auch hier wird deutlich, dass die Energieformen Wind (blau) und Photovoltaik (gelb) einen Großteil der Primärenergieträger in Nordhessen ausmachen. Biomasse und Energie aus nicht biogenem Abfall spielen noch eine untergeordnete Rolle.

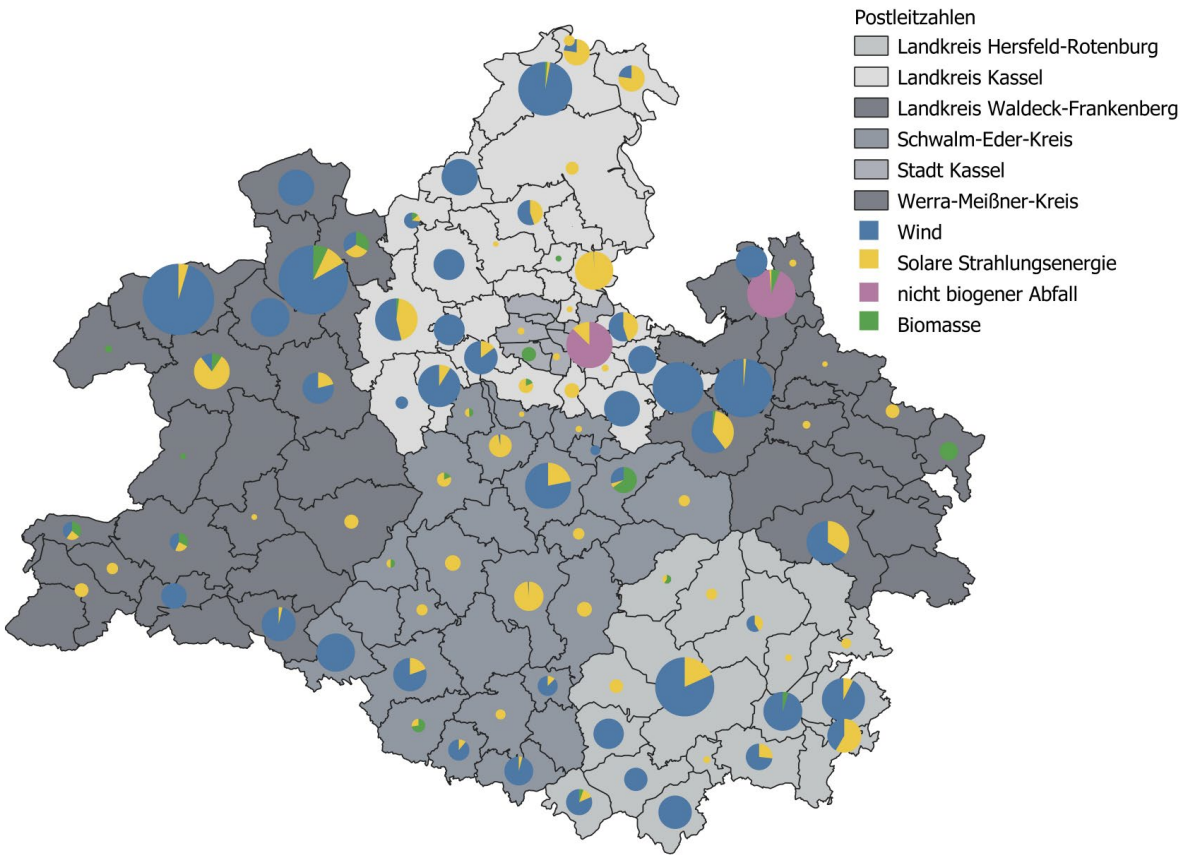


Abbildung 2: Übersicht der vorhandenen Energieträger in Nordhessen [7]

2.1.2 Potenziale Erneuerbare Energien

2.1.2.1 Potenzial Wind

Die Abbildung 3 zeigt das Windpotenzial und die aktuell installierten Anlagen bezogen auf die Postleitzahlen in Nordhessen mit insgesamt 789 MW installierter Leistung. Die Erzeugung aus Windenergie ist aufgrund der topgrafischen und landschaftlichen Gegebenheiten unterschiedlich stark ausgeprägt. Es zeigt aber auch, dass ein Potenzial zum Ausbau vorhanden ist.

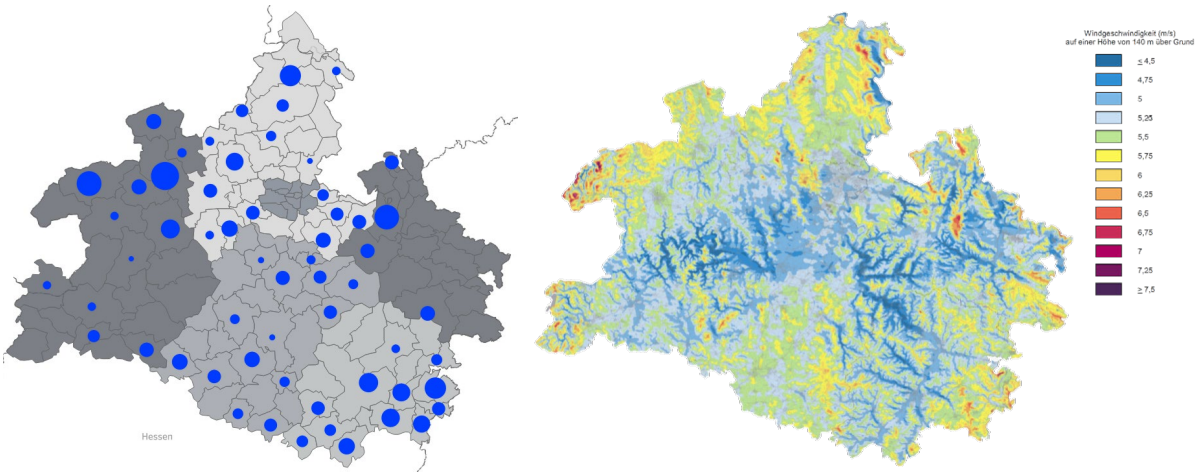


Abbildung 3: Installierte Windleistung (links) und Windressource in 140 m Höhe in Nordhessen (rechts), nach [8]

In Bezug auf das H_2-Erzeugungspotenzial aus Windenergieanlagen wurden zunächst alle Windvorranggebiete (WVRG) in Nordhessen identifiziert. Vorlage hierfür waren die Steckbriefe zu den Vorranggebieten für Windenergie des Umweltberichts zum Teilregionalplan Energie Nordhessen des Regierungspräsidiums Kassel [9]. Durch einen Abgleich mit den im Windatlas des Hessischen Landesamts für Naturschutz, Umwelt und Geologie [10] dargestellten Windenergieanlagen wurden noch freie Windvorranggebiete identifiziert. Sowohl beplante als auch beklagte Windvorrangflächen wurden hierfür ausgeschlossen. Eine Übersicht darüber findet sich in Tabelle 1.

Tabelle 1: Windvorranggebiete (WVRG) in Nordhessen

Landkreis	Anzahl WVRG	Fläche WVRG [ha]	Anzahl freie WVRG	Freie Fläche [ha]	Freie Fläche [%]
Hersfeld-Rotenburg	30	2.752	12	1.041	38%
Landkreis Kassel	30	4.248	7	1.410	33%
Schwalm-Eder-Kreis	28	1.710	17	1.013	59%
Waldeck-Frankenberg	45	4.095	16	1.391	34%
Werra-Meißner-Kreis	17	1.415	8	409	29%
Gesamt	*150*	*14.220*	*60*	*5.264*	

Bei der Planung von Windparks arbeitet man in der Regel mit Abstandsellipsen, die aufgrund von Verschattung (in Bezug auf die Windleistung) und Turbulenzen eingehalten werden sollten. Als Wert wird hier meistens der 5-fache Rotordurchmesser in Hauptwindrichtung und der 3-fache Rotordurchmesser in Nebenwindrichtung angenommen [11]. Da bei der Planung der Flächen mit Windenergieanlagen die gesamte Fläche mit Randbereichen berücksichtigt

wird, wurden verschiedene Windparks und deren Belegung analysiert. Bei der vorliegenden Potenzialanalyse wurde vereinfacht davon ausgegangen, dass eine Windenergieanlage mit einer Leistungsgröße von 5,6 MW aufgrund der genannten Abstandsregelungen circa 30 Hektar benötigt[1]. Daraus ergeben sich für die Region Nordhessen und die einzelnen Landkreise die in Tabelle 2 dargestellten Möglichkeiten der Bebauung der noch freien Windvorrangflächen.

Tabelle 2: Anzahl und Leistung möglicher Windenergieanlagen in Nordhessen auf freien Vorrangflächen

Landkreis	Anzahl möglicher Anlagen à 5,6 MW[2]	Leistung [MW][3]
Hersfeld-Rotenburg	30	168
Kassel (Kreis)	45	252
Schwalm-Eder-Kreis	30	168
Waldeck-Frankenberg	42	235
Werra-Meißner-Kreis	12	67
Gesamt	*159*	*890*

Auch solche Anlagen, welche nach 20 Betriebsjahre nicht länger durch das EEG gefördert werden, aber womöglich weiterbetrieben werden können, bieten Potenzial zur Wasserstofferzeugung. Betreiber dieser Anlagen benötigen neue Vermarktungskonzepte für den erzeugten Windstrom. Elektrolyseure können als langfristige Abnehmer dienen. Abbildung 4 zeigt die derzeit in Nordhessen befindlichen Windenergieanlagen, welche seit 1990 in Betrieb gegangen sind und noch betrieben werden.

[1] Die 30 ha stellen nicht der Flächenbedarf einer Windenergieanlage dar. Eine moderne Windenergieanlage mit etwa 200 m Nabenhöhe nimmt etwa 2.400 m² Fläche für Aufstellung und Kranstellplatz in Anspruch. Für Aufbau und Zuwegung werden rund 2.500 m² benötigt, die aber nach Inbetriebnahme der Anlage teilweise zurückgebaut werden können. [7]

[2] Die Anzahl der möglichen Windenergieanlagen à 5,6 MW wurde anhand der einzelnen Flächen der freien Windvorranggebiete und nicht anhand der freien Gesamtfläche berechnet.

[3] Bei 5,6 MW je Windenergieanlage

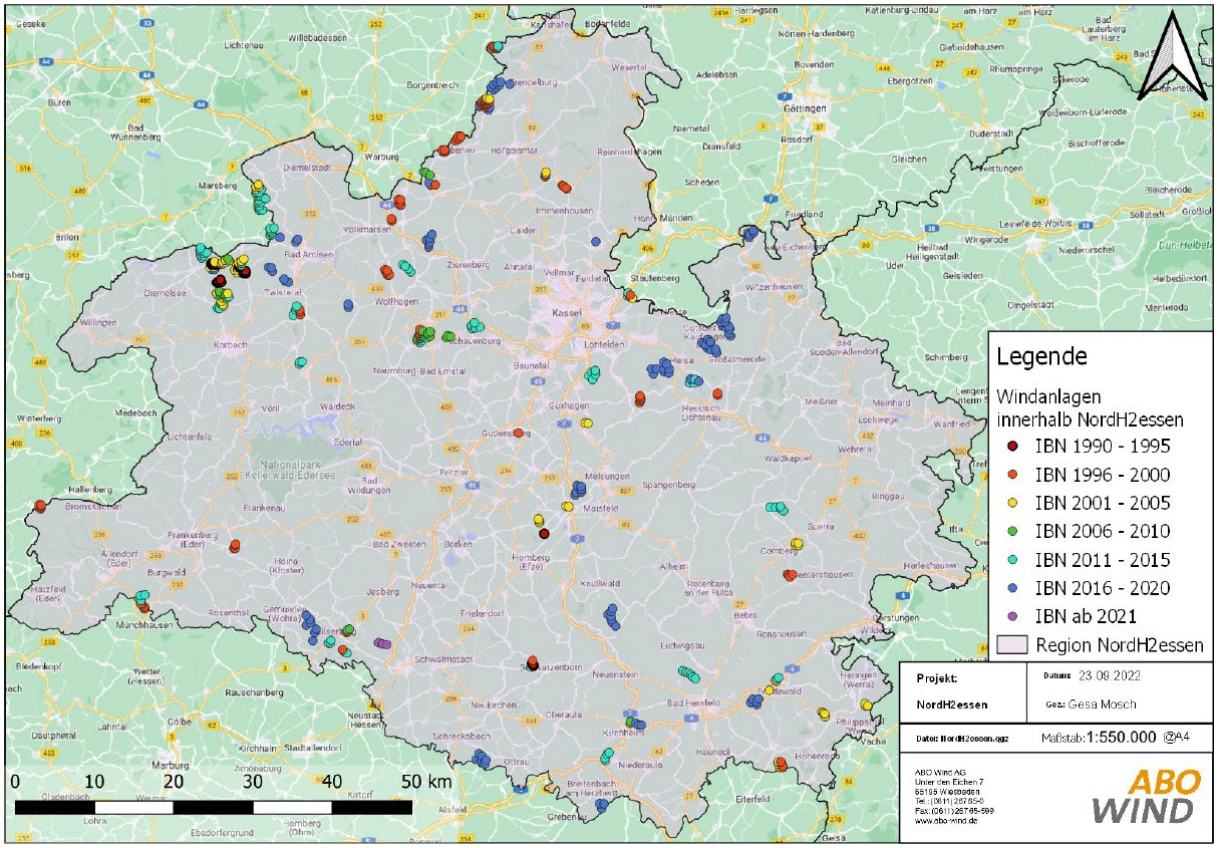


Abbildung 4: Windenergieanlagen innerhalb von Nordhessen (Inbetriebnahme ab 1990) [12]

In Abbildung 5 ist die kumulierte Anzahl der Windenergieanlagen dargestellt, welche ab dem Jahr 2022 bis zum Jahr 2035 aus dem EEG fallen, und deren kumulierte Leistung. Es wird deutlich, dass diese ein signifikantes Potenzial in Hinblick auf eine Wasserstofferzeugung bieten. Im Jahr 2030 sind es beispielsweise 86 Anlagen mit einer Leistung in Höhe von circa 136 MW. Ob ein Weiterbetrieb dieser Anlagen möglich ist, muss in jedem Fall gesondert geprüft werden. Unter anderem aufgrund steigender Instandhaltungskosten ist es möglich, dass es sich nicht lohnt, einzelne Anlagen weiterzubetreiben.

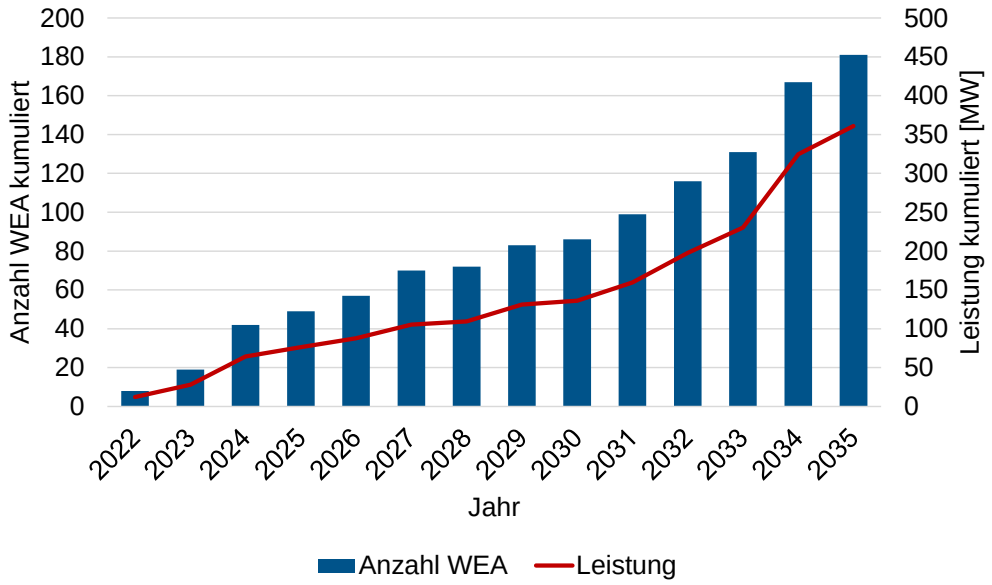


Abbildung 5: Post-EEG-Windenergieanlagen (ab 2022 bis 2035)

2.1.2.2 Potenzial Solar Freiflächen-Photovoltaik

In Nordhessen liegt die Globalstrahlung bei etwa 1.000 bis 1.100 kWh pro m². Das Solarkataster Hessen (www.lea-hessen.de/buergerinnen-und-buerger/sonnenenergie-nutzen) bietet die Möglichkeit, die Energiepotenziale auf Dach- und Freiflächen abzuschätzen. So sind in Nordhessen 902 MW an Solarleistung installiert (Stand November 2022).

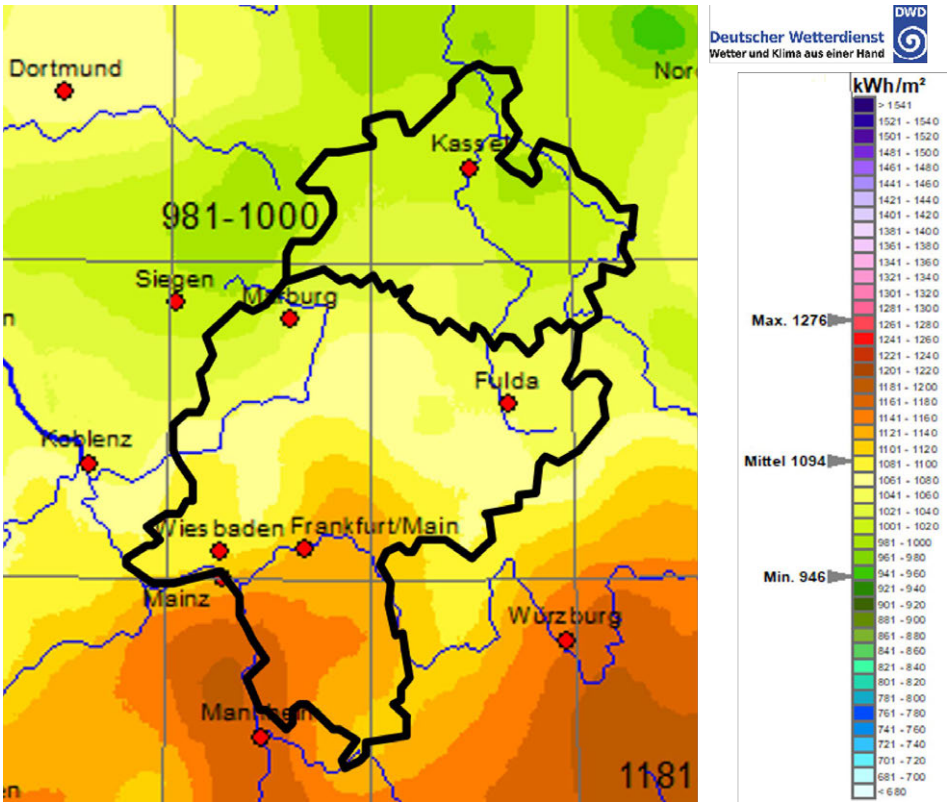


Abbildung 6: Globalstrahlung im Jahr 2021 nach [13]**, eigene Elemente ergänzt**

Gemäß Regierungspräsidium Kassel nehmen die Anfragen für Freiflächen-PV zu. Das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) 2023 ermöglicht die Festvergütung von PV-Anlagen auf landwirtschaftlich benachteiligten Flächen. Das Hessische Energiegesetztes wird überarbeitet und es sollen 1 % der Landesfläche für Freiflächen-PV vorgesehen werden [14].

Für Photovoltaikanlagen (PV) gibt es anders als für Windenergieanlagen keine ausgewiesenen Vorrangflächen. Die Planung bzw. die Bebauung einer freien Fläche mit einer Photovoltaikanlage ist stark abhängig von der Gemeinde, in welcher bzw. dem Ort, an welchem eine Anlage installiert werden soll.

Mittels einer Geoinformationssystem (GIS)-Analyse wurde demnach das rein theoretische Solarpotenzial in der Untersuchungsregion Nordhessen ermittelt. Auf diesen Flächen (im Folgenden Potenzialflächen genannt) könnten potenziell Freiflächen-Photovoltaikanlagen installiert werden.

Es wurden drei Untersuchungsfälle entwickelt – Min-Fall, Mid-Fall und Max-Fall. Für die Flächenanalyse wurde angesetzt, dass die Flächen für PV-Anlagen größer oder gleich 5 ha sein müssen, damit sich wirtschaftlich rechenbare Projekte realisieren lassen. Hierbei ist zu beachten, dass bei allen nachfolgend ermittelten Potenzialflächen topografische Gegebenheiten (Stichwort: Nord- / Südausrichtung) nicht beachtet wurden und die Flächen in dieser Hinsicht einer gesonderten Prüfung bedürfen.

Berücksichtigt wurde bei den Fällen auch das Ertragspotenzial des Bodens gemäß Bodenflächendaten Hessen 1:5.000 für landwirtschaftliche Nutzflächen (BFD5L). Das Ertragspotenzial des Bodens ist abhängig von den natürlichen Ertragsbedingungen, wie der Bodenbeschaffenheit und den klimatischen Verhältnissen. Es beschreibt die bodenbezogenen Potenziale. Diese sogenannte nutzbare Feldkapazität (nFK) eines Bodens ist derjenige Teil der Feldkapazität, welcher für die Vegetation zur Verfügung steht. Sie wird in Millimetern [mm] angegeben in fünf Stufen (1 bis 5) klassifiziert, Tabelle 3 [15]. Die Klassen -4 bis 0 sind Flächen, die kein Ertragspotenzial aufweisen und damit für Freiflächen-PV einbezogen werden.

Tabelle 3: Nutzbare Feldkapazität landwirtschaftliche Nutzflächen [15], [16]

Wert	Klasse	Beschreibung / nutzbare Feldkapazität	Ertragspotenzial
<= -4	-4	Von der Berechnung ausgeschlossen	Nicht bewertet
-3	-3	Von der Berechnung ausgeschlossen	Nicht bewertet
-2	-2	Von der Berechnung ausgeschlossen	Nicht bewertet
> -2 bis 0	0	Ohne Angabe (Fehler)	Nicht bewertet
> 0 bis 50	1	≤ 50 mm	Sehr gering
> 50 bis 90	2	> 50 mm bis ≤ 90 mm	Gering
> 90 bis 140	3	> 90 mm bis ≤ 140 mm	Mittel
> 140 bis 200	4	> 140 mm bis ≤ 200 mm	Hoch
> 200 bis 900	5	> 200 mm	Sehr hoch

Für die Ermittlung der Potenziale für Freiflächen-PV wurden drei Fälle mit unterschiedlichen Bandbreiten bei der Feldkapazität angenommen:

Min-Fall = Die Potenzialflächen mit der Feldkapazität Bewertung 1 bis 5 stehen für PV nicht zur Verfügung, Abbildung 7

Max-Fall = Die Potenzialflächen mit der Bewertung 1 bis 3 stehen für PV zur Verfügung, Abbildung 8

Mid-Fall = Potenzialflächen auf nicht zugewiesenen Flächen gemäß Regionalplan mit Berücksichtigung der Feldkapazität Bewertung 1 bis 5 stehen für PV nicht zur Verfügung, Abbildung 10

Der Mid-Fall unterscheidet sich zu den beiden anderen Fällen darin, dass nur mögliche Flächen aus dem Regionalplan Nordhessen 2009 [17] identifiziert wurden. Alle bereits bebauten, beplanten bzw. für andere Zwecke vorgesehene Flächen (Vorranggebiete und Vorbehaltsgebiete) aus dem Regionalplan wurden entsprechend aus der Betrachtung ausgeschlossen, Abbildung 9, und ein Negativ der danach noch verfügbaren Flächen erstellt wurde, Abbildung 10.

Aus Abbildung 9 geht hervor, dass einen Großteil der Flächen Vorranggebiete für Landwirtschaft ausmachen (türkise Flächen). Laut Regionalplan hat die landwirtschaftliche Bodennutzung in den in der Karte festgelegten „Vorranggebieten für Landwirtschaft“ Vorrang vor anderen Raumansprüchen. „In diesen Gebieten sind Nutzungen und Maßnahmen nicht zulässig, die die landwirtschaftliche Bodennutzung einschließlich Tierhaltung ausschließen oder wesentlich erschweren“ [18]. Dies steht einer Bebauung dieser Flächen mit Freiflächen-

Photovoltaikanlagen entgegen, ein Faktor, der in einem Workshop, welcher im Rahmen des Projekts NordH$_2$essen ausgerichtet wurde, von lokalen Akteuren als Inhibitor beim Ausbau von Wasserstofferzeugungsinfrastruktur genannt wurde, da dies den Ausbau der Solarenergie in Nordhessen ausbremst.

Schließt man also die entsprechend dem Regionalplan 2009 bebauten und beplanten Flächen inkl. aller Vorranggebiete für Landwirtschaft aus, bleiben die in Abbildung 10 abgebildeten Flächen übrig (Mid-Fall). Bei diesen Flächen handelt es sich um solche, welche im Regionalplan keine Zuweisung erhalten haben.

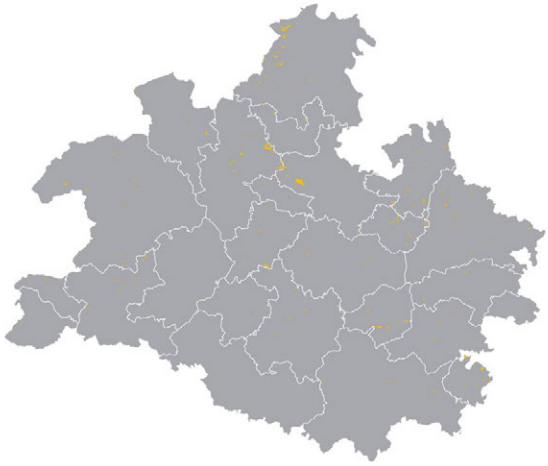


Abbildung 7: Min-Fall - Potenzial Freiflächen-PV auf Landwirtschaftsflächen der Klassen <1

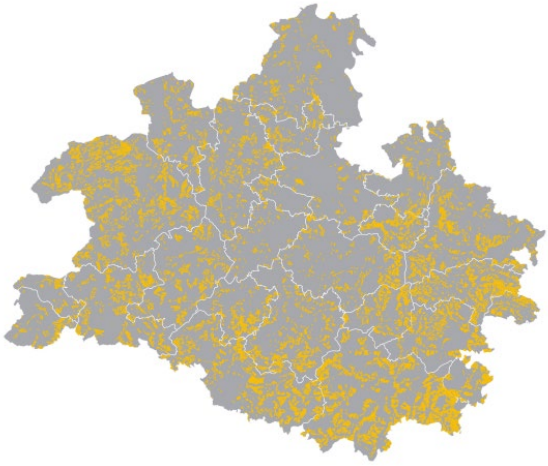


Abbildung 8: Max-Fall - Potenzial Freiflächen-PV zusätzlich auf Landwirtschaftsflächen der Klassen 1 bis 3

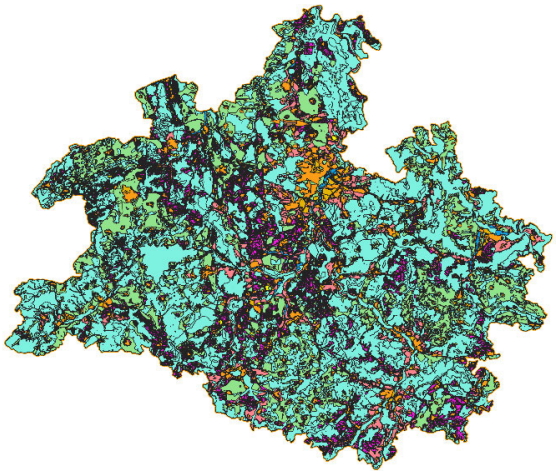


Abbildung 9: Flächen entsprechend dem Regionalplan

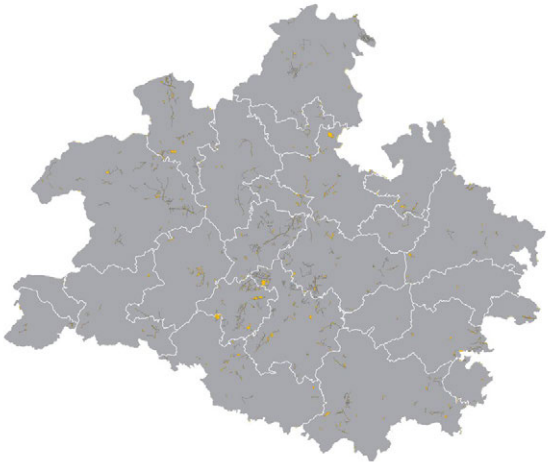


Abbildung 10: Mid-Fall - Potenzial Freiflächen-PV auf nicht zugewiesenen Flächen gemäß Regionalplan

Aus der Potenzialanalyse ergeben sich für den Min-Fall rund 1.800 ha, für den Mid-Fall rund 5.000 ha und für den Max-Fall rund 117.000 ha an Flächenpotenzial für Photovoltaik in Nordhessen, Tabelle 4. Das theoretische, rechnerische Potenzial an Freiflächen-PV-Anlagen beträgt zwischen 3,7 und 244 GW, was sich so nicht realisieren lässt, aber aufzeigt, dass für die Stromerzeugung über Freiflächen-PV ein enormes Potenzial vorhanden ist.

Tabelle 4: Theoretisches Flächenpotenzial Freiflächen-PV

Landkreis	Min-Fall Landwirtschaftsflächen der Klassen <1 [ha]	Mid-Fall nicht zugewiesene Flächen gemäß Regionalplan [ha]	Max-Fall Landwirtschaftsflächen der Klassen 1 bis 3 [ha]
Hersfeld-Rotenburg	255	603	29.038
Kassel (Kreis)	618	863	12.584
Schwalm-Eder-Kreis	140	1.872	23.867
Waldeck-Frankenberg	220	1.117	31.953
Werra-Meißner-Kreis	314	427	19.214
Kassel	232	72	429
Gesamt	*1.780*	*4.955*	*117.086*

Die spezifische Photovoltaikleistung von PV-Modulen in kW peak pro m² liegt bei 0,208 kW/m². Daraus ergeben sich die in aufgeführten theoretischen Leistungen für die drei Fälle.

Tabelle 5: Theoretische Leistung Freiflächen-PV in Nordhessen

Landkreis	Min-Fall Landwirtschaftsflächen der Klassen <1 [MW peak]	Mid-Fall nicht zugewiesene Flächen gemäß Regionalplan [MW peak]	Max-Fall Landwirtschaftsflächen der Klassen 1 bis 3 [MW peak]
Hersfeld-Rotenburg	532	1.257	60.480
Kassel (Kreis)	1.288	1.798	26.210
Schwalm-Eder-Kreis	292	3.899	49.710
Waldeck-Frankenberg	458	2.327	66.550
Werra-Meißner-Kreis	654	889	40.019
Kassel	482	150	894
Gesamt	*3.706*	*10.320*	*243.864*

Es wird empfohlen, dass der Regionalplan so überarbeitet wird, dass er Erzeugern mehr Handlungsspielraum in Bezug auf die Errichtung von Freiflächen-Photovoltaikanlagen ermöglicht. So hat das Land Hessen bereits Ende 2018 die Ländereröffnungsklausel des EEG 2017 in Anspruch genommen [19]. Nach dieser Klausel darf der Aufbau von Freiflächen-Photovoltaik-Anlagen auf benachteiligte landwirtschaftliche Gebiete erweitert werden. Solche benachteiligten landwirtschaftlichen Gebiete zeichnen sich beispielsweise durch schwierige, klimatische Bedingungen und eine Höhenlage von mindestens 800 Metern über N.N. aus. Ferner sind diese Gebiete gekennzeichnet durch eine unterdurchschnittliche Ertragsfähigkeit des Bodens und damit einer mangelnden Wirtschaftlichkeit [20].

Ferner könnte überprüft werden, ob Flächen mit hohem bzw. sehr hohem Ertragspotenzial mittels dem Agri-Photovoltaik-Verfahren genutzt werden können. Agri-Photovoltaik bezeichnet ein Verfahren bei welchem Flächen gleichzeitig für die landwirtschaftliche Pflanzenproduktion

und die Stromproduktion aus Photovoltaik genutzt werden. Auf diese Weise könnte die installierte PV-Leistung in Nordhessen weiter ansteigen.

2.1.2.3 Potenzial Solar Dach-Photovoltaik

Nicht nur Freiflächen- sondern auch Dach-Photovoltaik-Anlagen bieten das Potenzial den Ausbau der Solarenergie voranzutreiben. Der Vorteil besteht darin, dass bereits versiegelte Flächen anstelle von Freiflächen genutzt werden.

Dem Solarkataster Hessen [21] konnten die Solardaten der in Nordhessen ansässigen Gemeinden entnommen werden. Es wurden die potenziellen Flächen von Mehrfamilienhäusern und Häusern der Wohnungswirtschaft (150 bis <800 m²) sowie Gewerbegebäude (>800 m²) betrachtet. Da nicht alle Dachflächen optimal ausgerichtet, statisch nicht geeignet, Teilflächen durch Nachbargebäude verschattet, Dachformen ungünstig oder die Aufwände für eine Installation zu hoch sind, wurde der Ansatz gewählt, dass nur 10 % des im Solarkatasters angezeigten Dachpotenzials nutzbar wäre. Es handelt sich um eine grobe Betrachtung, welche einen ungefähren Anhaltswert des Solarpotenzials auf Dachflächen in Nordhessen liefern soll. So basieren die prognostizierten Ertragswerte auf Wetterdaten, welche sich im Zuge des Klimawandels verändern können. Die Datenlage basiert zudem auf Daten einer Überfliegung der Region zwischen 2007 und 2014. Eine Neuauflage des Solarkatasters mit einer aktualisierten Datenlage ist für 2023 geplant.

Für die Berechnung des freien Potenzials wurden die Bestandsanlagen >30 kW im Marktstammdatenregister recherchiert und von den freien Flächen abgezogen.

Daraus hat sich ergeben, dass in Nordhessen ein Solarpotenzial für Dach-PV-Anlagen in Höhe von ca. 380 ha bzw. 790 MW peak besteht, Tabelle 6.

Tabelle 6: Theoretisches Flächenpotenzial Dach-PV

Landkreis	alle Dachflächen >150m² [4] [ha]	10% Dachflächen >150 m² nutzbar [ha] / [MW peak]
Hersfeld-Rotenburg	863	86 / 180
Kassel (Kreis)	1.443	144 / 301
Schwalm-Eder-Kreis	695	70 / 145
Waldeck-Frankenberg	218	22 / 45
Werra-Meißner-Kreis	300	30 / 62
Kassel	257	26 / 54
Gesamt	*3.777*	*378 / 787*

Neben Dachflächen ergeben auch Fassadenflächen, Überdachungen von Parkplätzen oder Straßen weitere Potenzialflächen, die im Rahmen der Potenzialbetrachtung allerdings nicht für Nordhessen betrachtet wurden. Dies sollte bei der Bewertung von Einzelprojekten näher untersucht werden.

[4] abzüglich Bestandsanlagen >30 kW

2.1.2.4 Müllheizkraftwerk Kassel

Das Müllheizkraftwerk in Kassel ist eine Anlage, die Abfall als Brennstoff nutzt, um Strom und Wärme zu erzeugen. Die Anlage wurde 1968 in Betrieb genommen und ist eine der größten ihrer Art in Deutschland.

Das Prinzip des Müllheizkraftwerks ist einfach: Der Abfall wird in einem Ofen verbrannt, wodurch Wärme entsteht. Diese Wärme wird genutzt, um Wasser zu erhitzen und Dampf zu erzeugen. Der Dampf treibt dann Turbinen an, die wiederum Generatoren antreiben, um Strom zu erzeugen. Die anfallende Wärme wird zur Versorgung von Fernwärmenetzen genutzt.

Das Müllheizkraftwerk in Kassel verarbeitet jährlich etwa 200.000 Tonnen Hausmüll und Gewerbeabfälle aus der Region. Dadurch können etwa 20.000 Haushalte à 4 Personen mit Strom versorgt werden. Ein weiterer Vorteil des Müllheizkraftwerks in Kassel ist die Gewinnung von Fernwärme. Die erzeugte Wärme wird über ein 174 km langes Fernwärmenetz an Haushalte und Unternehmen in der Umgebung verteilt. Dadurch wird auch hier eine klimafreundliche Energieversorgung ermöglicht.

Insgesamt ist das Müllheizkraftwerk in Kassel ein wichtiger Bestandteil der Energieversorgung in der Region. Durch die Nutzung von Abfall als Brennstoff wird eine erneuerbare und umweltfreundliche Energieversorgung ermöglicht. Gleichzeitig wird auch ein wichtiger Beitrag zur Abfallwirtschaft und zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen geleistet.

Am Müllheizkraftwerk in Kassel gibt es derzeit keine konkreten Pläne, Wasserstoff mit Überschussstrom zu erzeugen. Dies wäre in der Theorie zwar möglich, jedoch ist es wenig zielführend, den erzeugten Strom zur H_2-Erzeugung zu nutzen, solange das Kraftwerk feste Stromabnahmeverträge hat.

2.1.2.5 Biomasse

Wasserstoff aus Biomasse ist eine vielversprechende Option für eine nachhaltige und erneuerbare Energiequelle. Die Herstellung von Wasserstoff aus Biomasse bietet zahlreiche Vorteile. Zum einen handelt es sich um eine erneuerbare Energiequelle, die nicht von fossilen Brennstoffen abhängig ist. Zum anderen können auch Abfälle und Reststoffe aus der Landwirtschaft als Rohstoffe genutzt werden, was zu einer Reduktion von Abfall und damit auch von Treibhausgasemissionen beiträgt.

Es ist immer zu prüfen, ob eine Bewirtschaftung von Feldern mit dem Ziel der Wasserstoffproduktion sinnvoll erscheint. Bezieht man den Wirkungsgrad der pflanzlichen Photosynthese in die Berechnung des Gesamtwirkungsgrades mit ein, verringert sich die Effizienz der Wasserstoffproduktion doch sehr stark. Anders sieht es bei der Verwertung von biologischen Abfällen, Schnittgut oder Gartenabfällen aus, welche ohne eine gezielte Bewirtschaftung von Flächen anfallen und bei denen die Verwertung zur Wasserstofferzeugung eine Alternative zur etablierten Entsorgungswegen sein könnte, [22].

Tabelle 7: Biomasse aus Biotonne und biologisch abbaubare Garten und Parkabfälle in Nordhessen

Landkreis	Bioabfälle [t/a]	Gartenabfälle [t/a]	Summe [t/a]
Hersfeld-Rotenburg	12.273	5.766	18.039
Kassel (Kreis)	12.239	12.598	24.837
Schwalm-Eder-Kreis	9.458	21.983	31.441
Waldeck-Frankenberg	26.065	k.A.	26.065
Werra-Meißner-Kreis	10.685	1.171	11.856
Kassel	45.012	9.106	54.118
Gesamt	***115.732***	***50.624***	***166.356***

Der Biogasertrag von Bioabfällen kann mit rund 100 Nm³ je Tonne Biomasse angenommen werden [23].

Mittels Biogas-Reformierung, Vergasung, Methanplasmalyse, Pyrolyse sowie Fermentation kann aus Biomasse Wasserstoff erzeugt werden, wobei erstere Maßnahme die momentan gängigste Methode darstellt. Derzeit ist es jedoch weitaus effizienter den aus Biomasse gewonnenen Energieträger Biogas in Blockheizkraftwerken direkt zu verstromen. Hinzu kommt, dass diese Art der Strombereitstellung grundlastfähig ist und auch während der sogenannten „Dunkelflaute“ (wenig bis keine Strombereitstellung aus Wind- und PV-Anlagen) regenerativen Strom liefert.

Das Verfahren der Biogasreformierung ist analog der Erdgasreformierung dadurch gekennzeichnet, dass der methanreiche Gasstrom mit Wasserdampf zu Kohlenmonoxid und Wasserstoff umgewandelt wird. Das so entstandene Synthesegas wird weiter aufbereitet (Wassergas-Shift-Reaktion), gereinigt und getrocknet. Die erforderliche Wärme, die für den Prozess benötigt wird, kann durch Biogas oder andere methanhaltige Gase aufgebracht werden. Schwefel- und Chlorverbindungen müssen als Katalysatorgifte entfernt werden. Um die Biogasreformierung für die Wasserstofferzeugung in Betracht zu ziehen, muss am Standort des Konversionsverfahrens genug Ausgangsmaterial, also Biogas, vorhanden sein. In der Chemie ist dieses Verfahren für die Wasserstoffherstellung aus Erdgas das häufigste und etablierteste Verfahren und kann mit einem Technology Readiness Level (TRL) von >9 eingestuft werden. Für Biogas liegt der TRL allerdings bei 6 bis 8. [24]

Methanplasmalyse oder -pyrolyse sind Verfahren, bei denen bei hohen Temperaturen Methan in Wasserstoff und festen Kohlenstoff gespalten werden. Die beiden Verfahren unterscheiden sich nur in der Zufuhr der Energie und den Temperaturen. Die Verfahren sind für Erdgas in kleinen Anlagen erprobt, wobei die Methanpyrolyse noch einen erhöhten Forschungsbedarf aufweist. Für beide Verfahren muss aus Biogas erst Biomethan gewonnen werden, so dass eine industrielle Verbreitung erst erfolgen wird, wenn Biogas in großen Mengen verfügbar ist.

Bei der Herstellung von Wasserstoff durch Biomassevergasung wird Biomasse wie beispielsweise Holz, Stroh oder Reststoffe aus der Landwirtschaft in einem geschlossenen System unter Sauerstoffmangel erhitzt. Dabei entsteht ein synthetisches Gas, das hauptsächlich aus Wasserstoff, Kohlenmonoxid und Kohlendioxid besteht. Durch eine weitere Gasaufbereitung und Reinigung kann aus diesem Gas Wasserstoff gewonnen werden. Veränderte Biomassezusammensetzungen haben erheblichen Einfluss auf die Gasqualität und damit auf die Gasaufbereitung. Für fossile Festbrennstoffe ist die thermochemische Vergasung und Gasaufbereitung etabliert und weltweit erprobt. Die Vergasung von Biomassen ist in verschiedenen Demonstrationsprojekten mit unterschiedlichen Anlagengrößen

untersucht, aber der Dauerbetrieb von Anlagen und die Kommerzialisierung der Gesamtkette stehen noch aus.

Ein weiterer Ansatz zur Herstellung von Wasserstoff aus Biomasse ist die biologische Wasserstoffproduktion aus Licht und CO_2. Hierbei nutzen Mikroorganismen wie beispielsweise Cyanobakterien oder Algen die Photosynthese, um Wasserstoff zu produzieren. Die Verfahren sind noch im Entwicklungsstand und daher kommerziell nicht verfügbar.

In Verbindung mit Biomasse kann die Elektrolyse zur Herstellung von Wasserstoff aus nachwachsenden Rohstoffen eingesetzt werden. Hierbei wird die Biomasse in einem ersten Schritt zur Gewinnung von Biogas genutzt. Das Synthesegas wird anschließend in einem Blockheizkraftwerk oder einer Gasturbine in elektrische Energie umgewandelt, so dass damit die Elektrolyseanlage zur Wasserstoffgewinnung betrieben wird. Diese Kombination kommt erst zum Tragen, wenn der Strom aus der Biogasverstromung nicht sinnvoller vermarktet werden kann.

In der Region Nordhessen konnten entsprechend dem Marktstammdatenregister 274 Biomasseanlagen[5] mit einer elektrischen Gesamtleistung von 91,3 MW identifiziert werden [7]. Bis zum 01.01.2028 fallen insgesamt 72 der sich aktuell in Betrieb befindlichen Biomasseanlagen aus der Förderung. Diese haben eine Gesamt-Nettoleistung von 66 MW. Bei der Betrachtung der Biogasaufkommen anhand der jährlich erzeugten Mengen (2.500 m^3 Biogas pro Jahr und pro kW installierter Leistung [25]) ist von den bis zum 01.01.2028 aus der Förderung fallenden Anlagen lediglich ein Standort von größerem Interesse, um wirtschaftlich betrieben werden zu können. Dabei handelt es sich um mehrere Biogaserzeugungsanlagen in Volkmarsen, welche räumlich dicht genug beisammen liegen, um eine gemeinsame Nutzung des Biogasaufkommens von verschiedenen Anlagen in einer Konversionsanlage zu realisieren.

In Nordhessen gibt es nutzbare Biomassepotenziale, deren wirtschaftliche und auch sinnvolle Umsetzung aber stets von verschiedenen Faktoren abhängig sein wird. Hierbei spielen die lokale Verfügbarkeit von Biomasse, die Anbindung an und Integration in eine Infrastruktur zur Nutzung des Wasserstoffes, sowie die Kosten der zur Verfügung stehenden Technologien die größte Rolle. Bei direkt in Konkurrenz stehenden Produkten wie Biowasserstoff und Biogas muss neben wirtschaftlichen und infrastrukturellen Aspekten ebenso die CO_2-Einsparung und die Treibhausgasbilanz bewertet werden. Mit Biomasse als einziger Lieferant von erneuerbarem Kohlenstoff ist stets abzuwägen, ob die Erzeugung von Biowasserstoff einer Bereitstellung von komplementären Kohlenstoffverbindungen vorzuziehen ist.

Laut dem Deutschen Biomasseforschungszentrum Report Nr.46 „Wasserstoff aus Biomasse“ gibt es „per se keine Vorteilhaftigkeit von grünem Wasserstoff aus Elektrolyse gegenüber Biowasserstoff“ [24]. Sollte sich der CO_2-Preis und analog dazu die Wirtschaftlichkeit beim Betrieb von Biowasserstofferzeugungsanlagen erhöhen sowie die Reifung von sich derzeit in Entwicklung befindlichen technologischen Verfahren und die damit einhergehende Senkung der spezifischen Investitionskosten verringern, so kann sich dies perspektivisch positiv auf eine Implementierung dieser Verfahren auswirken.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass Biowasserstoff unter dem Aspekt der Technologieoffenheit, in einem Gesamtkonzept als Wasserstoff-Erzeugungskapazität mitgedacht werden sollte. Für Nordhessen kommen aktuell nur wenige dezentral gelegene

[5] hier BHKW, Methanerzeuger, Hackschnitzelkraftwerke und Biogasanlagen

Einzelfallbetrachtungen in Frage, welche in Los 3 aufgeführten Steckbriefen ausführlicher beschrieben werden.

2.1.2.6 Klärschlamm

Bei der Abwasserreinigung bleibt Klärschlamm zurück, aus welchem beim Ausfaulen sogenanntes Faulgas gewonnen wird. Der Methananteil des Faulgases wird in einem Blockheiz-kraftwerk wiederum zur Wärme- bzw. Stromerzeugung genutzt. Mit dem erzeugten Strom kann mittels Elektrolyse Wasserstoff erzeugt werden. Vorteilhaft daran ist, dass der bei der Elektrolyse anfallende Sauerstoff und die anfallende Abwärme direkt vor Ort in der Kläranlage genutzt werden können. Laut dem Lagebericht 2020 des Hessischen Ministeriums für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz zur Beseitigung von kommunalen Abwässern in Hessen gibt es in der Betrachtungsregion 243 Abwasserreinigungsanlagen, Tabelle 8 [26].

Tabelle 8: Anzahl Kläranlagen und anfallende Klärschlammmengen in Nordhessen [26], [27]

Landkreis	Anzahl Kläranlagen	Anschlussgröße [EW[6]]	Klärschlammmenge [t TM/a[7]]
Hersfeld-Rotenburg	41	172.149	1.683
Kassel (Kreis)	37	232.115	2.803
Schwalm-Eder-Kreis	69	224.143	3.295
Waldeck-Frankenberg	61	259.776	2.239
Werra-Meißner-Kreis	34	129.585	2.490
Kassel	1	340.000	4.519
Gesamt	*243*	*1.357.768*	*17.029*

Da der aus dem Faulgas erzeugte Strom jedoch in der Regel zunächst für die Deckung des eigenen Energiebedarfs der Kläranlage genutzt wird, ist die Voraussetzung für die Herstellung von Wasserstoff mittels Elektrolyse ein konstanter Überschuss an Strom durch die Faulgasverstromung.

In der Kläranlage des Abwasserzweckverbands Kempten in Bayern fällt bereits seit 2017 ein konstanter Überschuss an Strom an. Mit einer Reihe weiterer Maßnahmen soll zukünftig noch mehr Strom erzeugt und mittels dieses Wasserstoffs erzeugt werden [28].

Eine weitere Methode zur Erzeugung von Wasserstoff aus Faulgas ist die Dampfreformierung. Auch in diesem Fall muss geklärt werden, ob bzw. wie viel überschüssiges Faulgas an den Kläranlagen in Nordhessen zur H_2-Erzeugung zur Verfügung steht.

Ein entscheidender Vorteil, mit der Dampfreformierung aus Faulgas Wasserstoff herzustellen anstatt mit einer Elektrolyse, ist, dass das Faulgas direkt in Wasserstoff umgewandelt werden kann und nicht zunächst in Strom und daraufhin in Wasserstoff. Es entstehen weniger Verluste durch die einmalige Energieumwandlung bei der Dampfreformierung als durch die zweifache

[6] EW = Einwohner

[7] TM = Trockenmasse

Energieumwandlung bei der Faulgasverstromung und Elektrolyse. Der Wirkungsgrad ist somit höher. Ein Nachteil bei der Dampfreformierung mit Faulgas im Gegensatz zur Dampfreformierung mit Erdgas ist jedoch, dass das Faulgas zunächst aufbereitet werden muss, um ein Produktgas mit Erdgasqualität zu erzeugen, dessen Hauptbestandteil Methan ist, wobei Faulgas zu ca. 65 Vol.% aus Methan und ca. 35 Vol.% aus Kohlenstoffdioxid besteht.

Die Dampfreformierung von Faulgas wurde am Klärwerk der Emschergenossenschaft in Bottrop in einem Pilotvorhaben von 2008 bis 2012 angewandt. Zunächst wurde Bioerdgas hergestellt und ein Teilstrom davon zu Wasserstoff aufbereitet. Der Wasserstoff wurde über eine 1 km lange Leitung zu einem Blockheizkraftwerk geführt und zur Strom- und Wärmeerzeugung genutzt. [29]

2.1.3 Wasserstoffpotenzial Nordhessen

Auf Basis der Potenziale von Windenergieanlagen, Frei- und Dachflächen für Photovoltaikanlagen wurden die theoretischen Wasserstofferzeugungspotenziale aus den beiden Energiequellen Wind und Solar berechnet. Für die Berechnung wurde angesetzt, dass 25 % der freien Windvorrangflächen und 10 % der ermittelten Frei- und Dachflächen genutzt werden. Dieser Ansatz wurde gewählt, weil nicht alle Flächen erschlossen werden können. Gründe können in nicht so optimalen Bedingungen hinsichtlich Ausrichtung, Zugänglichkeit, Eigentumsverhältnissen, Genehmigungsfähigkeit, vorhandener Infrastruktur etc. liegen.

Aufgrund der schwankenden Verfügbarkeit der erneuerbaren Energien kann über das Jahr nicht die Peak-Leistung der EE-Anlage für die Auslegung des Elektrolyseurs herangezogen werden, Abbildung 11. Photovoltaikanlagen erreichen aufgrund der saisonalen Gegebenheiten in den Sommermonaten die höchste Anzahl an Betriebsstunden, während Windenergieanlagen einen Großteil des Stroms in den Herbst- und Wintermonaten bereitstellen. Ein entsprechend ausgelegter Wasserstoffspeicher nimmt Schwankungen in der Erzeugung auf, so dass ein maximaler Wasserstoff-Output erreicht wird. Für die Kalkulation des Wasserstoffpotenzials aus Photovoltaik- bzw. Windenergieanlagen wurde mit dem Ansatz aus Abbildung 11 unabhängig von PV- oder Windenergie für die Elektrolyseleistung 30 % der Leistung der erneuerbaren Energieanlage (PV oder Wind) angesetzt.

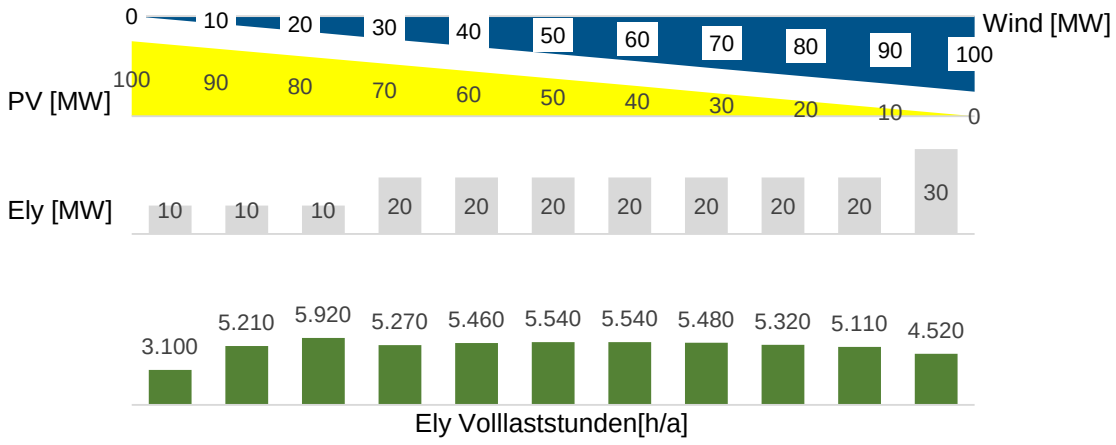


Abbildung 11: Volllaststunden Elektrolyseanlage (Ely) in Abhängigkeit Anteil PV- bzw. Windenergie, in Anlehnung an [30]

Für die Berechnung der potenziellen Wasserstoffmengen aus den verschiedenen Energieträgern wurden zusätzlich noch Jahresganglinien genutzt, Abbildung 12. Daraus ergeben sich etwa 2.200 Volllaststunden der Elektrolyse mit Wasserstofferzeugung aus PV-Anlagen und etwa 4.500 Volllaststunden aus Windenergieanlagen. Zwar wäre die Volllaststundenzahl höher bei 10 % der Leistung der Elektrolyse von der Leistung der Photovoltaikanlage, aber dafür die absolute Menge an erzeugtem Wasserstoff niedriger. Bei der Auslegung der finalen Größe einer zu realisierenden Elektrolyseanlage sind verschiedene Parameter heranzuziehen, um die wirtschaftlich sinnvolle Größe zu bestimmen.

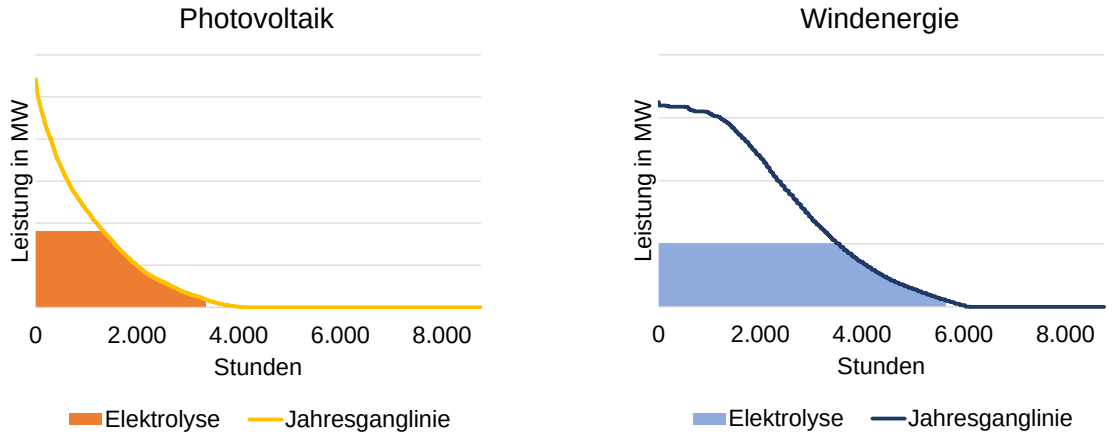


Abbildung 12: Geordnete Jahresganglinien Wind- und PV-Erzeugung mit Elektrolyse

Die ermittelten Leistungen sind in Tabelle 9 und die daraus möglichen Wasserstoffmengen in Abbildung 13 bzw. im Anhang in Tabelle 44 aufgeführt. Daraus ergibt sich ein Potenzial von 19,6 bis 309,1 kt an Wasserstoff pro Jahr, das allein aus diesen beiden Quellen in der Region erzeugt werden könnte. Mit dieser Menge könnten je nach Ausbau zwischen rund 2.500 und 41.000 Lkw mit Wasserstoff versorgt werden[8], Tabelle 45. Zum Vergleich, am 01.01.2022 waren gemäß Kraftfahrtbundesamt etwa 39.000 Lkw in den sechs nordhessischen Kreisen zugelassen [31].

Tabelle 9: Elektrische Leistung potenzieller Anlagen Wind und PV zur Wasserstofferzeugung

Landkreis	Wind [MW]	PV Freiflächen			PV Dach-flächen [MW]
		min. [MW]	mid. [MW]	max. [MW]	
Hersfeld-Rotenburg	45	53	126	6.048	180
Kassel (Kreis)	67	129	180	2.621	301
Schwalm-Eder-Kreis	45	29	390	4.971	145
Waldeck-Frankenberg	62	46	233	6.655	46
Werra-Meißner-Kreis	17	65	89	4.002	63
Kassel	0	48	15	89	54
Gesamt	***235***	***371***	***1.032***	***24.386***	***789***

[8] 12 kgH_2/100 km, 250 km/Tag, 250 Tage/Jahr

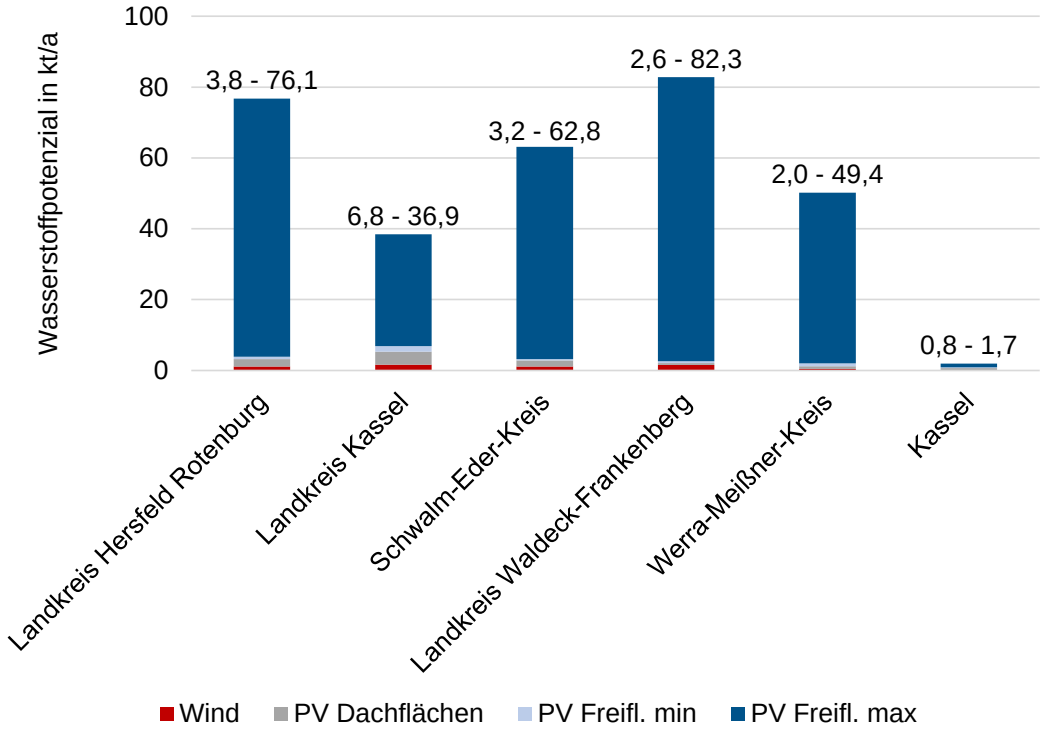


Abbildung 13: Theoretisches Wasserstoffpotenzial aus Wind und PV in Nordhessen

2.1.4 Wasserstofferzeugung in anderen HyLand-Projekten

Aufgrund der räumlichen Nähe wurden bezüglich einer gemeinsamen Wasserstofferzeugung mit anderen HyLand-Projekten die Regionen Fulda (HYWHEELS), Frankfurt (MH_2Regio) und Ostwestfalen-Lippe (HyDrive OWL) näher betrachtet, welche in der ersten Runden des HyExperts Wettbewerbs 2020-2021 als Wasserstoff-Regionen ausgewählt wurden. Die H_2 Region Wartburg Hainich ist Teilnehmer der Machbarkeitsstudie HyExperts II 2022-2023 und grenzt an die Region Nordhessen. Hier können gemeinsame Potenziale für Wasserstofferzeugung und -nutzung entstehen, wenn die Ergebnisse aus diesem Projekt vorliegen.

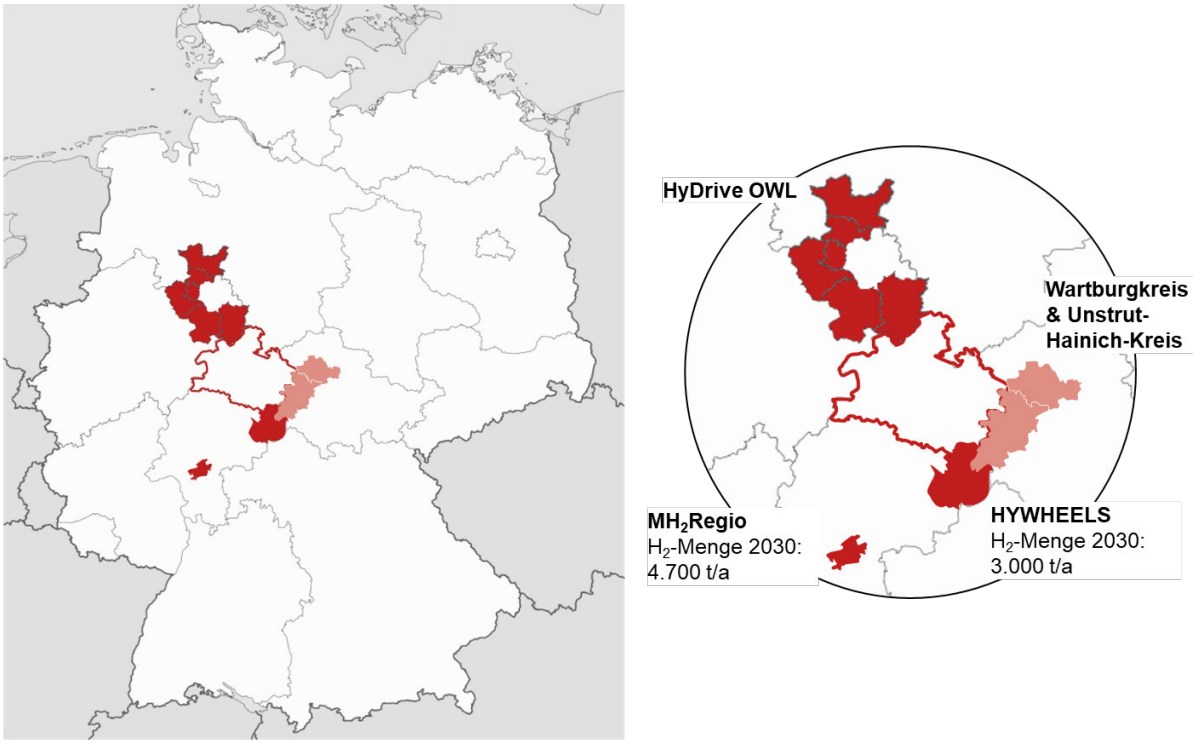


Abbildung 14: Wasserstoffhochlauf für die Regionen Fulda, Frankfurt und Ostwestfalen-Lippe

Im Rahmen der Studie HYWHEELS wurde erarbeitet, dass der Wasserstoffbedarf in Osthessen bis 2030 auf 3.000 Tonnen ansteigen wird. Es wird außerdem davon ausgegangen, dass der Durchgangsverkehr zu einem zusätzlichen Wasserstoffbedarf in Höhe von 800 bis 7.500 Tonnen im Jahr 2030 führen wird [32]. Für die Stadt Frankfurt wurde im Rahmen der Studie MH2Regio ein Wasserstoffbedarf in Höhe von circa 4.700 Tonnen im Jahr 2030 für den Liefer- und Schwerlastverkehr sowie die Binnenschifffahrt vorausgesagt [33]. Für die Region Ostwestfalen-Lippe wurden keine Zahlen gefunden.

2.1.5 HYWHEELS

Im Landkreis Fulda wurden im Rahmen der Studie HYWHEELS fünf potenzielle H_2-Tankstellenstandorte identifiziert, Abbildung 15. Mit den identifizierten Standorten für Tankstellen gehen außerdem Flächen für Windenergie- und Photovoltaik-Anlagen für eine lokale Wasserstoffproduktion mittels Elektrolyse einher. Ferner wurden vier Auslegungsvarianten für die Wasserstofftankstellen (Größe S bis XL) erarbeitet, welche es erlauben, täglich bis zu 109 Lkw zu betanken. Alle identifizierten H2-Tankstellenstandorte eignen sich flächenmäßig für den Aufbau der vier Auslegungsvarianten [32].

Die Standorte Michelsrombach und Fulda Nord befinden sich am nächsten zur Betrachtungsregion Nordhessen, genauer gesagt zum Landkreis Hersfeld-Rothenburg, im Süden Nordhessens. Derzeit plant die ABO Wind AG Windenergieanlagen und eine Wasserstofftankstelle für Lkw und Busse am Standort Michelsrombach zu errichten [34]. Davon könnte auch der in circa 30 Kilometer entfernt liegende Logistikstandort Bad Hersfeld und die Nachbargemeinden Ludwigsau, Bebra, Friedewald, Hauneck, Niederaula und Neuenstein im Süden des Landkreises Hersfeld-Rothenburg profitieren. Die Gemeinden bilden mit dem nahe gelegenen Autobahndreieck Kirchheim ein wichtiges Logistikzentrum in Hersfeld-Rothenburg, an welchem neben kleineren Logistikunternehmen unter anderem zwei Logistikzentren des Internetversandhauses Amazon angesiedelt sind.

Abbildung 15: Potenzielle Standorte für H_2-Tankstellen im Landkreis Fulda

2.1.6 HyDrive OWL

Die Potenzialanalyse des Projekts HyDrive OWL hat ergeben, dass sich besonders der in der Müllverbrennungsanlage Bielefeld erzeugte Strom zur Erzeugung von Wasserstoff mittels Elektrolyse eignet. Aufgrund der Bereitschaft dort einen Produktionsstandort von Wasserstoff aufzubauen, wird die Anlage als Vorreiteranlage für einen Wasserstoffhochlauf in der Region gesehen [35]. Jedoch gibt es auch hier Hürden, die zunächst gemeistert werden müssen: so wird die Erzeugung von Wasserstoff immer in Konkurrenz zur direkten Nutzung des Stroms stehen. Positiv ist zu sehen, dass „oranger Wasserstoff“, der unter Verwendung von Strom aus Müllverbrennungsanlagen erzeugt wird, neben „grünem Wasserstoff“ ebenfalls auf die Treibhausgasminderungsquote[9] anrechenbar sein soll. Dies dürfte Müllverbrennungsanlagenbetreibern wiederum mehr Planungssicherheit beim Aufbau einer eigenen Wasserstofferzeugung am Standort verleihen.

Bielefeld befindet sich etwa 80 Kilometer von der Landesgrenze Nordhessens und 130 Kilometer von der Stadt Kassel entfernt. Ob und inwiefern ein Transport des dort erzeugten Wasserstoffs via Wasserstoff-Trailer bzw. auch zukünftig über das Gasnetz aufgrund der Entfernung sinnvoll und möglich ist – auch in wirtschaftlicher Hinsicht – muss gesondert überprüft werden.

[9] Die Treibhausgasminderungsquote ist ein seit dem Jahr 2015 in Deutschland gesetzlich normiertes marktbasiertes Klimaschutz-Instrument, das darauf abzielt, mehr erneuerbare Energien in den Verkehrssektor einzubringen und dadurch klimaschädliche Treibhausgas-Emissionen zu reduzieren. Die THG-Quote ersetzte die Biokraftstoffquote, die bis Ende 2014 galt.

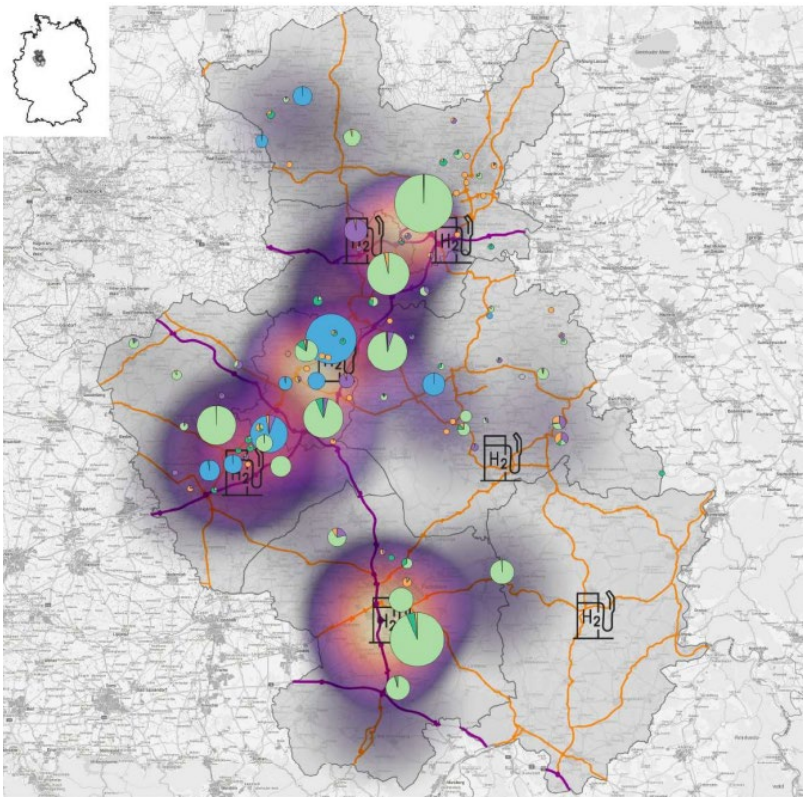


Abbildung 16: Potenzielles H_2-Tankstellennetz in Ostwestfalen-Lippe [35]

Zur Deckung des Wasserstoffbedarfs potenzieller Anwender in der Region soll ein sukzessiver Aufbau von Wasserstofftankstellen an sieben Standorten erfolgen [35]. Zielgerichtet und verbrauchernah soll ein Großteil der Tankstellen an den Autobahnen A33 Richtung Bielefeld, an der A2 Richtung Hannover bzw. Dortmund sowie entlang der A30 Richtung Osnabrück aufgebaut werden, Abbildung 16. Für Logistikunternehmen aus Nordhessen, welche Routen in den Nord bzw. Osten Deutschlands haben, könnte dies zukünftig eine wichtige Rolle spielen.

2.1.7 MH_2Regio

Auch das Projekt MH2Regio hat sich mit einer Wasserstofferzeugung an einer Müllverbrennungsanlage beschäftigt. Dabei handelt es sich um das grundlastfähige Müllheizkraftwerk in der Frankfurter Nordweststadt. Der erzeugte Dampf wird zur Erzeugung von Strom und Fernwärme eingesetzt, wobei der Strom derzeit ins öffentliche Netz eingespeist wird. Der mittels Elektrolyse erzeugte Wasserstoff soll mit Trailerfahrzeugen zu den Tankstellen nahe der Wasserstoffanwender transportiert werden.

Abbildung 17: Potenzielle H_2-Tankstellen im Großraum Frankfurt [33]

Im Rahmen der Studie wurden fünf Tankstellenstandorte im Rhein-Main-Gebiet identifiziert, Abbildung 17:

1. Betriebshof MHKW Nordweststadt
2. Geplanter Bus-Betriebshof Lorscher Str.
3. Osthafen
4. Flughafen Frankfurt a.M.
5. Shell Tankstelle Niederrad

Bei den Betriebshof-Tankstellen 1 und 2 kann davon ausgegangen werden, dass eine öffentliche Betankung von betriebsfremden Fahrzeugen hier nicht möglich ist. Die externen Tankstellen, vor allem Tankstelle 3 nahe der A661 und Tankstelle 4 am Autobahnkreuz A3/A5, könnten eine Betankungsmöglichkeit für H_2BZ-Fahrzeuge von Logistikern und Spediteuren aus Nordhessen mit Routen in den Südosten Deutschlands darstellen [33].

2.1.8 Wartburgkreis und Unstrut-Hainich-Kreis

Der Wartburgkreis im Zusammenschluss mit dem Unstrut-Hainich-Kreis ist – genau wie die Region Nordhessen – einer der Gewinner der zweiten HyExperts Runde im Rahmen des Bundesförderprogramms HyLand des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr. Die beiden Regionen haben die Erarbeitung eines Gesamtkonzepts zu den Potenzialen einer regionalen, grünen Wasserstoffwirtschaft zum Ziel. Ergebnisse liegen zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichts noch nicht vor. Synergien bei der Wasserstoffversorgung bzw. der Verteilung könnten sich aufgrund der räumlichen Nähe für die beiden Regionen und Nordhessen ergeben. Dies muss zu einem späteren Zeitpunkt gesondert geprüft werden.

2.1.9 Clusterbildung von potenziellen Erzeugungsstandorten

Photovoltaikanlagen erreichen aufgrund der saisonalen Gegebenheiten in den Sommermonaten die höchste Anzahl an Betriebsstunden, während Windenergieanlagen einen Großteil des Stroms in den Herbst- und Wintermonaten bereitstellen. Durch eine Kombination dieser beiden Energieformen lässt sich die Strombereitstellung im Jahresverlauf glätten, Abbildung 18.

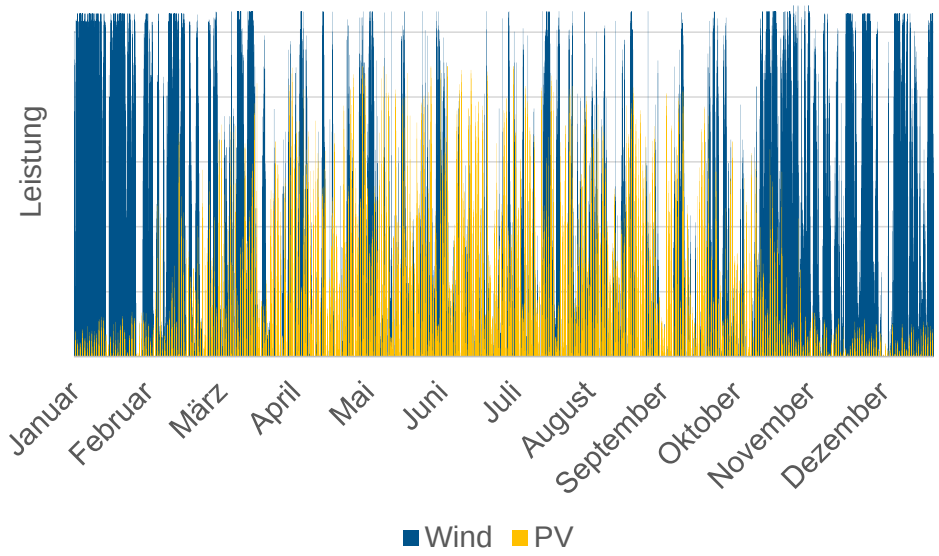


Abbildung 18: Erzeugungsprofil Wind und Solar kombiniert

Dies führt zu einer höheren Auslastung eines Elektrolyseurs mit Strom aus erneuerbaren Energien, was wiederum für den wirtschaftlichen Betrieb einer Elektrolyse sinnvoll ist. Aus diesem Grund wurden in dieser Studie in einem nächsten Schritt freie Windvorranggebiete und freie Flächen für Freiflächen-Photovoltaikanlagen gemäß den drei Fällen aus Kapitel *Potenzial Solar Freiflächen-Photovoltaik* übereinandergelegt, um Erzeugungscluster zu identifizieren.

Min-Fall =	Windenergie plus Freiflächen-PV, die Potenzialflächen mit der Feldkapazität Bewertung 1 bis 5 stehen für PV nicht zur Verfügung
Max-Fall =	Windenergie plus Freiflächen-PV, die Potenzialflächen mit der Bewertung 1 bis 3 stehen für PV zur Verfügung
Mid-Fall =	Windenergie plus Freiflächen-PV, Potenzialflächen auf nicht zugewiesenen Flächen gemäß Regionalplan mit Berücksichtigung der Feldkapazität Bewertung 1 bis 5 stehen für PV nicht zur Verfügung

Für die Cluster-Bildung wurden zuerst folgende Kriterien angesetzt:

Berücksichtigung von PV-Freiflächen größer 5 ha – Ab dieser Größe kann mit einem wirtschaftlichen Betrieb von PV-Anlagen gerechnet werden.

- Radius um eine Anlage 5 km – Wenn ein Netzanschluss erforderlich wird, muss eine Anbindung in einem bezahlbaren Rahmen erfolgen. Eine detaillierte Einschätzung muss bei einer konkreten Projektplanung erfolgen und kann durchaus von der Annahme abweichen.

Filterung auf eine Leistung Windenergie innerhalb der Kreise von >12 MW, so dass mindestens 3 Windenergieanlagen für eine Elektrolyseanlage vorgesehen sind.

Mind. 30% der Leistung der Windenergie muss als PV-Leistung vorhanden sein, so dass eine sinnvolle Kombination erfolgen kann.

Anschließend wurden die identifizierten einzelnen Kreise mit Hilfe eines K-Mean Algorithmus geclustert (https://de.wikipedia.org/wiki/K-Means-Algorithmus). Aufgrund der Zunahme verfügbarer Flächen vom Min-Fall über Mid-Fall zum Max-Fall wurde jeweils eine Anzahl an zu erzeugenden Clustern definiert und auf die Größe der einzelnen Cluster optimiert. Beim Min-Fall wurde als Anzahl 10, beim Mid-Fall 14 und beim Max-Fall 15 festgelegt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 19 bis Abbildung 21 zu sehen.

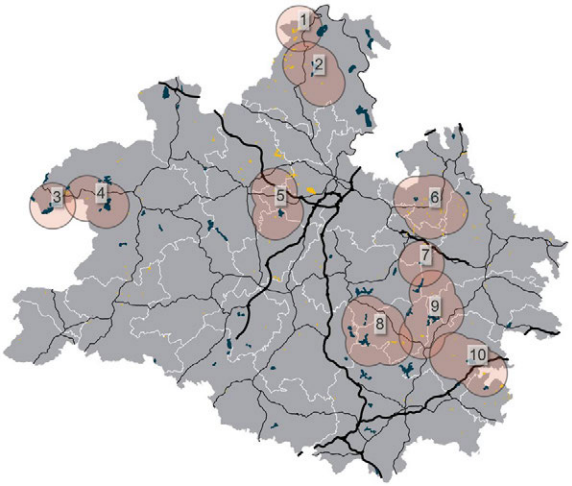


Abbildung 19: Erzeugungscluster Wind und Solar - Min-Fall

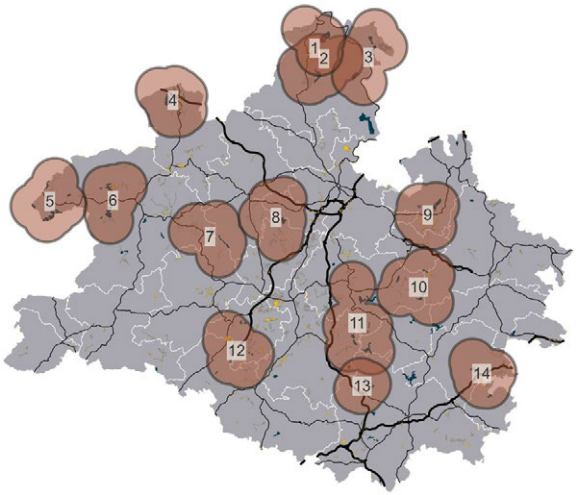


Abbildung 20: Erzeugungscluster Wind und Solar - Mid-Fall

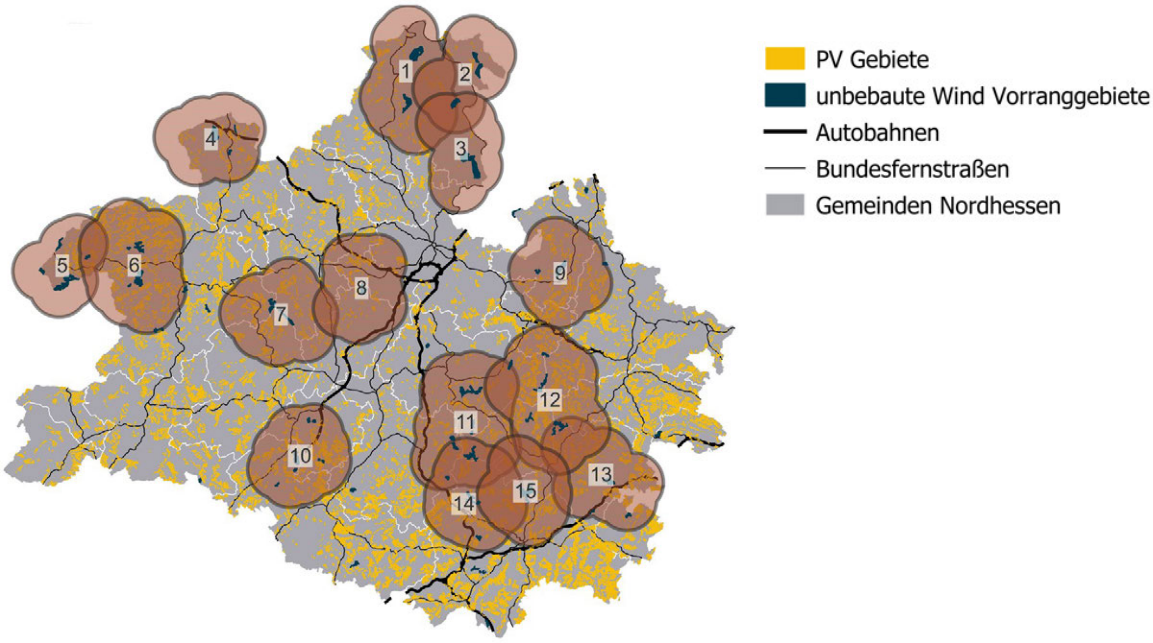


Abbildung 21: Erzeugungscluster Wind und Solar - Max-Fall

Die in den Clustern möglichen Wasserstoffmengen, die aus Elektrolyse mit Kombination aus Windenergieanlagen und Freiflächen-PV-Anlagen produziert werden könnten, wurden berechnet und sind in Tabelle 10 angegeben. Für die Kalkulation wurde mit dem Ansatz aus Abbildung 11 eine Optimierung durchgeführt und 19 % der Leistung der erneuerbaren Energieanlagen (Kombination PV und Wind) als Leistung der Elektrolyse angesetzt bei einer Aufteilung 37,5 % PV und 62,5 % Windenergie. Mit dieser Kombination kann die Elektrolyse 5.600 Volllaststunden erreichen. Diese PV-Leistung ist auch in allen Cluster-Fällen verfügbar. Für den Wirkungsgrad der Elektrolyse wurden 60 % verwendet.

Tabelle 10: Leistung Windenergie und H_2-Potenzial in den Clustern

Cluster	Min-Fall Landwirtschaftsflächen der Klassen <1 [MW peak]		Mid-Fall nicht zugewiesene Flächen gemäß Regionalplan [MW peak]		Max-Fall Landwirtschaftsflächen der Klassen 1 bis 3 [MW peak]	
	Leistung Wind [MW]	H_2-Potenzial [t/a]	Leistung Wind [MW]	H_2-Potenzial [t/a]	Leistung Wind [MW]	H_2-Potenzial [t/a]
1	56,0	1.700	56,0	1.700	112,0	3.401
2	33,6	1.020	33,6	1.020	56,0	1.700
3	16,8	510	33,6	1.020	112,0	3.401
4	44,8	1.360	50,4	1.530	50,4	1.530
5	16,8	510	16,8	510	33,6	1.020
6	33,6	1.020	39,2	1.190	78,4	2.381
7	28,0	850	39,2	1.190	39,2	1.190
8	50,4	1.530	16,8	510	16,8	510
9	56,0	1.700	33,6	1.020	33,6	1.020
10	22,4	680	28,0	850	44,8	1.360
11	-	-	39,2	1.190	95,2	2.891
12	-	-	39,2	1.190	67,2	2.041
13	-	-	16,8	510	56,0	1.700
14	-	-	16,8	510	61,6	1.870
15	-	-	-	-	44,8	1.360

Die einzelnen Cluster können unterschiedlich entwickelt werden. Für die Entwicklungspotenziale der identifizierten Cluster wurde eine Bewertungsmatrix aufgestellt.

Hierzu wurden folgende Kriterien definiert:

Kriterium	Beschreibung
1. Stromanbindung	20/110 kV Netz im Cluster vorhanden oder angrenzend
2. Nähe zu Autobahnen	keine vorhanden, angrenzend oder im Cluster verlaufend
3. im TEN-T-Korridor[10]	angrenzend oder im Cluster verlaufend TENtec Interactive Map Viewer (europa.eu)
4. vorhandene Tankstellen	weniger als 5, weniger als 10 oder mehr als 10 Tankstellen im Cluster

[10] Trans European Transport Network

Kriterium	Beschreibung
5. Nähe zu potenziellen Verbrauchern	Industrie- und Gewerbegebiete sowie Feuerfestindustrie mit weniger als 50 ha, weniger als 150 ha oder mehr als 150 ha Fläche im Cluster
6. Potenzial Bestandsanlagen	vorhandene Anlagen zur Stromerzeugung aus Biogas, PV, Wind mit weniger als 10 MW, weniger als 40 MW oder mehr als 40 MW Fläche im Cluster
7. H_2-Erzeugungspotenzial	Min-Fall: weniger als 750 t/a, weniger als 1.500 t/a oder mehr als 1.500 t/a im Cluster Mid- & Max-Fall: weniger als 1.000 t/a, weniger als 2.000 t/a oder mehr als 2.000 t/a im Cluster

Daraus ergibt sich eine Bewertung der einzelnen Fälle in Tabelle 11.

Tabelle 11: Bewertungsmatrix der drei Betrachtungsfälle

Min-Fall

Clusternummer	Stromanbindung	Nähe zu Autobahn	im TEN-T-Korridor	Vorhandene Tankstellenstandorte	Nähe zu potenziellen Verbrauchern	Potenzial Bestandsanlagen	H_2-Potenzial	Summe
1	3	1	1	1	1	2	3	12
2	3	1	1	1	2	1	2	11
3	3	1	1	1	1	1	1	9
4	3	1	1	1	1	1	2	10
5	2	3	1	1	2	2	1	12
6	2	2	3	1	2	3	2	15
7	3	2	3	1	1	1	2	13
8	3	1	3	2	1	2	3	15
9	3	1	3	2	2	2	3	16
10	3	3	2	1	2	2	1	14

Mid-Fall

Clusternummer	Stromanbindung	Nähe zu Autobahn	im TEN-T-Korridor	Vorhandene Tankstellenstandorte	Nähe zu potenziellen Verbrauchern	Potenzial Bestandsanlagen	H_2-Potenzial	Summe
1	3	1	1	1	1	1	2	10
2	3	1	1	2	2	3	2	14
3	1	1	1	1	1	2	2	9
4	2	3	1	1	2	2	2	13
5	3	1	1	1	1	1	1	9
6	3	1	1	1	3	3	2	14
7	3	1	1	2	1	2	2	12
8	2	3	1	1	2	2	1	12
9	2	2	3	1	2	3	2	15
10	3	2	3	1	2	2	1	14
11	3	3	3	3	3	3	2	20
12	3	3	1	2	2	2	2	15
13	3	3	3	1	1	2	1	14
14	3	3	3	2	2	2	1	16

Max-Fall

Clusternummer	Stromanbindung	Nähe zu Autobahn	im TEN-T-Korridor	Vorhandene Tankstellenstandorte	Nähe zu potenziellen Verbrauchern	Potenzial Bestandsanlagen	H_2-Potenzial	Summe
1	3	1	1	2	2	2	3	14
2	1	1	1	1	1	2	2	9
3	3	1	2	1	2	2	3	14
4	3	3	1	1	2	3	2	15
5	3	1	1	1	1	1	2	10
6	3	1	1	2	3	3	3	16
7	3	1	1	1	1	2	2	11
8	2	3	2	2	3	2	1	15
9	2	2	3	1	2	3	2	15
10	3	3	1	3	3	2	2	17
11	3	3	3	3	3	3	3	21
12	3	2	3	2	3	3	3	19
13	3	3	3	2	3	2	2	18
14	3	3	3	1	1	3	2	16
15	3	2	3	3	3	2	2	18

kurzfristige Umsetzung | mittelfristige Umsetzung | langfristige Umsetzung

1 = niedrig, 2 = mittel, 3 = hoch

Alle drei Fälle zeigen, dass für eine kurzfristige Umsetzung der Wasserstofferzeugung die Regionen um Großalmerode, Alheim/Morschen, Cornberg/Spangenberg/Rotenburg a.d.F., Neuental, Bad Hersfeld, Bebra und Wildeck/Ronshausen entsprechend der vorhandenen Infrastruktur, der möglichen Abnehmer sowie der Straßenanbindungen näher betrachtet werden sollten.

Neben der elektrischen Energie für die Erzeugung von Wasserstoff durch Elektrolyse ist auch Wasser erforderlich. Für die Produktion von 1 kg Wasserstoff müssen etwa 10 Liter Wasser der Erzeugungseinheit zugeführt werden. Im Max-Fall würde bei einem Ausbau, wie oben in Tabelle 10 ausgeführt, der Wasserbedarf gerade einmal um 0,5 % steigen, Tabelle 12.

Tabelle 12: Wasserbedarf der Elektrolyse in den Betrachtungsfällen

Wasserabgabe der öffentlichen Wasserversorgung an LetztverbraucherInnen in Nordhessen [36] **[1.000 m³]**	**Min-Fall Landwirtschaftsflächen der Klassen <1** **[1.000 m³]**	**Mid-Fall nicht zugewiesene Flächen gemäß Regionalplan** **[1.000 m³]**	**Max-Fall Landwirtschaftsflächen der Klassen 1 bis 3** **[1.000 m³]**
51.109	109	139	274

Die EU-Verordnung über die Infrastruktur für alternative Kraftstoffe (Alternative Fuels Infrastructure Regulation, AFIR) sieht vor, dass bis Ende 2030 alle 200 km entlang des TEN-T-Korridors sowie in jedem Ballungszentrum eine Tankstelle für gasförmigen Wasserstoff errichtet werden muss. Die Tankstellen sollen über eine tägliche Versorgungskapazität von einer Tonne Wasserstoff für alle Straßenverkehrsträger verfügen. Hier bietet Nordhessen entsprechend der identifizierten Potenziale ausreichend Möglichkeiten zur Versorgung der Tankstellen mit regional erzeugtem Wasserstoff.

2.1.10 Potenzieller künftiger Wasserstoffbedarf in der Industrie

Der Wasserstoffbedarf der nordhessischen Industrie wird in den folgenden Abschnitten detailliert beschrieben. Zunächst wird basierend auf Daten wissenschaftlicher Studien und statistischer Veröffentlichungen eine Analyse der potenziellen künftigen Wasserstoffbedarfe der einzelnen Industriebranchen in den Landkreisen vorgenommen. Basierend auf den Ergebnissen der studienbasierten Analyse werden anschließend konkrete Unternehmen der entsprechenden Branchen in den Landkreisen recherchiert und ihnen potenzielle Wasserstoffbedarfe zugeordnet (datenbasierter Ansatz).

2.1.10.1 Studienbasierter Ansatz

Berechnungsgrundlage

Die Basis für die Potenzialbestimmung des zukünftigen Wasserstoffbedarfs durch die Industrie in Nordhessen sind die Studie „Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland“ [37], das Handelsregister für Nordhessen von der IHK Kassel-Marburg [38] und der NACE-Code [39].

Die Studie „Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland“ modelliert drei Szenarien für die zukünftige Entwicklung eines treibhausgasneutralen Energiesystems und leitet u.a. potenzielle stoffliche und energetische Wasserstoffbedarfe für unterschiedliche Wirtschaftszweige ab. Die Ergebnisse der Studie liegen für Landkreise und kreisfreie Städte vor.

Die größten Unterschiede zwischen den im Folgenden betrachteten Szenarien bestehen in der industriellen Wärmebereitstellung. „Im Szenario TN-Strom werden direktelektrische Lösungen bevorzugt, was sich vorwiegend auf die Umstellung der Prozesswärme bezieht. Dort, wo dies nicht möglich ist, weil z.B. eine stoffliche Nutzung der Energieträger stattfindet, wird Wasserstoff eingesetzt (z.B. zur Herstellung von Olefinen). Im Szenario TN-H2 wird davon ausgegangen, dass Wasserstoff bis 2050 über eine großflächige Infrastruktur an allen Standorten verfügbar ist. Wasserstoff ist der bevorzugte Energieträger für energetische sowie stoffliche Nutzung.“ [37]

Die zwei Szenarien der Studie beschreibt das ISI wie folgt:

- „Die Szenariowelten der Elektrifizierung setzen auf eine starke Nutzung von erneuerbarem Strom. Die Modelle der Energienachfrage errechnen jeweils für ihren Sektor Szenarien mit starker Stromnutzung. Allerdings wird für das Ziel der Treibhausgasneutralität auch hier schon eine erhebliche Menge Wasserstoff benötigt. Die Deckung der Nachfrage nach Strom, Wärme in Wärmenetzen und Wasserstoff wird optimiert. Dabei werden die Kosten der Netze für Strom und Gas bzw. Wasserstoff berücksichtigt. Die Nutzung von Kohlenwasserstoffen wird bis 2050 auf das nachhaltige Potenzial von Biomasse begrenzt. Das hier dargestellte Szenario **TN-Strom** stellt die Basisvariante für weitere geplante Szenarien der Szenariowelten Elektrifizierung dar.

- Die Szenariowelten auf Basis von Wasserstoff untersuchen unterschiedliche Ausprägungen einer verstärkten Nutzung von Wasserstoff für die Dekarbonisierung des Energiesystems. Das hier dargestellte Szenario **TN-H2** analysiert eine sehr starke Nutzung von Wasserstoff im Energiesystem. Die Deckung der Energienachfrage wird dabei optimiert. In der Modellierung des Energieangebotes muss die Nachfrage nach Wasserstoff, ähnlich wie im Szenario TN-Strom, durch Elektrolyse in Deutschland, Europa oder anderen Regionen der Welt bereitgestellt werden.“ [37]

Stoffliche Nutzung von Wasserstoff beinhaltet die Verarbeitung von Wasserstoff zu weiteren Produkten sowie Prozesse, bei denen das Wasserstoffatom stofflich reagiert, wie beispielsweise bei der Herstellung von Ammoniak, Olefinen oder der Reduktion von Rohstahl. Die Auswertung der Daten der Studie ergab, dass es in Nordhessen keine Unternehmen in den entsprechenden Industriezweigen der stofflichen Nutzung gibt – die stoffliche Nutzung in dieser Potenzialbestimmung ist somit nicht relevant.

Energetisch kann Wasserstoff zur Bereitstellung von Prozesswärme auf unterschiedlichen Temperaturniveaus genutzt werden. In Industrieöfen werden für die Herstellung oder Verarbeitung von Stahl, Keramik, Zement und Glas über 1000 °C erreicht. Für die Erzeugung von Dampf und Warmwasser hingegen werden meist Temperaturen unter 300 °C benötigt. Für beide Temperaturniveaus kann – je nach Anwendungsfall – Wasserstoff verwendet werden.

Die Berechnung der Szenarien für den Industriesektor erfolgte in einem ersten Schritt ohne regionale Aufschlüsselung mit dem Modell FORECAST-Industry. FORECAST-Industry ist ein Bottom-up-Energienachfragemodell, das die Technologiestruktur der Industrie abbildet und Energieverbrauch, Emissionen und Kosten auf Prozessebene berechnet. Eingangsdaten für die Modellierung sind u.a. die Wirtschaftsleistung je Branche, Energie- und CO_2-Preise und techno-ökonomische Daten der abgebildeten Technologien. Als Datenbasis dienen Statistiken, empirische Studien, Literatur sowie Einschätzungen von Fachleuten. [37]

Die regionale Energienachfrage wird mithilfe des Modells FORECAST-Regional ermittelt. Dieses Modell teilt die nationale Nachfrage auf regionale Einheiten auf. Energieintensive Prozesse werden dabei standortscharf in einer Datenbank erfasst, die ca. 850 Standorte energieintensiver Industrie enthält (Zement, Stahl, Papier, Chemie, etc.). Der Verteilschlüssel basiert bei den energieintensiven Produkten auf Prozessinformationen wie der Produktionskapazität oder der jährlichen Produktion. Die Energienachfrage nicht-energieintensiver Industrie wird mithilfe der Beschäftigenzahlen des jeweiligen Subsektors verteilt. Dabei gelten die Annahmen, dass existierende Standorte erhalten bleiben und sich entsprechend des nationalen Durchschnitts entwickeln.

Methodik

Zur Aufschlüsselung des Wasserstoffbedarfs auf Kreisebene werden zuerst die Unternehmen, die im Register der IHK Marburg-Kassel erfasst sind, den Industriezweigen der Studie „Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland“ zugeordnet. Die IHK Marburg-Kassel ordnet die registrierten Unternehmen nach dem NACE-Code, der jedoch feiner aufgegliedert ist als die Industriezweige in oben genannter Studie. Tabelle 13 zeigt beispielhaft, wie gegebenenfalls mehrere NACE-Branchen zu einem Wirtschaftszweig zusammengefasst werden.

Tabelle 13: Auszug der Zusammenfassung der NACE-Branchen zu den betrachteten Wirtschaftszweigen Beispiel Ernährung und Tabak (Auszug) [39]

Wirtschaftszweig	Zugeordneter NACE-Code zweistellig	Branchenbezeichnung nach NACE-Code
Ernährung und Tabak	10	Herstellung von Nahrungs- und Futtermitteln
	11	Getränkeherstellung
	12	Tabakverarbeitung

Ergebnisse

Abbildung 22 zeigt die Anzahl der Unternehmen in den betrachteten Industriezweigen in Nordhessen. Ein großer Teil der erfassten Unternehmen wird der Kategorie „sonstige Wirtschaftszweige“ zugeordnet.

Aus den relevanten Kategorien spezifischer Wirtschaftszweige stechen der Maschinenbau mit etwas über 200 Unternehmen, die Metallbearbeitung mit knapp unter 200 Unternehmen und der Zweig „Ernährung und Tabak“ mit circa 150 Unternehmen hervor. Die wenigsten Unternehmen sind im Papiergewerbe aufgelistet.

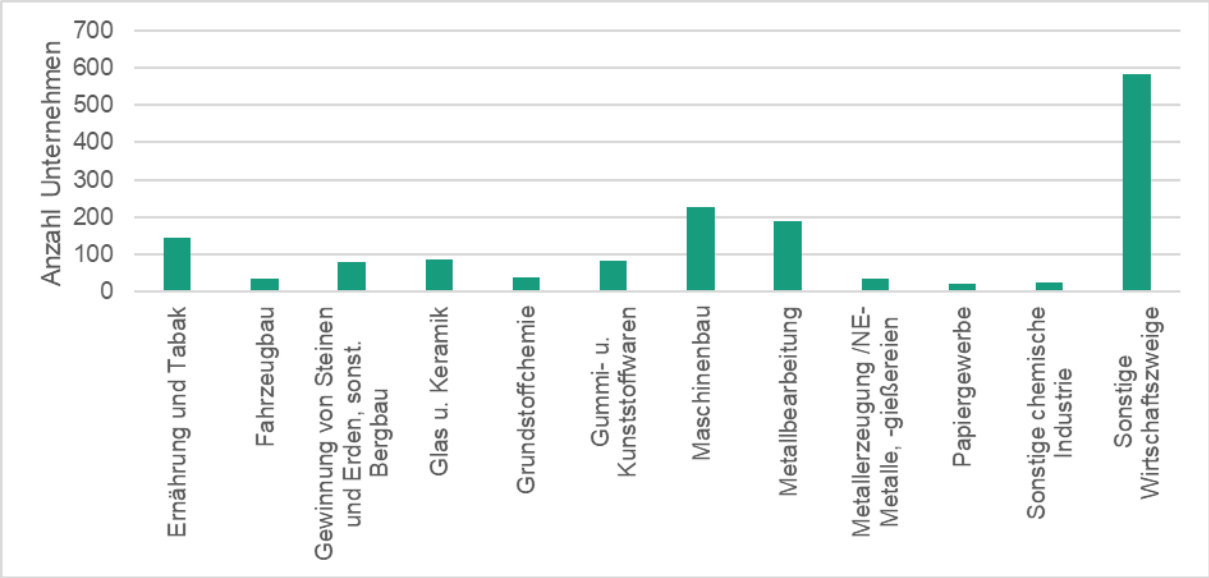


Abbildung 22: Anzahl der Unternehmen in Nordhessen nach relevanten Wirtschaftszweigen in 2021

Die geringe Anzahl an Unternehmen im Papiergewerbe ist besonders deshalb interessant, weil dieser Wirtschaftszweig in allen drei Prognosejahren mit Abstand den größten Wasserstoffbedarf in Nordhessen aufweist. Dies wird aus Abbildung 23 deutlich, die den energetischen Wasserstoffbedarf in Nordhessen nach Wirtschaftszweig und Jahr zeigt. Neben dem Papiergewerbe weisen noch die Industriezweige „Ernährung und Tabak“, „Fahrzeugbau“, „Gummi- und Kunststoffwaren“, „Maschinenbau“, „Metallbearbeitung“ und „sonstige Wirtschaftszweige“ Bedarfe auf, die spätestens 2050 relevante Ausmaße annehmen. Die Zweige „sonstige chemische Industrie“ und „Gewinnung von Steinen und Erden, sonstiger Bergbau“ erzeugen keine nennenswerten Wasserstoffbedarfe. In den Industriezweigen „Glas und Keramik“, „Grundstoffchemie“ und „NE-Metalle, -gießereien“ fallen laut Studiendaten trotz vorhandener Unternehmen in den Wirtschaftszweigen in Nordhessen keine Bedarfe an.

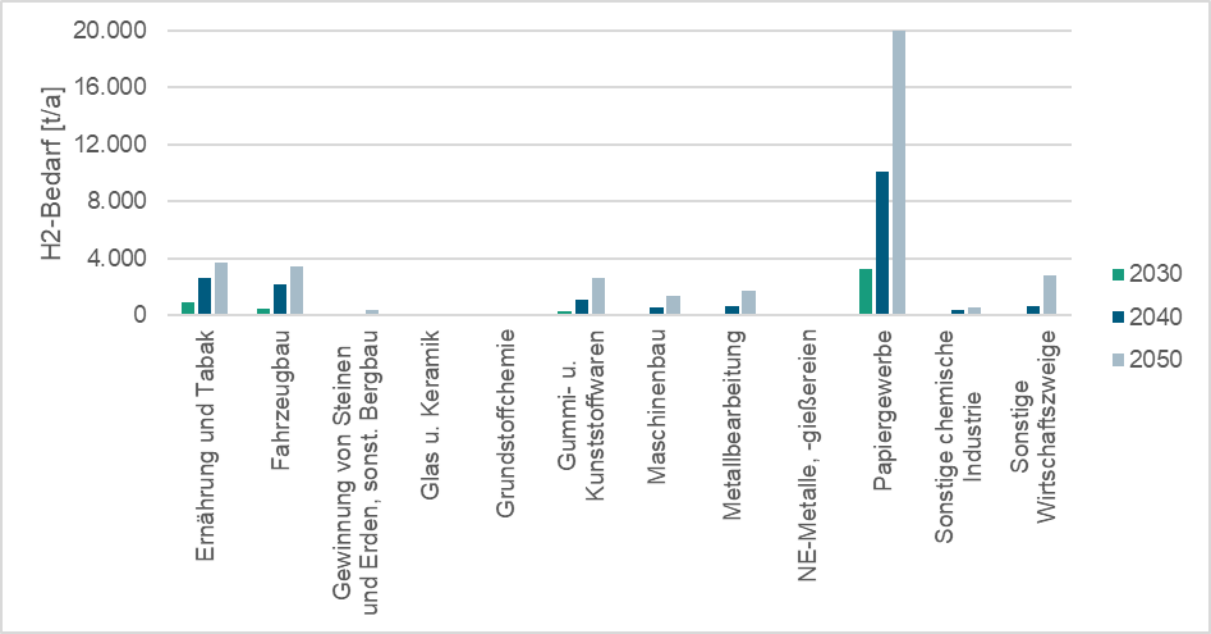


Abbildung 23: Energetischer Wasserstoffbedarf in Nordhessen nach Wirtschaftszweig und Jahr

In Abbildung 24 sind die Wasserstoffbedarfe der einzelnen Wirtschaftszweige für das Jahr 2030 den Landkreisen zugeordnet. Während sich die Bedarfe durch den Maschinenbau ohne große Schwankungen auf alle sechs betrachteten Kreise verteilt, allerdings sehr niedrig ausfällt, zeigen sich für andere Wirtschaftszweige deutliche Tendenzen in einzelnen Landkreisen.

Im Papiergewerbe fallen die nordhessischen Bedarfe in den Kreisen Waldeck-Frankenberg und Werra-Meißner an, die Bedarfe durch den Fahrzeugbau sind allein in der kreisfreien Stadt Kassel verortet, die Bedarfe im Industriezweig „Ernährung und Tabak“ fallen vorrangig im Schwalm-Eder-Kreis, in Waldeck-Frankenberg und im Landkreis Kassel an und bei den Gummi- und Kunststoffwaren sticht der Kreis Waldeck-Frankenberg hervor. Zu diesen Industriezweigen und Kreisen folgt in Kapitel 3.1.10.2 eine datengestützte Analyse der ansässigen Unternehmen.

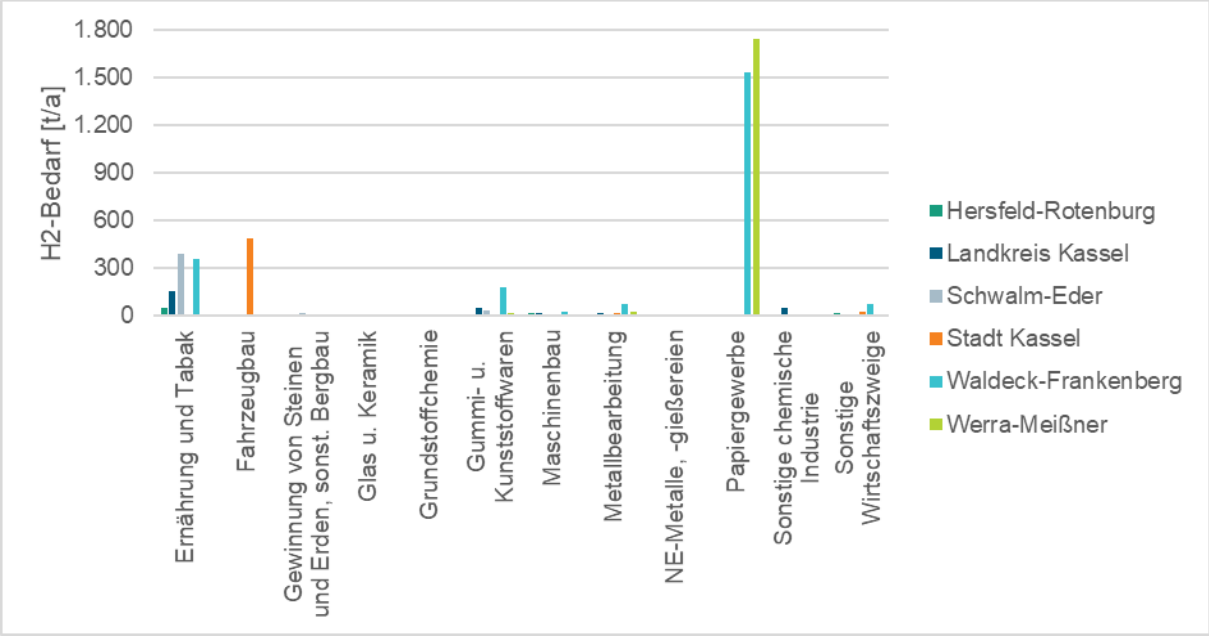


Abbildung 24: Energetischer Wasserstoffbedarf in Nordhessen nach Kreis- und Wirtschaftszweig in 2030

In der folgenden Tabelle 14 ist der prognostizierter Wasserstoffbedarf für die Region Nordhessen und ihre einzelnen Kreise für die Jahren 2030, 2040 und 2050 dargestellt. Die Wasserstoffbedarfe stellen die Summen der einzelnen Wirtschaftszweige pro Kreis dar.

Tabelle 14: Prognostizierter Wasserstoffbedarf für die Region Nordhessen und ihre einzelnen Kreise

Kreis	2030	2040	2050
Hersfeld-Rotenburg	80	307	760
Landkreis Kassel	289	1.237	2.178
Schwalm-Eder	464	1.390	2.480
Stadt Kassel	550	2.471	4.433
Waldeck-Frankenberg	2.254	7.285	15.356
Werra-Meißner	1.804	5.628	11.414
Region Nordhessen	**5.441**	**18.318**	**36.621**

Energetische Wasserstoffnutzung in einzelnen Industriezweigen

Da für die Region Nordhessen lediglich die energetische Nutzung von Wasserstoff relevant ist, wird im Folgenden auf einzelne Prozesse der betreffenden Wirtschaftszweige eingegangen. In diesem Zusammenhang ist auch das Temperaturniveau des einzelnen Prozesses entscheidend, ob ein Einsatz von Wasserstoff oder eine Elektrifizierung der Wärmebereitstellung sinnvoll sind, denn Temperaturen bis etwa 150°C können auch durch Hochleistungswärmepumpen erreicht werden. Im Kontext der Prozesswärme zählen Temperaturen unter 100°C zum Niedertemperaturbereich, Temperaturen zwischen 100 und 500°C bilden den Mitteltemperaturbereich und Temperaturen über 500°C liegen im Hochtemperaturbereich [40].

Papiergewerbe

Für die Herstellung von Zellstoff und Aufbereitung von Altpapier sowie zur Trocknung von Papier werden Nieder- und Mitteltemperaturprozesswärme benötigt. Der branchenspezifische Wärmebedarf ist zu 80-95% im Mitteltemperaturbereich, der restliche Bedarf ist im Niedertemperaturbereich. [41], [42]

Ernährung und Tabak

In der Lebensmittelindustrie werden Nieder- und Mitteltemperaturprozesswärme zur Pasteurisierung, Sterilisation, Trocknung oder anderweitiger Verarbeitung benötigt. Zwar finden Back- und Trocknungsprozesse bei Temperaturen von 200-500°C statt, die Sterilisation von Maschinen benötigt jedoch lediglich ca. 120°C und anderweitige Verarbeitungsprozesse finden in der Regel bei unter 100°C statt. [41], [42]

Gummi- und Kunststoffherstellung

Für die Herstellung von Gummi- und Kunststoffprodukten müssen die Rohstoffe vor der Verarbeitung erwärmt werden. Etwa 80% des branchenspezifischen Wärmebedarfs wird im Mitteltemperaturbereich verursacht, der restliche Bedarf fällt im Niedertemperaturbereich an. [41], [42]

Fahrzeugbau

Im Fahrzeugbau kann ein Bedarf von Hochtemperaturprozesswärme entstehen, wenn die Herstellung von Rohstoffen wie Aluminium nicht ausgelagert werden. [41], [42]

2.1.10.2 Datenbasierter Ansatz

Ergänzend zur rein studienbasierten Analyse wurden spezifische, öffentlich verfügbare Daten vielversprechender Akteure aus der Region (z. B. Energieverbrauch, Produktionsmengen, Prozesse) analysiert, welche aller Voraussicht nach einem hohen Beitrag zu den studienbasiert ermittelten Bedarfen leisten. Hierfür werden zuerst die produzierenden Unternehmen in den Landkreisen und Wirtschaftszweigen ermittelt. Anschließend wird eine Bedarfsabschätzung basierend auf verfügbaren Informationen zu den Produkten, Produktionsprozessen und den Produktionsvolumina bzw. Produktionskapazitäten vorgenommen. Diese ergänzende Analyse hat das Ziel, die studienbasiert ermittelten Bedarfe initial zu verifizieren und einzelnen Unternehmen zuzuordnen.

Papiergewerbe

Zur Identifizierung einzelner papierproduzierender Unternehmen mit potenziellen künftigen Wasserstoffbedarfen wurden die Unternehmen, die diesem Wirtschaftszweig zugeordnet werden, für die Kreise Waldeck-Frankenberg und Werra-Meißner ermittelt, siehe Abbildung 25. Es wurden folgende vier Unternehmen gefunden:

- Smurfit Kappa (Diemelstadt), Produkte: Wellpappe, grafische Pappe [43]
- Sprick GmbH (Diemelstadt), Produkte: Wellpappe, Verpackungssysteme [44]
- DS Smith Paper (Witzenhausen), Produkte: Wellpappe [45]
- Essity Operations (Witzenhausen), Produkte: Hygienepapier [46]

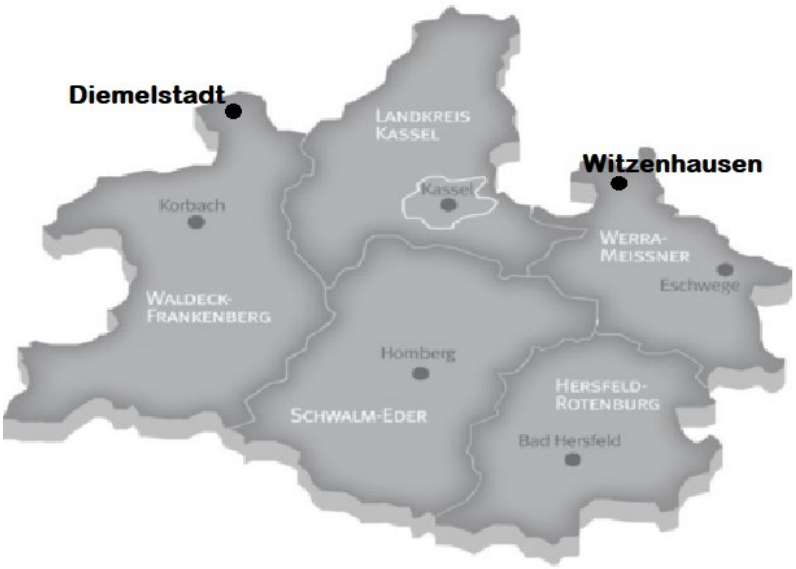


Abbildung 25: Karte Nordhessens mit Standorten produzierenden Papiergewerbes

Zu den Unternehmen wurden werksspezifische Produktionskapazitäten ausgewertet und mit einem spezifischen Wasserstoffbedarf [47] verrechnet, um die Wasserstoffbedarfe zu ermitteln und somit die Studienwerte zu verifizieren. Die Sprick GmbH wird hier nicht weiter aufgeführt, da zu diesem Unternehmen keine verwertbaren Daten gefunden wurden.

Die errechneten potenziellen Wasserstoffbedarfe (studienbasiert) weisen eine Differenz zu den akteursspezifisch prognostizierten Bedarfen des entsprechenden Kreises auf. Dies ist zu erklären durch die Annahme, dass die fossilen Energieträger auf den Heizwert bezogen, 1:1 durch Wasserstoff ersetzt werden können. Der studienbasierte Ansatz geht allerdings zum einen nicht von einer Substitution von 100% im Jahr 2030 aus und nimmt zum anderen Effizienzsteigerungen sowie eine Elektrifizierung durch den Einsatz von Hochleistungswärmepumpen an, wenn dies für die benötigten Temperaturniveaus angemessen ist.

Tabelle 15: Wasserstoffbedarfsabschätzung für ausgewählte nordhessische Unternehmen aus dem Wirtschaftszweig "Papiergewerbe" [37], [45], [46], [43]

Unter-nehmen	Kreis	Spezifischer Wärmebedarf [MWh/t]	Produktions-volumen [t/a]	Berechneter potenzieller H_2-Bedarf [t/a]	Branchen-spezifischer H_2-Bedarf Kreis in 2030 [t]	Branchen-spezifischer H_2-Bedarf Kreis in 2050 [t]
Smurfit Kappa	Waldeck-Frankenberg	1,36	320.000	13.000	1.536	9.368
DS Smith	Werra-Meißner	1,36	410.000	16.700	1.742	10.626
Essity		1,92	32.000	1.850		

Ernährung und Tabak

Aus dem Industriezweig „Ernährung und Tabak“ finden sich produzierende Unternehmen in Waldeck-Frankenberg, im Schwalm-Eder-Kreis und im Landkreis Kassel, siehe Abbildung 26. Es wurden folgende produzierende Unternehmen identifiziert:

- Viehmeier GmbH & Co. KG (Gilserberg), Backfabrik für den „Schwälmer Brotladen“, Produkte: Backwaren [48]
- Plukon (Gudensberg), Produkte: Geflügelprodukte [49]
- Fleischwerk Hessengut GmbH (Melsungen), Produkte: Fleisch- und Wurstwaren [50]
- Südzucker AG (Wabern), Produkte: Zucker [51]
- Henkelmann GmbH & Co. KG (Volkmarsen), Produkte: Wurst und Schinken für Großverbraucher [52]
- Upländer Bauernmolkerei GmbH (Willingen (Upland)), Produkte: Milch und fermentierte Milchprodukte [53]
- Hütt Brauerei (Baunatal), Produkte: Bier [54]

Abbildung 26: Karte Nordhessens mit den Standorten produzierender Unternehmen des Wirtschaftszweiges "Ernährung und Tabak"

Verwertbare Daten wurden zu den Unternehmen Südzucker, Upländer Bauernmolkerei und der Hütt Brauerei gefunden. Da zu den verbleibenden Unternehmen keine verwertbaren Daten gefunden wurden, werden diese im Folgenden nicht weiter aufgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 16 aufgeführt.

Die Südzucker AG verfügt über ein Produktionsvolumen von 135.000-150.000 Tonnen pro Jahr. Für die Potenzialberechnung der Südzucker AG wurde der durchschnittliche Zuckergehalt pro Rübe in Deutschland im Jahr 2020 sowie ein spezifischer thermischer Energiebedarf von 2,554 kWh/tRüben angenommen. [51]

Die Upländer Bauernmolkerei verarbeitet im Jahr 40.000m³ Milch und stellt daraus hauptsächlich Milch und fermentierte Milchprodukte her. Hier wird ebenfalls mit einem prozessspezifischen Wärmebedarf gerechnet. Die Umrechnung von Volumen in Gewicht der

verarbeiteten Milch erfolgt unter Annahme, dass die Dichte von Milch 1 kg/dm³ entspricht. [55], [56]

Die Bedarfsermittlung der Hütt Brauerei auf deren Jahresproduktion von 5.300 m³ pro Jahr. Brauereien dieser Größe wird für die Bierherstellung ein spezifischer Wärmebedarf von 530 kWh/m³ zugerechnet. [55], [54]

Tabelle 16: Wasserstoffbedarfsabschätzung für ausgewählte nordhessische Unternehmen aus dem Wirtschaftszweig "Ernährung und Tabak" [37], [49], [56], [54], [51]

Unternehmen	Kreis	Spezifischer Wärme-bedarf [kWh/t]	Produktions-volumen [t/a]	Berechneter potenzieller H_2-Bedarf [t/a]	Branchen-spezifischer H_2-Bedarf Kreis in 2030 [t]	Branchen-spezifischer H_2-Bedarf Kreis in 2050 [t]
Südzucker	Schwalm-Eder	2,554	142.500	6.400	393	1.515
Upländer Bauernmolkerei	Waldeck-Frankenberg	145,56	40.000	175	362	1.395
Hütt Brauerei	Landkreis Kassel	530	5.300	84	153	590

Gummi- und Kunststoffherstellung

Im Kreis Waldeck-Frankenberg wurden folgende produzierende Unternehmen der Gummi- und Kunststoffherstellung identifiziert, siehe auch Abbildung 27:

- Continental Reifen (Korbach), Produkte: Sommer- und Winterreifen für PKW, SUV, LKW sowie Spezialanfertigungen [57]
- ContiTech Schlauch (Korbach), Produkte: verschiedene Arten von Schläuchen [57]

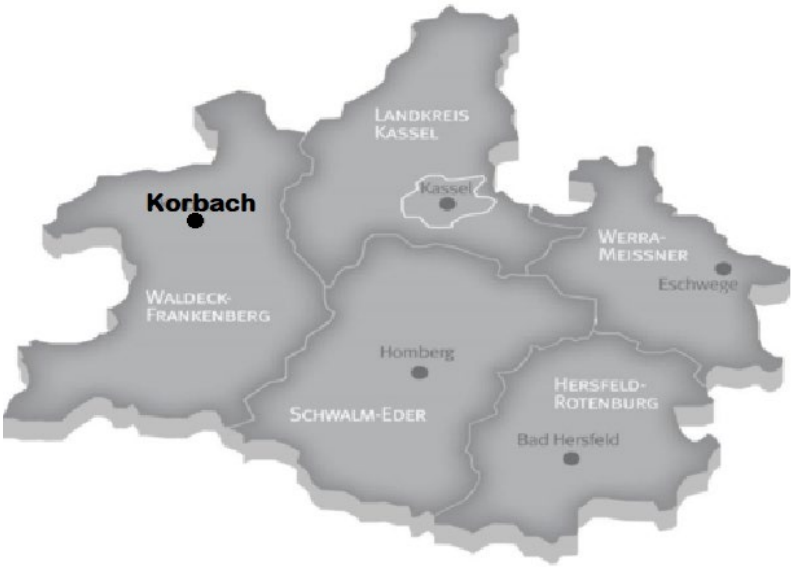


Abbildung 27: Karte Nordhessens mit den Standorten produzierender Unternehmen der Gummi- und Kunststoffherstellung

Fahrzeugbau

Die Unternehmen des Fahrzeugbaus wurden entgegen der Zuordnung aus der für den Top-Down-Ansatz genutzten Studie sowohl in der kreisfreien Stadt Kassel als auch im Landkreis Kassel gesucht, da sich das das Volkswagen-Werk in Baunatal, im Landkreis Kassel, und nicht in der Stadt Kassel befindet, siehe Abbildung 28. Es konnten folgende produzierende Unternehmen identifiziert werden:

- Daimler Truck AG (Kassel), Produkte: Nutzfahrzeug-Achsen, elektrische Antriebssysteme [58]
- Volkswagen AG (Baunatal), Produkte: Getriebe, e-Antriebe, Abgasanlagen [59]

Abbildung 28: Karte Nordhessens mit den Standorten produzierender Unternehmen des Fahrzeugbaus

Als Berechnungsgrundlage des potenziellen Wasserstoffbedarfs der Daimler Truck AG dient der Prozesswärmebedarf der Jahre 2017-2020. In diesem Zeitraum hatte Daimler durchschnittlich einen Prozesswärmebedarf von 10.340 MWh, der mit Erdgas gedeckt wurde. Für die Berechnung des potenziellen Bedarfs wurde die Annahme einer 100%igen Substitution durch Wasserstoff getroffen. [60], [61], [62], [63]

Für das Werk der Volkswagen AG liegt lediglich ein Verbrauch von 363.000 MWh technischer Wärme und Brenngasen im Jahr 2018 vor. Der Hauptverbrauch dieser Energie entstand im werkseigenen Aluminiumschmelzwerk. Auch hier wurde der potenzielle Wasserstoff unter der Annahme einer 100%igen Substitution berechnet. [60], [64]

Tabelle 17: Wasserstoffbedarfsabschätzung für ausgewählte nordhessische Unternehmen aus dem Wirtschaftszweig "Fahrzeugbau" [37], [60], [64], [61], [62], [63]

Unternehmen	Kreis	Wärmebedarf [MWh/a]	Berechneter potenzieller H_2-Bedarf [t/a]	Branchen-spezifischer H_2-Bedarf Kreis in 2030 [t]	Branchen-spezifischer H_2-Bedarf Kreis in 2050 [t]
Daimler Truck AG	Stadt Kassel	10.340	310	484	3.438
Volkswagen AG	Landkreis Kassel	363.000	10.900	0	0

Feuerfestindustrie

Die studienbasierte Analyse im Kapitel 3.1.10.1 weist keine energetischen Wasserstoffbedarfe für den Industriezweig „Glas- und Keramik“ aus. Dennoch konnten im Landkreis Werra-Meißner folgend aufgeführte Unternehmen aus der Feuerfestindustrie identifiziert werden, siehe auch Abbildung 29:

- Atlantic Schmelztiegel Christoph Goebel GmbH (Großalmerode), Produkte: Schmelztiegel, technische Keramiken [65]
- Aug. Gundlach KG (Großalmerode), Produkte: Schmelztiegel [66]
- CONRAD LIPHARD & SÖHNE GmbH (Großalmerode), Produkte: Ofen- und Anlagenbau, Schmelztiegel, Ingenieurkeramiken, Brennhilfsmittel, etc. [67]
- VESUVIUS GmbH (Großalmerode), Produkte: Schmelztiegel, Zubehör für Nichteisen-Gießereibranche [68]
- VGT-DYKO GmbH (Großalmerode), Produkte: Allgemeiner Ofenbau, geformte und ungeformte feuerfeste Erzeugnisse, Brennhilfsmittel [69]
- Köhler Kalk GmbH (Meißner), Produkte: gebrannter und ungebrannter Kalk [70]

Abbildung 29: Karte Nordhessens mit den Standorten produzierender Unternehmen der Feuerfestindustrie

Die Feuerfestindustrie ist deutschlandweit und in Nordhessen hauptsächlich mittelständisch geprägt. Sie liefert wesentliche Produkte für Hochtemperaturprozesse für die Stahl-, Zement, Glas- und Chemieindustrie. Als feuerfeste Werkstoffe werden Produkte bezeichnet, deren Erweichungspunkt über 1500°C liegt und die hohen Materialbeanspruchungen genügen müssen. Zwei wesentliche Produktgruppen werden dabei unterschieden: Geformte Produkte (z.B. Schmelztiegel, Platten, Formteile) und ungeformte Produkte (z.B. Mörtel, Beton und Zemente). [71], [72]

Aufgrund der mittelständischen Prägung der Branche und nicht öffentlich verfügbarer Daten und Informationen, ist eine Wasserstoffbedarfsabschätzung im Wirtschaftszweig „Feuerfestindustrie“ derzeit nicht möglich. Die oben genannten Unternehmen wurden angeschrieben und gebeten, Daten zur Verfügung zu stellen. Es gab keine Antworten. Es kann jedoch von einem Wasserstoffbedarf in Zukunft ausgegangen werden, da für große Teile der Produktion ein hohes Temperaturniveau von 1350°C bis über 1700°C realisiert werden muss. [72]

2.1.10.3 Vergleich studien- und datenbasierter Ansatz

Der größte Wasserstoffbedarf für eine energetische Nutzung wird in der Papierindustrie sein. Produzierende Papierunternehmen sind in Diemelstadt (Waldeck-Frankenberg) und Witzenhausen (Werra-Meißner-Kreis) ansässig. Derzeit sind in diesen Regionen vier produzierende Unternehmen verortet, die hauptsächlich Wellpappe, aber auch grafische Pappe und Hygienepapier herstellen.

Weitere nennenswerte potenzielle Bedarfe werden im Wirtschaftszweig „Ernährung und Tabak“ erwartet. Hier ragen der Schwalm-Eder-Kreis und der Kreis Waldeck-Frankenberg besonders heraus. Bedarfe aus der Gummi- und Kunststoffherstellung werden hingegen primär in Waldeck-Frankenberg erwartet und dürften dem Unternehmen Continental und seiner Tochter ContiTech zugeschrieben werden. Wasserstoffbedarfe im Fahrzeugbau werden lediglich in Kassel durch die Daimler Truck AG und in der direkten Umgebung durch die Volkswagen AG erwartet.

In Tabelle 18 sind die Ergebnisse aus dem studienbasierten Ansatz für einige Unternehmen und die Ergebnisse aus dem datenbasierten Ansatz zusammengefasst. Tabelle 18: Übersicht vielversprechender nordhessischer Unternehmen für eine potenzielle Wasserstoffabnahme [37], [60], [45], [43]

Unternehmen	**Ort** *Kreis*	**Wirtschafts -zweig**	**Unternehmens -spezifisch, datenbasiert [t/a]**	**Studien-basiert nach Kreis- und Branche 2030 [t]**	**Studienbasiert nach Kreis- und Branche 2050 [t]**
DS Smith	Witzenhausen *Werra-Meißner*	Papier-gewerbe	16.700	1.742	10.626
Smurfit Kappa	Diemelstadt *Waldeck-Frankenberg*	Papier-gewerbe	13.000	1.536	9.368
Südzucker AG	Wabern *Schwalm-Eder*	Ernährung und Tabak	6.400	393	1.515
Volkswagen AG	Baunatal *Landkreis Kassel*	Fahrzeug-bau	10.900	484 (Stadt Kassel)	3.438 (Stadt Kassel)

2.1.11 Potenzieller künftiger Wasserstoff in Mobilität und Logistik

Dieses Kapitel enthält die Auswertung des potenziellen künftigen Wasserstoffbedarfs im Mobilitätssektor. Dafür wird in den folgenden Abschnitten auf den in der Region Nordhessen gemeldeten Fahrzeugbestand und dessen Bedarfe, den Durchgangsverkehr auf Autobahnen, den Flughafen Kassel Calden sowie die Kurhessenbahn eingegangen. Abschließend erfolgt ein Kapitel zur Fahrzeugverfügbarkeit sowie zu technischen und ökonomischen Kennzahlen für Fahrzeuge mit Wasserstoffantrieb.

2.1.11.1 Straßenverkehr

Als Grundlage für die Betrachtung des Straßenverkehrs wird der Fahrzeugbestand in der Betrachtungsregion verwendet. Um diesen zu ermitteln werden Daten des Kraftfahrtbundesamtes (KBA) genutzt. [73] Dieses veröffentlicht die Anzahl der Fahrzeuge jährlich nach Gemeinden und Fahrzeuggruppen. Für die weitere Auswertung wird der Fahrzeugbestand zum Stichtag 01.01.2022 verwendet und eine Entwicklung des Fahrzeugbestands je Fahrzeuggruppe basierend auf historischen Entwicklungen prognostiziert.

Es erfolgt eine Unterteilung der PKW, LKW, Zugmaschinen und sonstigen KFZ. Die Aufteilung der PKW erfolgt in private sowie gewerbliche Halter und wird aus den Daten des KBA bestimmt. Für die LKW erfolgt die Unterteilung anhand des Gewichtes in die drei Gruppen: <3,5 t, 3,5-15 t und >15 t. Die Umrechnung auf diese Gewichtsklassen, erfolgt mithilfe der prozentualen Verteilung in Deutschland aus der Quelle. Anhand der vorhandenen Daten lassen sich die Zugmaschinen in Sattelzugmaschinen und land-/forstwirtschaftliche Zugmaschinen aufschlüsseln. Abbildung 30 zeigt die prozentuale Verteilung des Fahrzeugbestands im Betrachtungsgebiet Nordhessen zum Stichtag 01.01.2022.

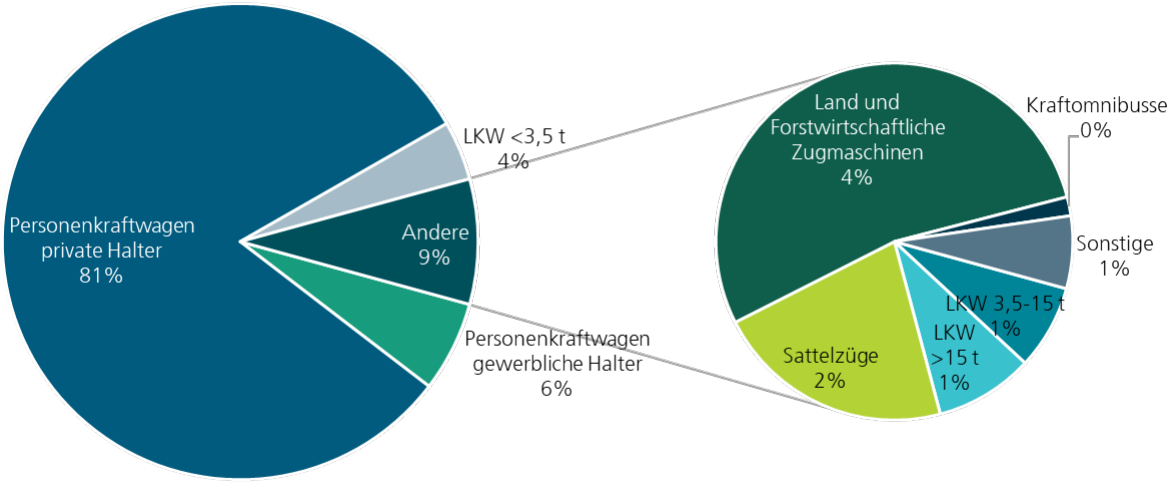


Abbildung 30: Fahrzeugbestand im Betrachtungsgebiet Nordhessen im Jahr 2022

Für die Umrechnung von Fahrzeugen in Kraftstoffbedarf zeigt die folgende Tabelle 19 die Annahmen zum Wasserstoffverbrauch je 100 km und Fahrzeuggruppe. Außerdem sind dort durchschnittliche Jahresfahrleistungen für die betrachteten Fahrzeuggruppen aufgeführt.

Tabelle 19: Kraftstoffbedarf und Jahresfahrleistung der Fahrzeuggruppen

Fahrzeug	Personen-kraftwagen gewerbliche Halter	Personen-kraft-wagen private Halter	LKW <3,5 t	LKW 3,5- 15 t	LKW >15 t	Sattel-züge	Land- und Forstwirt-schaftliche Zug-maschinen	Kraft-omni-busse	Sonstige
H_2-Verbrauch [kg/100km]	0,95	0,95	6	7,5	9	9	3,4	12,5	6
Jahresfahr-leistung [km]	11.864	11.864	19.000	39.000	100.000	100.000	8.000	68.000	19.000

Die Annahmen bezüglich des Anteils wasserstoffbetriebener Fahrzeuge am Gesamtbestand stammen aus der Studie „Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland“. Diese Studie differenziert verschiedene Szenarien.

Für das Szenario TN-Strom wird unterstellt, dass vermehrt elektrischen Antriebe genutzt werden. Hierfür werden günstige Batterie- und Strompreise zu Grunde gelegt. Im Szenario TN-H2 wird davon ausgegangen, dass H_2-Anwendungen für Fahrzeuge mittelfristig günstig zur Verfügung stehen und H_2 als Kraftstoff subventioniert wird. [37]

Die Anteile an Wasserstofffahrzeugen am Fahrzeugbestand für das Szenario TN-Strom im Zeitraum 2020-2050 sind in Abbildung 31 visualisiert.

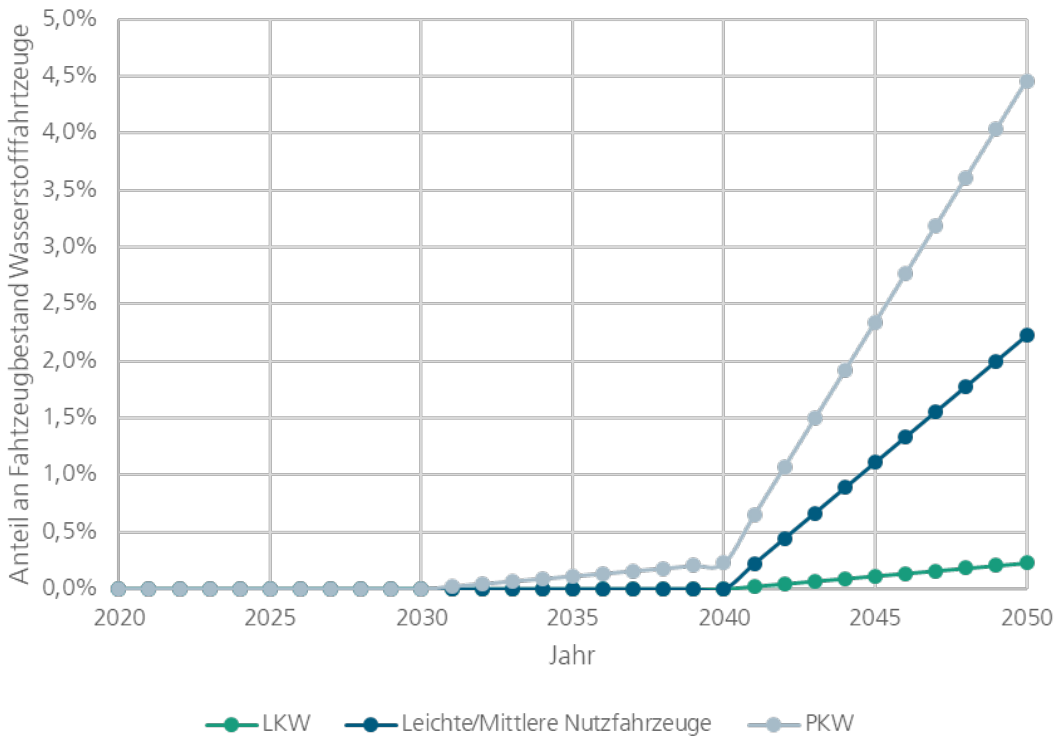


Abbildung 31: Anteil Wasserstofffahrzeuge am Fahrzeugbestand für das Szenario TN-Strom im Zeitraum 2020-2050

Abbildung 32 zeigt den Anteil Wasserstofffahrzeuge am Fahrzeugbestand für das Szenario TN-H2 im Zeitraum 2020-2050.

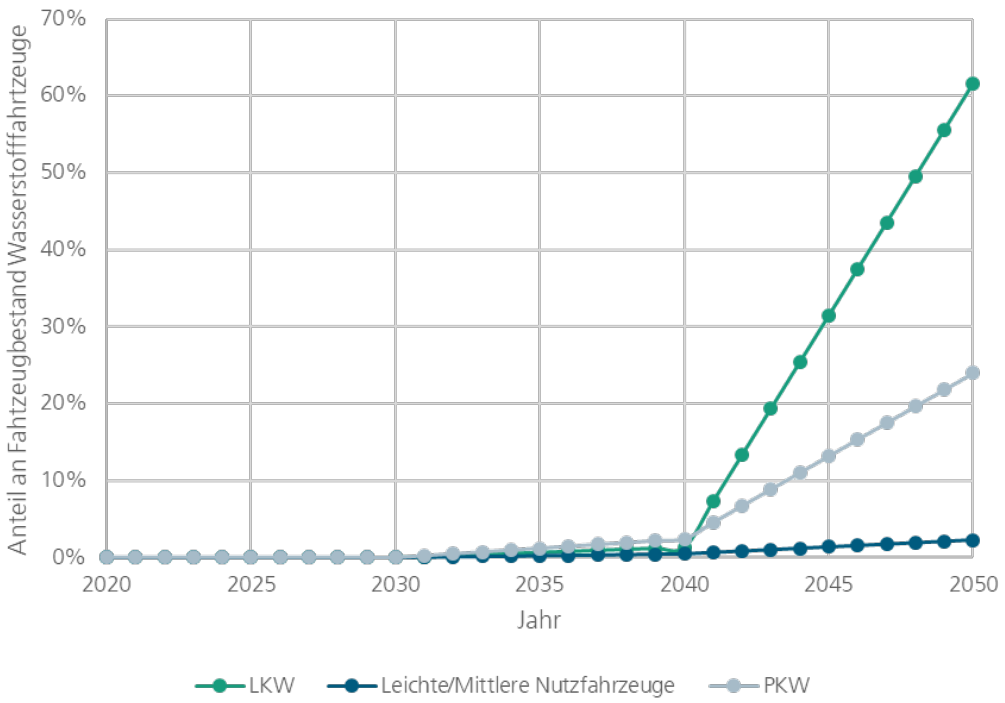


Abbildung 32: Anteil Wasserstofffahrzeuge am Fahrzeugbestand für das Szenario TN-H_2 im Zeitraum 2020 - 2050

Für das Szenario TN-Strom ergibt sich basierend auf dem für 2050 prognostizierten Fahrzeugbestand und den oben genannten Anteilen an Wasserstofffahrzeugen ein Wasserstoffbedarf in Höhe von 4.170 t im Jahr 2050. Im Jahr 2030 gibt es in diesem Szenario noch kein Wasserstoffbedarf. Die Zuordnung zu den Fahrzeuggruppen sowie die Entwicklung des Bedarfs zeigt Abbildung 33.

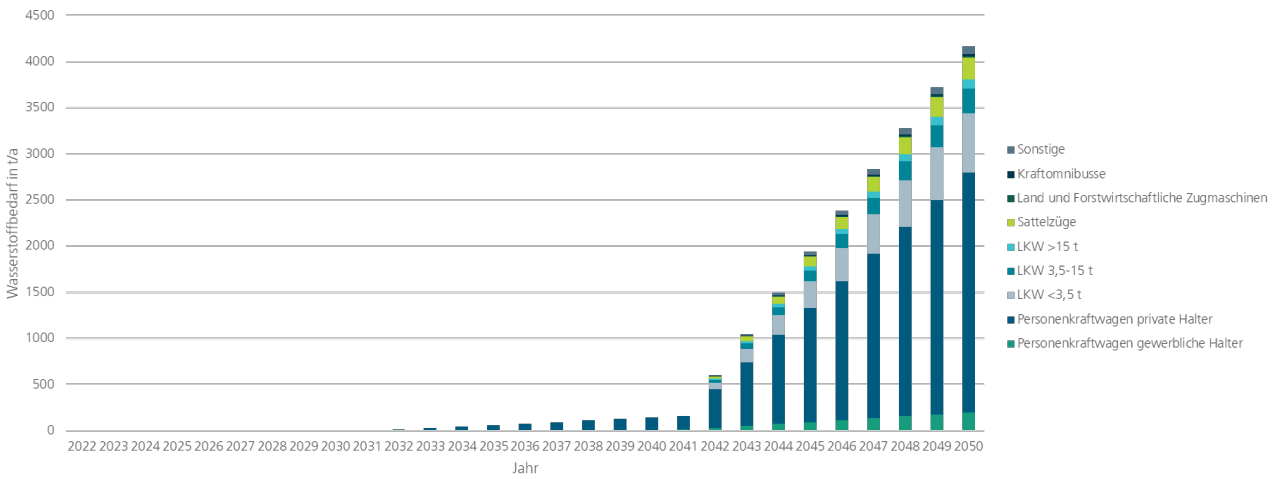


Abbildung 33: Wasserstoffbedarf im gesamten Betrachtungsgebiet (TN-Strom)

Abbildung 34 stellt den zuvor beschriebenen Wasserstoffbedarf im Szenario TN-Strom für das Jahr 2050 nach Gemeinden im Betrachtungsgebiet aufgeschlüsselt dar.

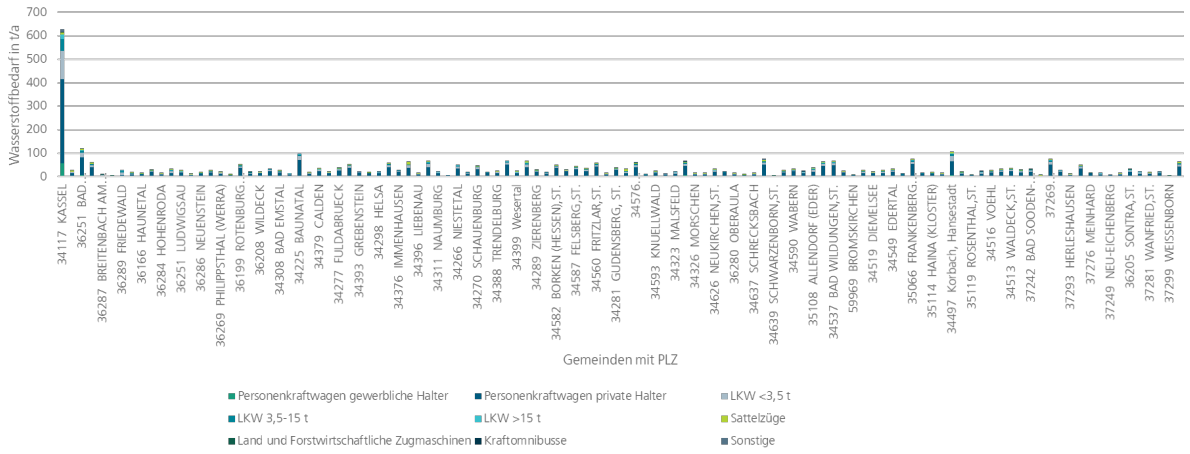


Abbildung 34: Wasserstoffbedarf im Straßenverkehr 2050 nach Gemeinden (TN-Strom)

Für das Szenario TN-H_2 ergibt sich basierend auf dem für 2050 prognostizierten Fahrzeugbestand und den in Abbildung 32 genannten Anteilen an Wasserstofffahrzeugen ein Wasserstoffbedarf in Höhe von 117.000 t im Jahr 2050. Die Zuordnung zu den Fahrzeuggruppen sowie die Entwicklung des Bedarfs zeigt Abbildung 35.

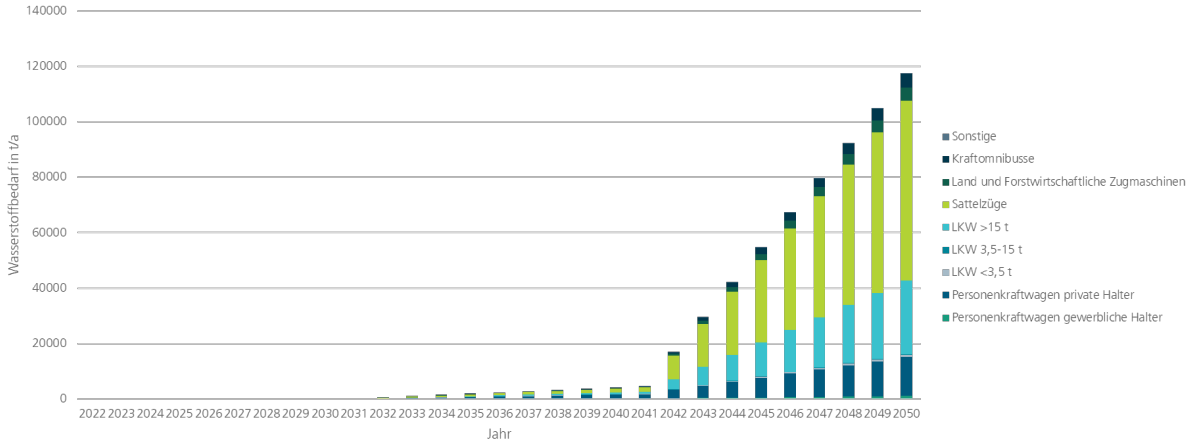


Abbildung 35: Wasserstoffbedarf im gesamten Betrachtungsgebiet (TN-H_2)

Abbildung 36 stellt den zuvor beschriebenen Wasserstoffbedarf im Szenario TN-H_2 für das Jahr 2050 nach Gemeinden im Betrachtungsgebiet aufgeschlüsselt dar.

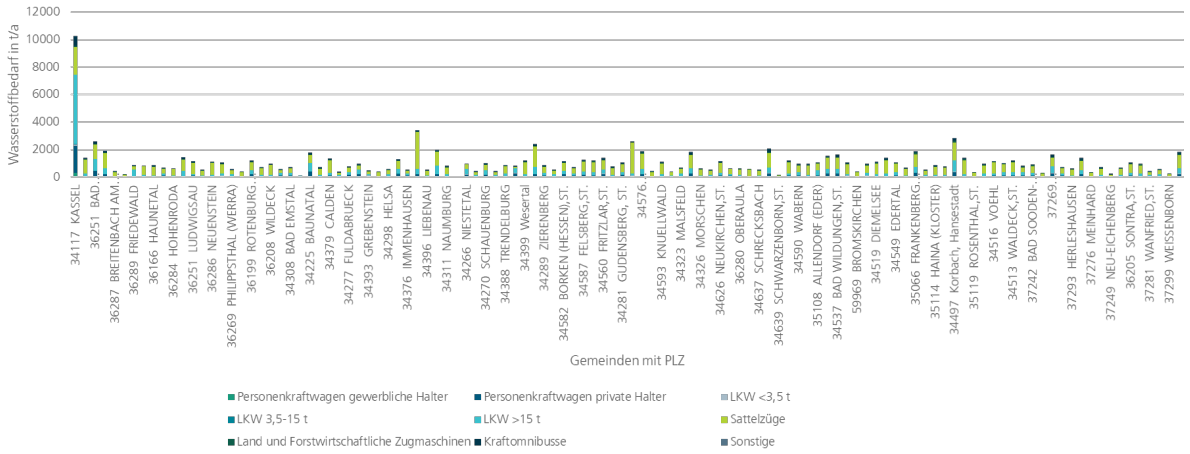


Abbildung 36: Wasserstoffbedarf im Straßenverkehr 2050 nach Gemeinden (TN-H_2)

2.1.11.2 BASt-Auswertung

Im Folgenden werden Messdaten der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) und eine Studie des Fraunhofer-Instituts für System- und Innovationsforschung (ISI) ausgewertet, um Aussagen über das zukünftige Aufkommen von wasserstoffbetriebenem Schwerlastverkehr auf den Autobahnen in Nordhessen treffen zu können.

BASt

Auf Deutschlands Autobahnen und außerörtlichen Bundesstraßen werden an automatischen Dauerzählstellen alle Kraftfahrzeuge richtungsbezogen erfasst. Die Daten werden von der Autobahn GmbH des Bundes (AdB) sowie den Bundesländern erhoben und an die BASt übermittelt [74]. Die Messwerte liegen in stundenscharfen Zeitreihen vor.

Die Fahrzeugarten, die unterschieden werden können, sind abhängig vom Gerätetyp an der Messstelle. In dieser Auswertung wird auf Daten zurückgegriffen, in denen unterschieden wird zwischen nicht klassifizierbaren Kfz, Motorrädern, Pkw ohne Anhänger, Lieferwagen ohne Anhänger, Pkw mit Anhänger, Lkw > 3,5 t ohne Anhänger (LoA), Lkw > 3,5t mit Anhänger (LmA), Sattelzügen und Bussen. Für den relevanten Schwerlastverkehr werden Busse, LoA, LmA und Sattelzüge betrachtet.

Abbildung 37 zeigt die Autobahnen in Nordhessen. Sie sind zur besseren Unterscheidung verschiedenfarbig markiert.

Abbildung 37: Karte der Autobahnen in Nordhessen (eigene Darstellung)

Abbildung 38 stellt eine detailliertere Karte Nordhessens dar. Hier werden die Standorte der einzelnen Messstellen durch einen rötlichen Pin angezeigt, die Autobahnen werden durch einen Orangeton von den anderen Straßen unterschieden. Es ist erkennbar, dass die Verteilung der Messstellen nicht in gleichbleibenden Abständen erfolgt und es kleinere Anhäufungen gibt. So finden sich an den Autobahnkreuzen Kassel-West 4 Messstellen, am Hattenbacher Dreieck im Süden der Region 3 Messstellen und vereinzelt sind direkt vor und nach Ab-/Auffahrten Messstellen installiert (VW-Werk in Baunatal, Borken, Wommen und Wildeck-Obersuhl). Die A49 und die A44 befinden sich derzeit im Ausbau. Die A49 soll bis Gießen weiterführen, die A44 soll eine direkte Autobahnverbindung zwischen Kassel und Eisenach herstellen.

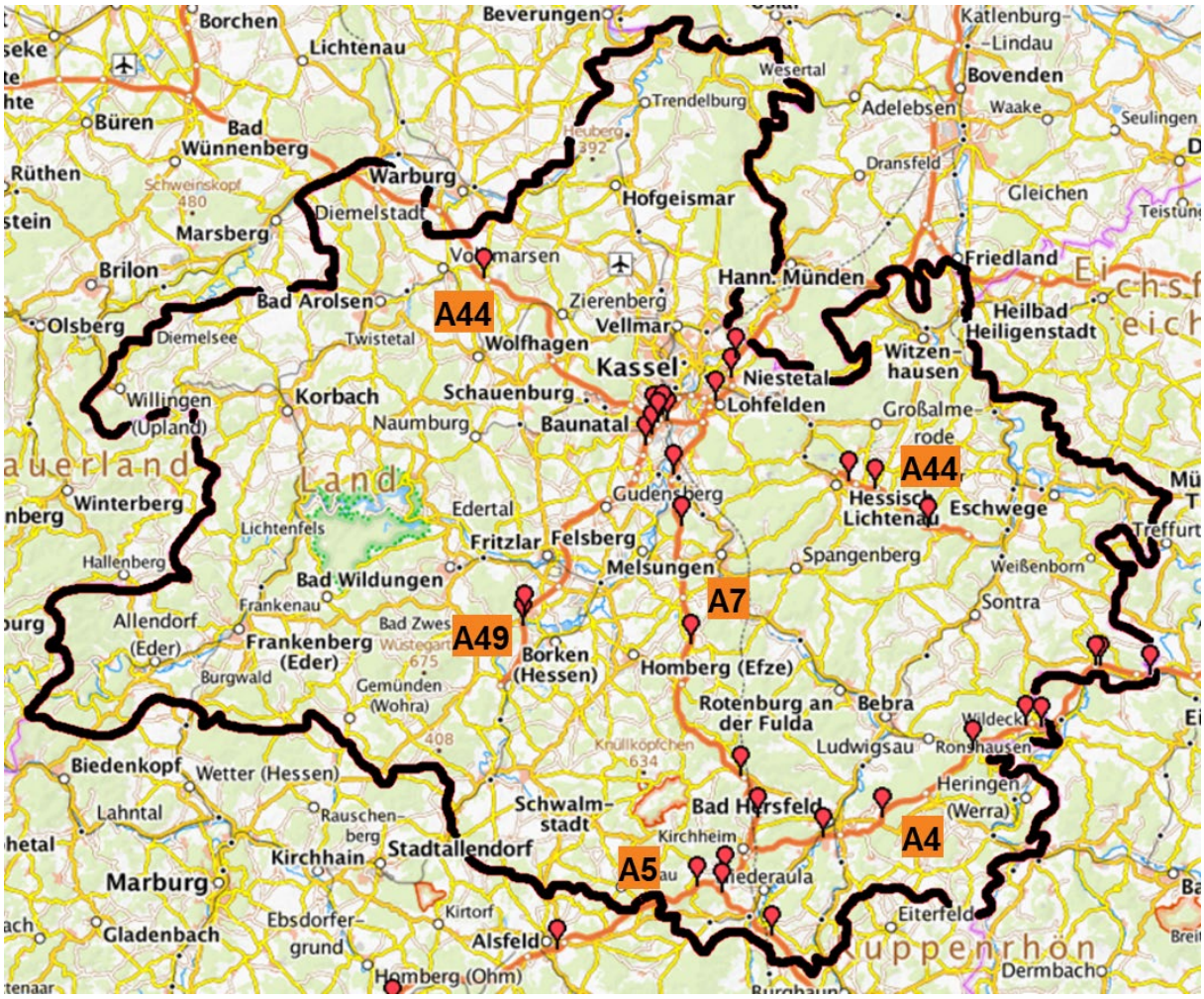


Abbildung 38: Messstellen in Nordhessen (Basiskarte mit eingezeichgneten Messpunkten von der BASt [75], Grenzverlauf Nordhessens nachträglich eingefügt)

Tabelle 20 bietet eine Übersicht über die Messstellen an Autobahnen in Nordhessen. Neben der zugehörigen Autobahn sind die Nummerierung und der Name der Messstelle angegeben. Der Name verweist für gewöhnlich auf die nächstgelegene Ortschaft, eine nahe Abfahrt oder auf ein Autobahnkreuz/-dreieck, dessen Auslastung die Messstelle aufzeichnet. Ferner werden die Fahrtrichtungen benannt, die in den Rohdaten nur mit „Richtung 1“ und „Richtung 2“ angegeben werden. In den beiden rechten Spalten ist vermerkt, ob belastbare Daten für das Jahr 2021, bzw. das Jahr 2018 vorliegen. Die genauen Gründe für das Fehlen belastbarer Messdaten werden von der BASt nicht übermittelt. Es könnte sich beispielsweise um Defekte oder langfristige Messausfälle handeln, die zu großen Lücken in den Messreihen führen.

Tabelle 20: Übersicht Messstellen auf Autobahnen in Nordhessen [75], [76]

Straße	Messstelle	Name	Richtung 1	Richtung 2	2021 Daten vorhanden?	2018 Daten vorhanden?
A4	6880	Herleshausen	Eisenach	Bad Hersfeld	Nein	Ja
	6708	Wommen (O)	Eisenach	Bad Hersfeld	Ja	Ja
	6210	Wommen (W)	Eisenach	Bad Hersfeld	Ja	Ja
	6709	Untersuhl	Eisenach	Bad Hersfeld	Ja	Ja
	6885	Obersuhl	Eisenach	Bad Hersfeld	Ja	Ja
	6884	Hönebach	Eisenach	Bad Hersfeld	Ja	Ja
	6583	Sorga	Eisenach	Bad Hersfeld	Ja	Ja
	6881	Bad Hersfeld	Eisenach	Bad Hersfeld	Ja	Nein
A5	6810	AD Hattenbach 2	AD Hattenbach (A7)	Frankfurt am Main	Ja	Ja
A7	6800	Kassel-Nord (N)	Hannover	Kassel	Nein	Ja
	6610	Heiligenrode	Hannover	Fulda	Ja	Nein
	6711	Lohfelden	Hannover	Fulda	Nein	Nein
	6603	Guxhagen	Hannover	Fulda	Ja	Ja
	6804	Melgershausen	Kassel	Fulda	Ja	Ja
	6814	Berndshausen	Kassel	Fulda	Ja	Ja
	6806	Bad Hersfeld-West	Kassel	Fulda	Ja	Ja
	6907	Obergeis	Kassel	Fulda	Ja	Ja
	6808	AD Hattenbach (N)	Kassel	Fulda	Ja	Ja
	6874	AD Hattenbach 3	Kassel	Fulda	Ja	Ja
	6875	Wetzlos	Kassel	Fulda	Ja	Ja
A44	6866	Niederelsungen	AD Kassel-Süd (A7)	Dortmund	Ja	Ja
	6868	Oberzwehren	AD Kassel-Süd (A7)	Dortmund	Nein	Nein
	6782	Dennhausen	AD Kassel-Süd (A7)	Dortmund	Nein	Ja
	6790	Hessisch Lichtenau	Eisenach	AD Kassel-Süd (A7)	Ja	Nein[1]
	6506	Walburg	Eisenach	AD Kassel-Süd (A7)	Ja	Nein *
	6791	Waldkappel	Eisenach	AD Kassel-Süd (A7)	Ja	Nein *
A49	6731	Arnsbach	Kassel	Gießen	Ja	Ja
	6929	Kleinenglis	Kassel	Gießen	Nein	Ja
	6645	Baunatal	Kassel	Gießen	Ja	Ja
	6914	Baunatal (N)	Kassel	Gießen	Ja	Ja
	6913	Rengershausen	Kassel	Gießen	Nein	Nein
	6956	Niederzwehren	AK Kassel-Mitte (A7)	Gießen	Nein	Nein

[1] Daten für die A44 bei Hessisch Lichtenau (Messstellen 6790, 6506 und 6791) nur für 2021 vorhanden, da erst ab 2020 verfügbar

Langfristszenarien

In der Studie „Langfristszenarien zur Transformation des Energiesystems in Deutschland“ werden drei Szenarien zur Erreichung der Treibhausgasneutralität in Deutschland entwickelt, von denen im Folgenden die Szenarien TN-Strom und TN-H2 genutzt werden, deren Beschreibung Kapitel 3.1.10.1 zu entnehmen ist.

Die Unterteilung in verschiedene Fahrzeugklassen beinhaltet die beiden relevanten Fahrzeugklassen „mittlere Nutzfahrzeuge“ (3,5-12 t) und „schwere Nutzfahrzeuge“ (12 t). Die restlichen Fahrzeugklassen fallen nicht in den Bereich Schwerlastverkehr.

Tabelle 21 führt die Flottenzusammensetzung je nach Szenario für die Jahre 2040 und 2050 auf. Laut Studie wird für 2030 keine nennenswerte Anzahl an Brennstoffzellenfahrzeugen (FCEV) in der Fahrzeugflotte erwartet, im Szenario TN-Strom werden FCEV für schwere Nutzfahrzeuge erst ab 2050 prognostiziert. Zudem ist der Abbildung der Anteil der FCEV an der Gesamtflotte angegeben.

Tabelle 21: Flottenzusammensetzung nach Szenarien und Jahr mit Anteil der Brennstoffzellenfahrzeuge (nach [77])

Szenario	**TN-Strom**			**TN-H2**			
Klasse	**Mittlere NF**		**Schwere NF**	**Mittlere NF**		**Schwere NF**	
Jahr	2040	2050	2050	2040	2050	2040	2050
FCEV	3.000	40.000	1.000	20.000	63.000	5.000	275.000
Diesel	120.000	10.000	7.000	105.000	5.000	315.000	20.000
BEV	290.000	400.000	186.000	290.000	382.000	125.000	155.000
HO-Diesel	-	-	224.000	-	-	-	-
HO-BEV	-	-	23.000	-	-	-	-
Summe	413.000	450.000	441.000	415.000	450.000	445.000	450.000
FCEV-Anteil	**0,73%**	**8,89%**	**0,23%**	**4,82%**	**14,00%**	**1,12%**	**61,11%**

Methodik

Basierend auf den zuvor genannten Daten wurden szenarien- und jahresabhängige Prognosen für das Aufkommen von FCEV je Messstelle erstellt. In einem ersten Schritt wurden die gesammelten Daten für den gesamten Schwerlastverkehr, bestehend aus „mittlere Nutzfahrzeuge“ (3,5-12 t) und „schwere Nutzfahrzeuge“ (12 t), jeweils für das Jahr 2021 und 2018 zusammengefasst.

In einem zweiten Schritt wurde zwischen mittleren (3,5 - 12t) und schweren (> 12t) Nutzfahrzeugen unterschieden, da auch in der Studie „Langfristszenarien zur Transformation des Energiesystems in Deutschland“ die Flottenentwicklung des Schwerlastverkehrs in diese beiden Klassen unterteilt wird. Die Aufbereitung erfolgt analog zur Aufbereitung des gesamten Schwerlastverkehrs. Der Zuordnung liegt die Annahme zugrunde, dass Lkw ohne Anhänger leichter als 12t und der restliche Schwerlastverkehr schwerer als 12t ist.

Anschließend erfolgte die Berechnung des wasserstoffbasierten Schwerlastverkehrs nach Szenario und Jahr basierend auf den Messdaten von 2021, da für dieses Jahr die aktuelleren Messdaten vorliegen. Zudem ist ein Vergleich des Schwerlastverkehrsaufkommens je Messstelle zwischen den betrachteten Jahren 2021 und 2018 erstellt worden, um zwischen dem Verkehrsaufkommen vor und während der Pandemie unterscheiden und bei Bedarf wählen zu können.

Ergebnisse der Auswertung der BASt-Daten

Abbildung 39 zeigt den durchschnittlichen konventionellen Schwerlastverkehr auf den Autobahnen in Nordhessen im Jahr 2021 in Fahrzeugen pro Tag. Der kurze Autobahnabschnitt der A44 bei Hessisch Lichtenau und der Beginn der A49 im Süden haben das geringste Schwerlastaufkommen, was durch den noch unfertigen Ausbau dieser Autobahnen erklärt werden kann. Die durchschnittlichen ca. 2.000 - 2.500 Fahrzeuge Schwerlastverkehr pro Tag an den anderen beiden Messstellen der A49 mit belastbaren Zahlen hängen mit hoher Wahrscheinlichkeit mit dem Werksverkehr des VW-Werks in Baunatal bei Kassel zusammen. Ferner zeigen die Daten eine sehr ähnliche mittlere Auslastung von 5.000 - 6.000 Fahrzeugen pro Tag auf der A4, der A5 und der A7 südlich des Hattenbacher Dreiecks. Ein höheres Aufkommen von durchschnittlich etwa 7.000 Fahrzeugen pro Tag hat die A44 Richtung Dortmund und das größte Schwerlastaufkommen hat die A7 bis zum Hattenbacher Dreieck mit bis zu durchschnittlichen 11.500 Fahrzeugen pro Tag.

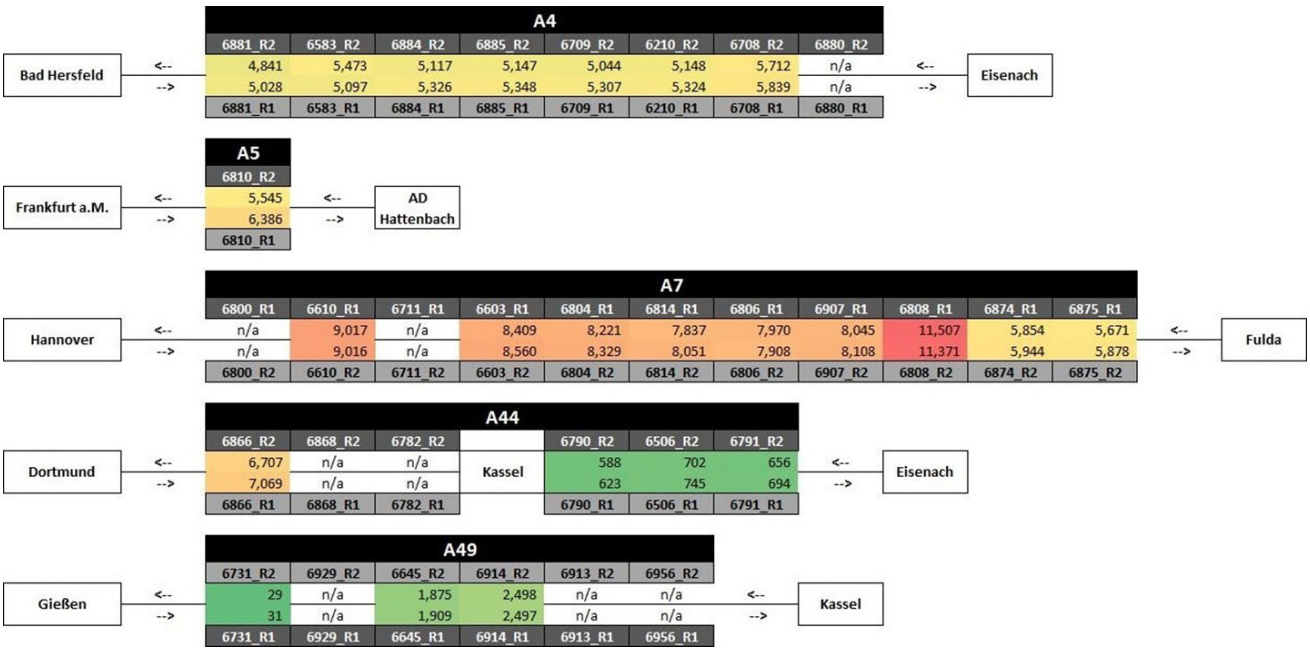


Abbildung 39: Durchschnittlicher konventioneller Schwerlastverkehr 2021 [Fahrzeuge/Tag]

Abbildung 40 zeigt Heatmaps für drei Messstellen auf unterschiedlichen Autobahnen in der Region Nordhessen. Auf der vertikalen Achse sind jeweils die Stunden des Tages von 0-1 Uhr oben bis 23-0 Uhr unten angezeigt. Von links nach rechts verlaufen die Tage des Jahres 2021. Zur besseren Übersichtlichkeit sind die jeweiligen Monate vermerkt. An allen Messstellen ist deutlich erkennbar, dass das Schwerlastverkehrsaufkommen nachts (oberer und unterer Rand der Heatmaps), an Wochenenden (dünne grüne Balken) und an Feiertagen (Ostern Anfang April und Weihnachten Ende des Jahres jeweils als dickere grüne Balken) abnimmt. Zudem sind jeweils zwei Peaks auszumachen: ein Vormittagspeak und ein Nachmittagspeak.

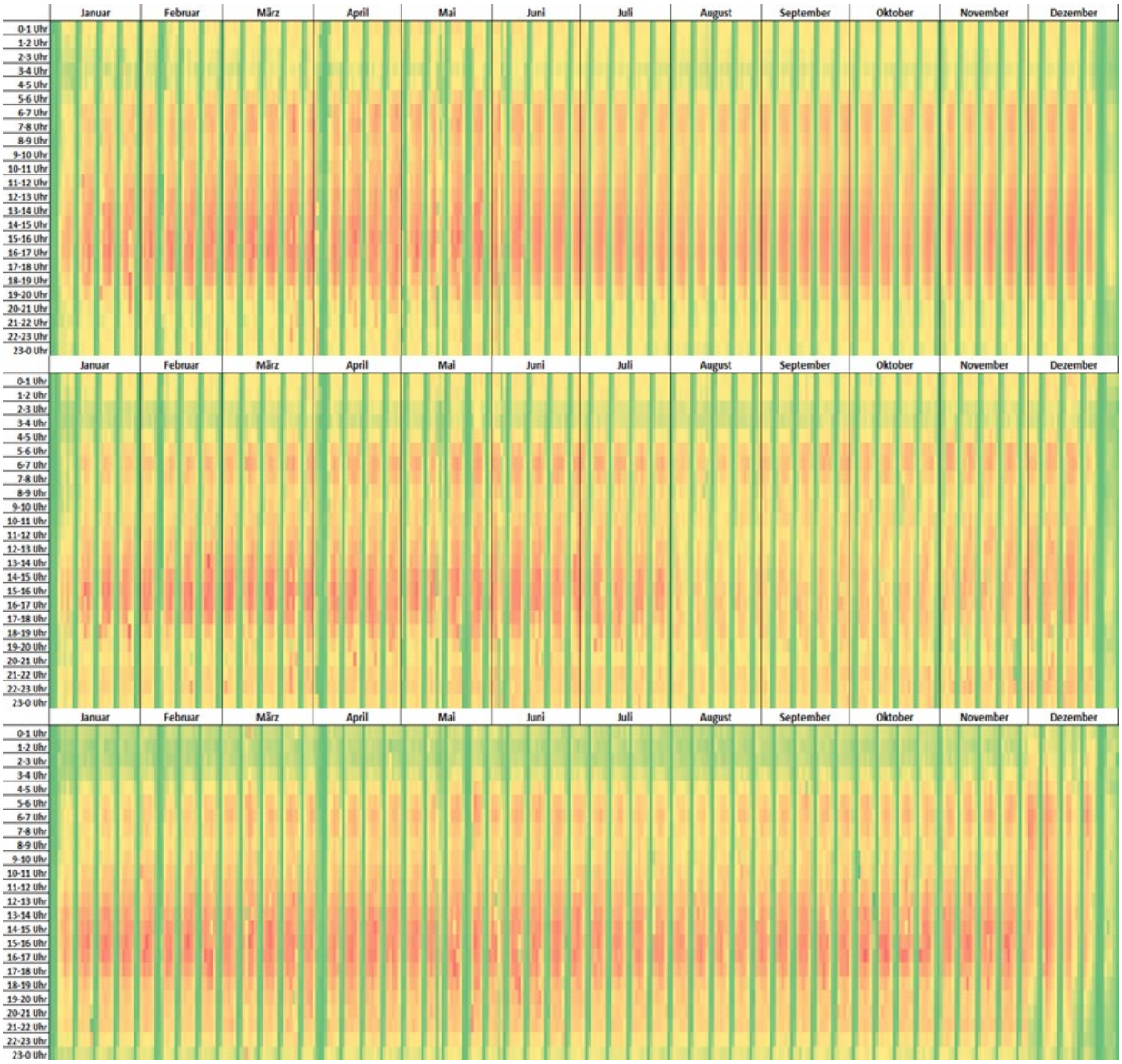


Abbildung 40: Heatmaps von Fahrtrichtung 1 von Messstellen im Jahr 2021, von unten: 6708 (A4), 6808 (A7), 6866 (A44)

Diese zwei Peaks sind auch in den Tagesverläufen für den 07.07.2021 für die drei Messstellen in Abbildung 41, Abbildung 42 und Abbildung 43 erkennbar. Exemplarisch zeigen diese drei Grafiken den Tagesverlauf an jeweils einer Messstelle.

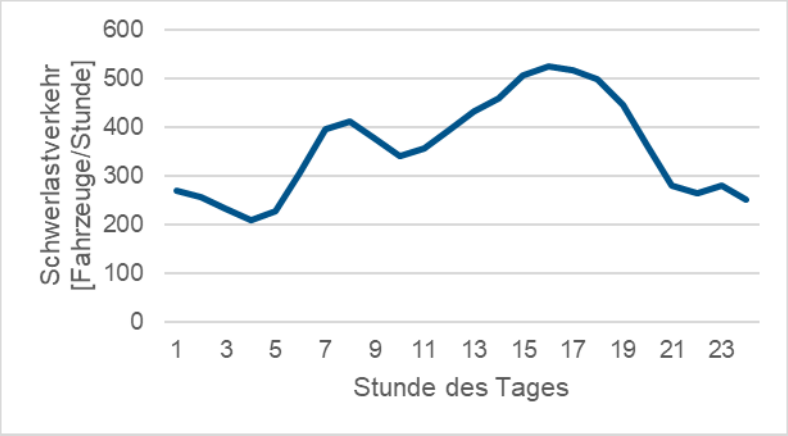


Abbildung 41: Tagesverlauf für den 07.07.2021 an der Messstelle 6708 Richtung 1(A4)

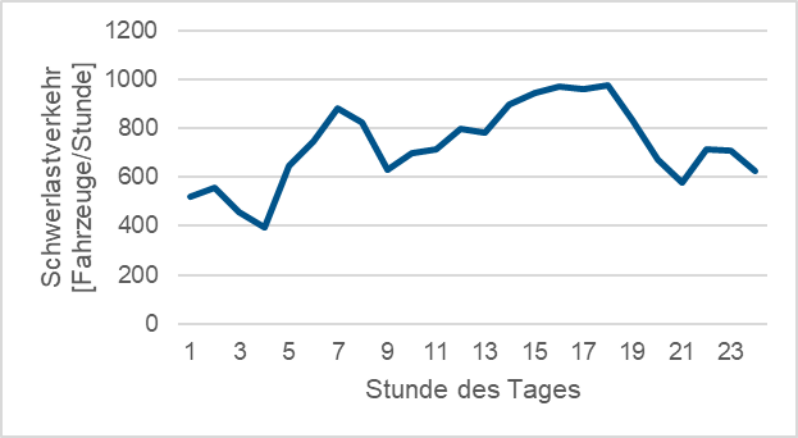


Abbildung 42: Tagesverlauf für den 07.07.2021 an der Messstelle 6808 Richtung 1(A7)

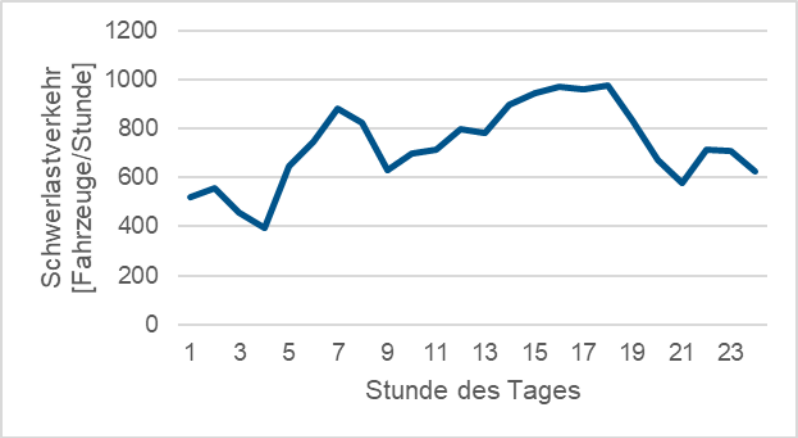


Abbildung 43: Tagesverlauf für den 07.07.2021 an der Messstelle 6866 Richtung 1 (A44)

Tabelle 22 stellt den Schwerlastverkehr an den Messstellen (beide Fahrtrichtungen kumuliert) für die Jahre 2021 und 2018 gegenüber. In der rechten Spalte ist die prozentuale Veränderung von 2018 zu 2021 für die Messstellen, die für beide Jahre belastbare Messwerte liefern,

angegeben. Für die Mehrzahl der vergleichbaren Messstellen sowie für die Summen der vergleichbaren Messstellen ist ein Anstieg des Schwerlastverkehrsaufkommens vom Jahr 2018 zum Jahr 2021 zu verzeichnen. Aus den Daten lässt sich jedoch nicht ableiten, ob dies eine normale Entwicklung war oder ob es sich um einen pandemiebedingten Anstieg handelt.

Tabelle 22: Vergleich des durchschnittlichen täglichen Schwerlastverkehrsaufkommens je Messstelle in den Jahren 2021 und 2018

Straße	Messstelle	Tagesdurchschnitt 2021	Tagesdurchschnitt 2018	Veränderung von 2018 zu 2021
A4	6880	-	11.011	-
	6708	11.550	11.088	4,2%
	6210	10.471	10.109	3,6%
	6709	10.351	9.975	3,8%
	6885	10.495	10.153	3,4%
	6884	10.443	10.091	3,5%
	6583	10.570	10.581	-0,1%
	6881	9.869	-	-
A5	6810	11.931	12.414	-3,9%
A7	6800	-	17.385	-
	6610	18.034	-	-
	6711	-	-	-
	6603	16.970	16.956	0,1%
	6804	16.550	16.084	2,9%
	6814	15.889	15.352	3,5%
	6806	15.878	15.188	4,5%
	6907	16.153	15.356	5,2%
	6808	22.878	22.271	2,7%
	6874	11.798	11.571	2,0%
	6875	11.549	11.213	3,0%
A44	6866	13.777	14.539	-5,2%
	6868	-	-	-
	6782	-	11.902	-
	6790	1.211	-	-
	6506	1.447	-	-
	6791	1.350	-	-

A49	6731	60	134	-55,0%
	6929	-	1.499	-
	6645	3.785	3.769	0,4%
	6914	4.995	5.138	-2,8%
	6913	-	-	-
	6956	-	-	-
Summe vergleichbarer Messstellen		226.093	221.984	1,9%

Zusammenführung der Ergebnisse der BASt-Daten mit den Szenarien der Studie

Im Folgenden werden die analysierten Daten der BASt mit den Szenarien der o.g. Studie kombiniert, um eine Vorhersage zum künftigen, wasserstoffbetriebenen Schwerlastverkehr in Nordhessen zu treffen.

Abbildung 44 zeigt den täglich zu erwartenden wasserstoffbasierten Schwerlastverkehr auf allen betrachteten Autobahnen im Jahr 2040 für das Szenario TN-Strom. Es ist das Szenario und Jahr mit dem geringsten prognostizierten FCEV-Aufkommen.

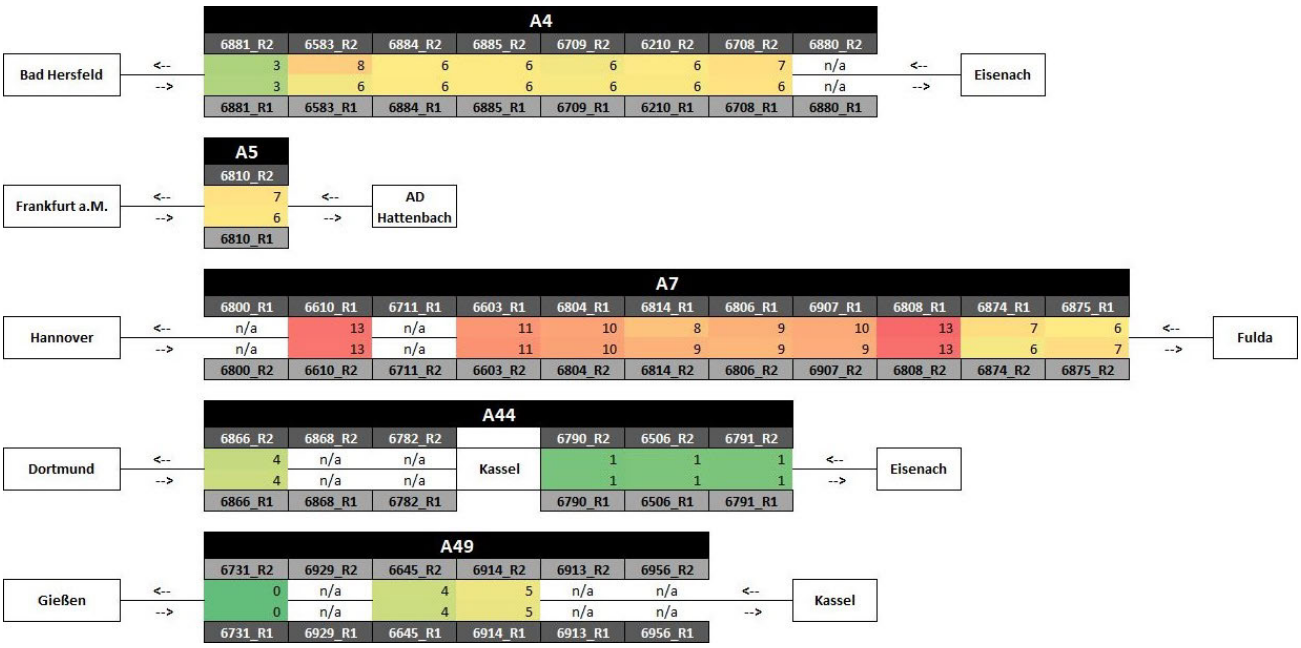


Abbildung 44: Durchschnittlicher wasserstoffbasierter Schwerlastverkehr nach Szenario TN-Strom in 2040 [Fahrzeuge/Tag] (Datenbasis: 2021)

Abbildung 45 zeigt den täglich zu erwartenden wasserstoffbasierten Schwerlastverkehr auf allen betrachteten Autobahnen im Jahr 2050 für das Szenario TN-H2. Es ist das Szenario und Jahr mit dem höchsten prognostizierten FCEV-Aufkommen.

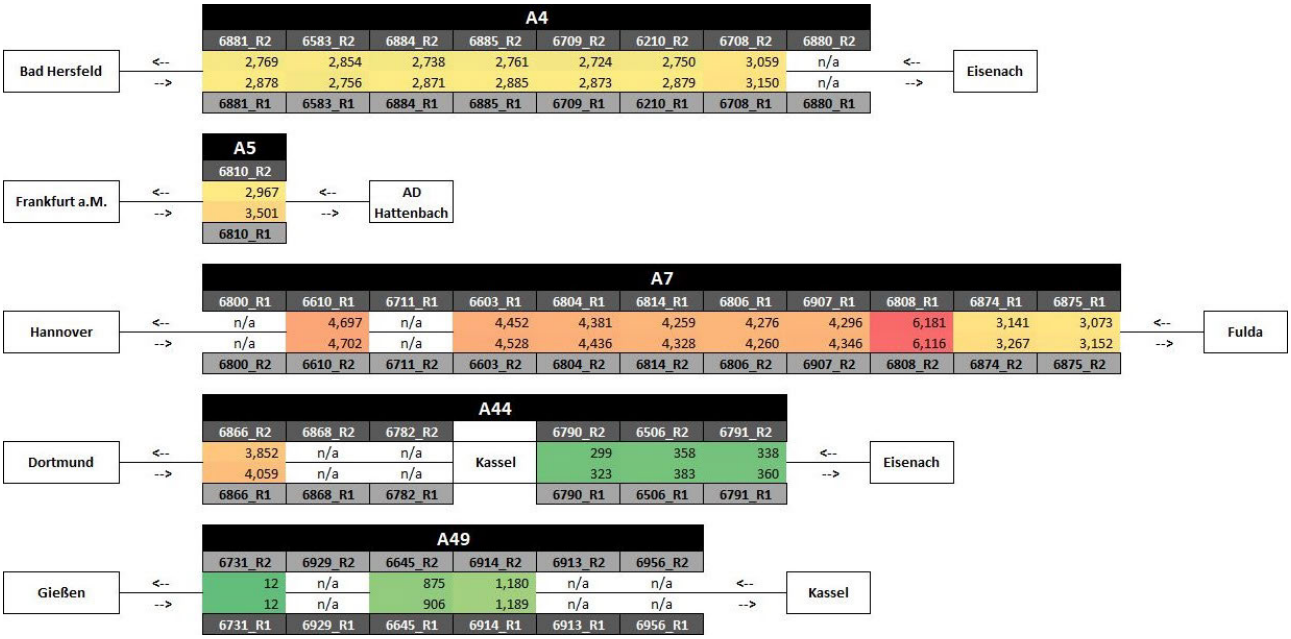


Abbildung 45: Durchschnittlicher wasserstoffbasierter Schwerlastverkehr nach Szenario TN-H_2 in 2050 [Fahrzeuge/Tag] (Datenbasis: 2021)

Abbildung 46 zeigt beispielhaft für die A7eine Auswertung für die betrachteten Szenarien (Realität = 2021, TN-Strom, TN-H2) und die betrachteten Jahre (2021, 2040, 2050). So wird ein Vergleich zwischen dem heutigen Verkehr (Szenario Realität (unten)), dem zukünftigen vorwiegend elektrischen (TN-Strom (oben)) sowie dem zukünftigen großteils wasserstoffbasierten Schwerlastverkehr (TN-H2 (Mitte)) ermöglicht, wobei die zukünftigen Szenarien (TN-Strom und TN-H2) nur die Anzahl der FCEV-Fahrzeuge angibt wohingegen das Szenario Realität alle Fahrzeuge erfasst. Für die die zukünftigen Szenarien wird eine große Spannbreite an FCEV-Fahrzeugen zwischen den Szenarien deutlich – insbesondere für das Jahr 2050.

	Szenario	Jahr												
FCEV-Schwerlastverkehr	TN-Strom	2040	Hannover	6800_R1	6610_R1	6711_R1	6603_R1	6804_R1	6814_R1	6806_R1	6907_R1	6808_R1	6874_R1	6875_R1	Fulda
				n/a	13	n/a	11	10	8	9	10	13	7	6	
				n/a	12	n/a	11	10	9	9	9	13	6	7	
				6800_R2	6610_R2	6711_R2	6603_R2	6804_R2	6814_R2	6806_R2	6907_R2	6808_R2	6874_R2	6875_R2	
		2050		6800_R1	6610_R1	6711_R1	6603_R1	6804_R1	6814_R1	6806_R1	6907_R1	6808_R1	6874_R1	6875_R1	
				n/a	170	n/a	145	137	115	127	132	183	93	85	
				n/a	169	n/a	149	139	127	123	130	179	81	94	
				6800_R2	6610_R2	6711_R2	6603_R2	6804_R2	6814_R2	6806_R2	6907_R2	6808_R2	6874_R2	6875_R2	
	TN-H2	2040		6800_R1	6610_R1	6711_R1	6603_R1	6804_R1	6814_R1	6806_R1	6907_R1	6808_R1	6874_R1	6875_R1	
				n/a	165	n/a	148	143	130	136	139	196	100	95	
				n/a	165	n/a	151	145	137	134	139	193	95	101	
				6800_R2	6610_R2	6711_R2	6603_R2	6804_R2	6814_R2	6806_R2	6907_R2	6808_R2	6874_R2	6875_R2	
		2050		6800_R1	6610_R1	6711_R1	6603_R1	6804_R1	6814_R1	6806_R1	6907_R1	6808_R1	6874_R1	6875_R1	
				n/a	4,697	n/a	4,452	4,382	4,259	4,276	4,296	6,181	3,141	3,073	
				n/a	4,702	n/a	4,528	4,436	4,328	4,260	4,346	6,117	3,267	3,152	
				6800_R2	6610_R2	6711_R2	6603_R2	6804_R2	6814_R2	6806_R2	6907_R2	6808_R2	6874_R2	6875_R2	
Diesel	Realität	2021		6800_R1	6610_R1	6711_R1	6603_R1	6804_R1	6814_R1	6806_R1	6907_R1	6808_R1	6874_R1	6875_R1	
				n/a	9,017	n/a	8,409	8,221	7,837	7,970	8,045	11,507	5,854	5,671	
				n/a	9,016	n/a	8,560	8,329	8,051	7,908	8,108	11,371	5,944	5,878	
				6800_R2	6610_R2	6711_R2	6603_R2	6804_R2	6814_R2	6806_R2	6907_R2	6808_R2	6874_R2	6875_R2	

Abbildung 46: Durchschnittliche FCEV-Schwerlastfahrzeuge nach Szenario und Jahr auf der A7 auf Basis der Szenarien TN-Strom und TN-H2 und im Vergleich zu den Messdaten von 2021 (Realität)

2.1.11.3 Flughafen Calden

Berechnungsgrundlage

Beim Flughafen Kassel Airport in Calden handelt es sich um einen kleinen Flughafen mit einer Start- und Landebahn, der sowohl Passagier- als auch Frachtverkehr ermöglicht. Der Flughafen hat eine Gesamtfläche von 220 ha (0,22 km²) und die Flugzeugflotte besteht aus zwei Airbus A320 (für 174 Passagiere) und einer Dornier 328JET (für 33 Passagiere). Vor Ort werden die Flugzeuge mit Kerosin (Jet A1) betankt. Mittelfristig wird die Anpassung des Flugbetriebs an synthetische Kraftstoffe sowie an alternative Antriebstechnologien, wie z.B. Elektroantriebe, angestrebt. [78], [79], [80], [81], [82], [83]

Tabelle 23 zeigt die aufsummierten Flugbewegungen der Jahre 2017 und 2018 aufgeschlüsselt nach Passagieren und transportierter Fracht. Tabelle 24 listet die Flugziele für den Sommer 2022 sowie den Winter 2022/2023 auf.

Tabelle 23: Flugbewegungen der Jahre 2017 und 2018 aufgeschlüsselt nach Passagieren und transportierter Fracht; Öffentliche Daten des Kassel Airport [78]

Jahr	Flugbewegungen	Passagiere	Fracht [t]
2018	31.123	131.817	206,09
2017	25.430	69.810	1.028.,79

Tabelle 24: Flugziele vom Kassel Airport

Flugziele	Flüge pro Woche (Sommer `22)	Flüge pro Woche (Winter `22/`23)	Flüge pro Jahr
Palma de Mallorca	4		106
Heraklion	2		52
Rhodos	1		26
Antalya	2 (ab Juni)		43
Hurghada	2	1	79
Fuerteventura	2	1	79
Gran Canaria		1	25
Teneriffa		1	26
Sylt	1		26
Usedom	1		26
Kuusamo		Gruppen-/Sonderflüge	
Südkreta		Gruppen-/Sonderflüge	
Summe	15	4	488

Methodik

Um den Wasserstoffbedarf des Flughafens zur Herstellung von eKerosin zu ermitteln, werden die Flugpläne des Kassel Airports für Mai 2022 bis April 2023 herangezogen. Anhand der Flugkilometer, die mittels Flight-Trackingdaten bestimmt werden, sowie des Treibstoffverbrauchs der einzelnen Flugzeugtypen wird der Kerosinbedarf berechnet. Abhängig vom angestrebten Anteil von eKerosin am Treibstoff wird basierend auf Prozessleistungsmodellen von Kraftstoffsynthesen der Wasserstoffbedarf des Flughafens ermittelt. Dazu werden drei Szenarien betrachtet: der von der EU geplante SPK-Anteil (Synthetic Paraffinic Kerosene, deutsch: synthetisches paraffinisches Kerosin) von 0,7 % im Jahr 2030, der von Deutschland geplante SPK-Anteil von 2 % im Jahr 2030 sowie der derzeit maximal erlaubte Beimischungsanteil von 50 %. Es wird unterstellt, dass die Flugzeuge nur für den Hinflug betankt werden. [84], [85], [86]

Zur Berechnung des durchschnittlichen Kerosinverbrauchs des Airbus A320 wurde die Masse des Verbrauchten Kerosins auf einem Flug von Los Angeles nach New York durch die Distanz der geflogenen Strecke geteilt [87]. Die Flugdistanz wurde aus den Distanzen von vier Flügen auf dieser Strecke von einer Flight-Tracking-Plattform gemittelt. Der sich ergebene durchschnittliche Kerosinverbrauch des A320 beträgt 3,42 l/km. Um den absoluten Kerosinverbrauch einer Flugverbindung zu berechnen, wird die, wenn möglich aus mehreren Flügen gemittelte, Flugdistanz der jeweiligen Verbindung herangezogen. Für die Dornier 328JET ist ein Verbrauch von 1000 l/h Flugzeit bekannt. Um den absoluten Verbrauch einer Flugverbindung zu berechnen, wird die im Flugplan jeweils veranschlagte Flugdauer herangezogen. Die hier beschriebenen Annahmen zum Kraftstoffverbrauch der Flugzeuge beruhen auf Durchschnittswerten und können je nach Wetterlage, realer Flugzeit, der Auslastung des Flugzeugs sowie etwaigen Kurskorrekturen variieren. [88], [89], [87], [90], [91], [92], [93], [94], [95]

Synthetische Kraftstoffe werden über den ausgereiften Prozess der Fischer-Tropsch-Synthese hergestellt. Dafür wird aus kohlen- und wasserstoffhaltigen Ausgangstoffen (meist Erdgas oder Kohle) ein Synthesegas erzeugt. Aus diesem werden verschiedene langkettige Kohlenwasserstoffe synthetisiert, die das flüssige Syncrude (Synthetic Crude Oil, deutsch: synthetisches Rohöl) bilden. Das Syncrude kann in einem weiteren Schritt zu Kraftstoffen aufbereitet werden. Der Prozess ist in Abbildung 47 veranschaulicht.

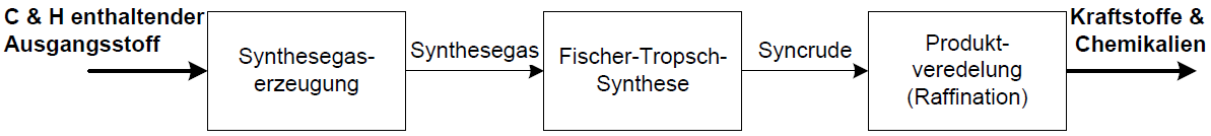


Abbildung 47: Allgemeines Blockschaltbild einer Kraftstoffherstellung mittels Fischer-Tropsch-Synthese [96]

Aufgrund der unterschiedlichen Anteile verschiedener Kohlenwasserstoffe im Syncrude entstehen während der Aufbereitung nicht nur das e-Kerosin, sondern auch Kohlenwasserstoffe mit anderen Kettenlängen. [96], [97], [98]

Synthetisches Kerosin wird mittels der Fischer-Tropsch-Synthese hergestellt. Diese erzeugt Kohlenwasserstoffe (KWS) unterschiedlicher Kettenlängen. Kurzkettige Kohlenwasserstoffe werden Benzin zugeordnet, langkettige Diesel. Kohlenwasserstoffe, die dazwischen liegen, werden, ohne eindeutige Vorgabe, Kerosin zugeordnet. Eine mögliche Zuteilung der Kettenlängen ist in Tabelle 25 dargestellt. Die Anteile der jeweiligen Kettenlängen in synthetischen Kerosinen (SPKs) sind prozess- und herstellerabhängig. [96], [97]

Tabelle 25: Zuteilung der Kohlenwasserstoffkettenlängen zu den Fraktionen [96]

Fraktion	Kettenlänge
Gase	$C_1 – C_4$
Flüssige Kohlenwasserstoffe	$C_5 – C_{20}$
Benzin	$C_5 – C_8$
SPK-Fraktion	$C_8 – C_{17}$
Diesel	$C_{17} – C_{20}$
Wachse	$> C_{20}$

Um aus dem Bedarf an Kerosin auf die benötigte Menge Wasserstoff zu schließen, bedarf es Annahmen zum Output der Fischer-Tropsch-Synthese, da das Endprodukt aus unterschiedlich langen Kohlenwasserstoffketten besteht. Zur Berechnung des Wasserstoffbedarfs am Kassel Airport werden die folgenden Annahmen getroffen:

- SPK-Anteil am Output der Kraftstoffsynthese: 72,5 %
- Spezifischer Wasserstoffinput: 0,703 t_{H2}/t_{SPK}
- Spezifischer Kohlendioxidinput: 5,315 t_{CO2}/t_{SPK}
- Spezifischer KWS-Nebenproduktoutput: 0,338 t_{Benzin}/t_{SPK} und 0,041 t_{Diesel}/t_{SPK}

Ergebnisse

Die Bedarfe für SPK und Wasserstoff für den Kassel Airport, die sich aus den untersuchten Szenarien ergeben, sind in Tabelle 26 dargestellt.

Tabelle 26: Wasserstoffbedarf für die verschiedenen Szenarien

Szenario	Anteil Beimischung	Kerosinbedarf Calden [m³/a]	Kerosinbedarf Calden [t/a]	Bedarf SPK [t/a]	H_2-Bedarf [t/a]
EU 2030	0,7 %	4.628	3.703	26	**18**
DE 2030	2 %			74	**52**
Aktuelles Maximum	50 %			1.851	**1.302**

Der jährliche Wasserstoffbedarf zur Erfüllung der Ziele von Deutschland und der EU für 2030 ist mit 52 t und 18 t sehr gering. Um den maximalen Beimischungsanteil von 50 % auszunutzen, sind 1.302 t Wasserstoff pro Jahr notwendig. In Deutschland existiert bereits eine Kleinanlage zur Produktion von eKerosin [98]. Aufgrund des geringen Wasserstoffbedarfs ist für den Kassel Airport ggf. eine solche Produktionsanlage für eKerosin denkbar.

2.1.11.4 Kurhessenbahn

Methodik

In diesem Abschnitt wurde der potenzielle Wasserstoffbedarf durch die Kurhessenbahn untersucht. Dabei wurden die Eignung der jeweiligen Linie für die Verwendung von wasserstoffbetriebenen Treibwagen, der Bedarf, der sich nach dem Fahrplan von 2022 für diese Strecke ergibt und der Einfluss zukünftiger Entwicklungen auf die Beurteilung analysiert. Für die Eignung einer Strecke muss die derzeitige Traktionsart der Strecke sowie die Streckenlänge nicht elektrifizierter Abschnitte berücksichtigt werden [99]. Für die Ermittlung des potenziellen Bedarfs an Wasserstoff wurden die Jahreskilometer der Linie und der durchschnittliche Verbrauch des Coradia iLint von Alstom [100] verwendet. Die Jahreskilometer wurden aus den Fahrplänen für 2022 [101], [102], [103], [104] und den Streckenlängen ermittelt. Bei dem Aspekt der zukünftigen Entwicklung wurden geplante Ausbaumaßnahmen sowie der Zeitpunkt der nächsten Ausschreibung der Streckennutzung berücksichtigt [105]. Im Rahmen dieser Untersuchung wurden zwei Fahrzeugtypen berücksichtigt – Batterie-Oberleitungszüge (engl.: Battery Electric Multiple Unit, BEMU) und wasserstoffbetriebene Triebzüge (engl.: Fuel Cell Electric Multiple Unit, FCEMU), die entweder ausschließlich auf Wasserstoffbasis betrieben werden (H2-only) oder die elektrifizierten Teilstrecken nutzen.

Linien der Kurhessenbahn

Im ersten Schritt wurde eine Bestandsaufnahme der Linien der Kurhessenbahn durchgeführt. Stand 2022 umfasst die Kurhessenbahn 7 Linien. Eine genauere Aufschlüsselung der Ergebnisse sind in der Tabelle 27 aufgeführt. Die Tabelle beinhaltet den Streckenverlauf und den Grad der Elektrifizierung. Beim Streckenverlaufs sind die Start- und Zielhaltestelle für die jeweilige Linie aufgeführt. Aus dem Grad der Elektrifizierung der einzelnen Strecken geht hervor, dass lediglich die RB 38 vollelektrifiziert ist. Bei den restlichen Linien liegt eine teilweise Elektrifizierung vor.

Tabelle 27: Linien der Kurhessenbahn [106]

Linie	Streckenverlauf	Zusatzinformationen	Elektrifizierung
RB 4	Kassel-Wilhelmshöhe – Korbach		Teilweise
RT 4	Kassel Hbf – Wolfhagen		Teilweise
RB 94	Marburg – Bad Laasphe – Erndtebrück		Teilweise
RB 93/94	Erndtebrück – Siegen – Betzdorf	Zwei Zugpaare an Samstagen	Teilweise
RB 39	Kassel Hbf – Wabern – Bad Wildungen		Teilweise
RB 38	Kassel Hbf – Treysa	Einzelne Züge	Vollelektrifiziert
RB 97/RE 97	Marburg – Frankenberg – Korbach – Brilon Stadt		Teilweise

Die Abbildung 48 zeigt den Liniennetzplan der Kurhessenbahn.

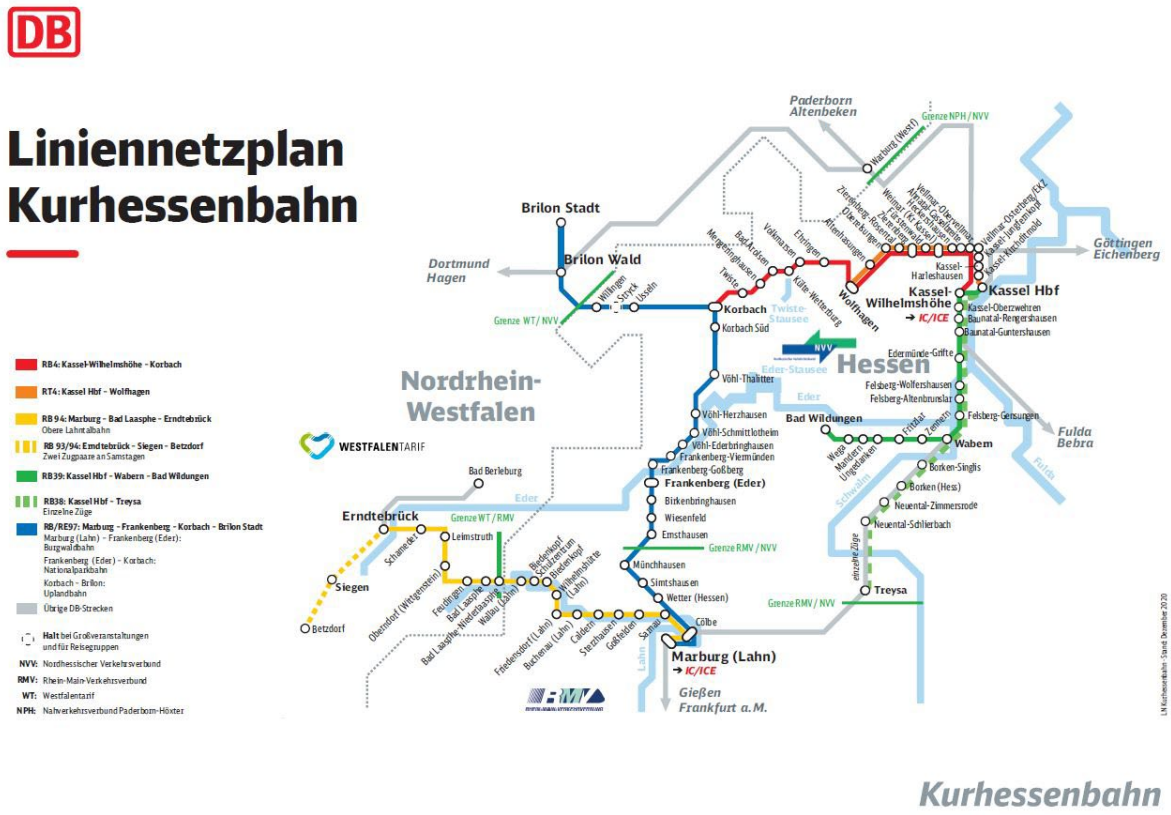


Abbildung 48: Liniennetzplan der Kurhessenbahn [106]

Ausgehend von dem aktuellen Stand der Elektrifizierung der einzelnen Linien wird im Folgenden die bereits geplante Entwicklung analysiert. Aufträge für Streckenausbau sowie -betrieb werden über Ausschreibungen vergeben. Deshalb werden im folgenden Abschnitt der Zeitpunkt der nächsten Ausschreibung und die Veränderungen an der Strecke näher betrachtet.

Eignung für FCEMU

Die Tabelle 28 gibt einen Überblick über die Ausschreibungen und die Ausbaupläne für die Linien der Kurhessenbahn inklusive weiterer Details für die Ausbaupläne der Linie RB4 und RT4. Im Rahmen des Ausbaus wird die Linie RT4 vollelektrifiziert. Der Ausbau wird in dem Zeitraum 2022 bis 2029 durchgeführt. Dabei ist eine Teilstrecke der RB4 zwischen Obervellmar und Wolfhagen von dem Ausbau der RT4 betroffen. Für die übrigen Strecken liegen keine Ausbaupläne vor und sie werden nicht von anderen Maßnahmen tangiert.

Tabelle 28: Ausschreibungen und Ausbaupläne für die Linien der Kurhessenbahn

Linie	Streckenverlauf	Letzte Ausschreibung [105]	Nächste Ausschreibung [105]	Ausbaupläne
RB 4	Kassel-Wilhelmshöhe – Korbach	2017	2032	Teilstrecke Obervellmar – Wolfhagen von Ausbau der RT 4-Strecke betroffen
RT 4	Kassel Hbf – Wolfhagen	2013	2023	Vollelektrifizierung durch Ausbau der Strecke Obervellmar – Wolfhagen von 2022 bis 2029 [107]
RB 38	Kassel Hbf – Treysa	2017	2032	-
RB 39	Kassel Hbf – Bad Wildungen	2017	2032	-
RB 93/94	Erndtebrück – Betzdorf	2014	2030	-
RB 94	Marburg – Erndtebrück	2017	2032	-
RB/RE 97	Marburg – Brilon Stadt	2017	2032	-

Für die weiteren Auswertungen werden Informationen über die Länge der nicht-elektrifizierten Strecken in km und die maximale Distanz benötigt. In der Tabelle 29 sind diese für die jeweiligen Linien für den Zeitpunkt nach dem Ausbau aufgeführt. Infolge des Ausbaus sind die Linien RT4 und RB38 vollelektrifiziert.

Tabelle 29: Übersicht über die einzelnen nicht-elektrifizierten Strecken und der maximalen Distanz über nicht elektrifizierte Strecken für die Linien der Kurhessenbahn nach dem Ausbau

Linie	Streckenverlauf	Nicht-elektrifizierte Strecke (nach Ausbau) in km	Maximale Distanz über nicht-elektrifizierte Strecke (nach Ausbau) in km
RB 4	Kassel-Wilhelmshöhe – Korbach	39,8	79,6
RT 4	Kassel Hbf – Wolfhagen	0	0
RB 38	Kassel Hbf – Treysa	0	0
RB 39	Kassel Hbf – Bad Wildungen	17,1	34,2
RB 93/94	Erndtebrück – Betzdorf	28,8	57,6
RB 94	Marburg – Erndtebrück	59,6	119,2
RB/RE 97	Marburg – Brilon Stadt	98,1	196,2

Diese Untersuchungsergebnisse werden in der Abbildung 49 mittels eines Kartenauszugs für das Gebiet der Kurhessenbahn veranschaulicht. Dabei sind die roten Strecken elektrifiziert, die schwarzen Strecken nicht elektrifiziert und bei den blauen Strecken ist die Elektrifizierung geplant.

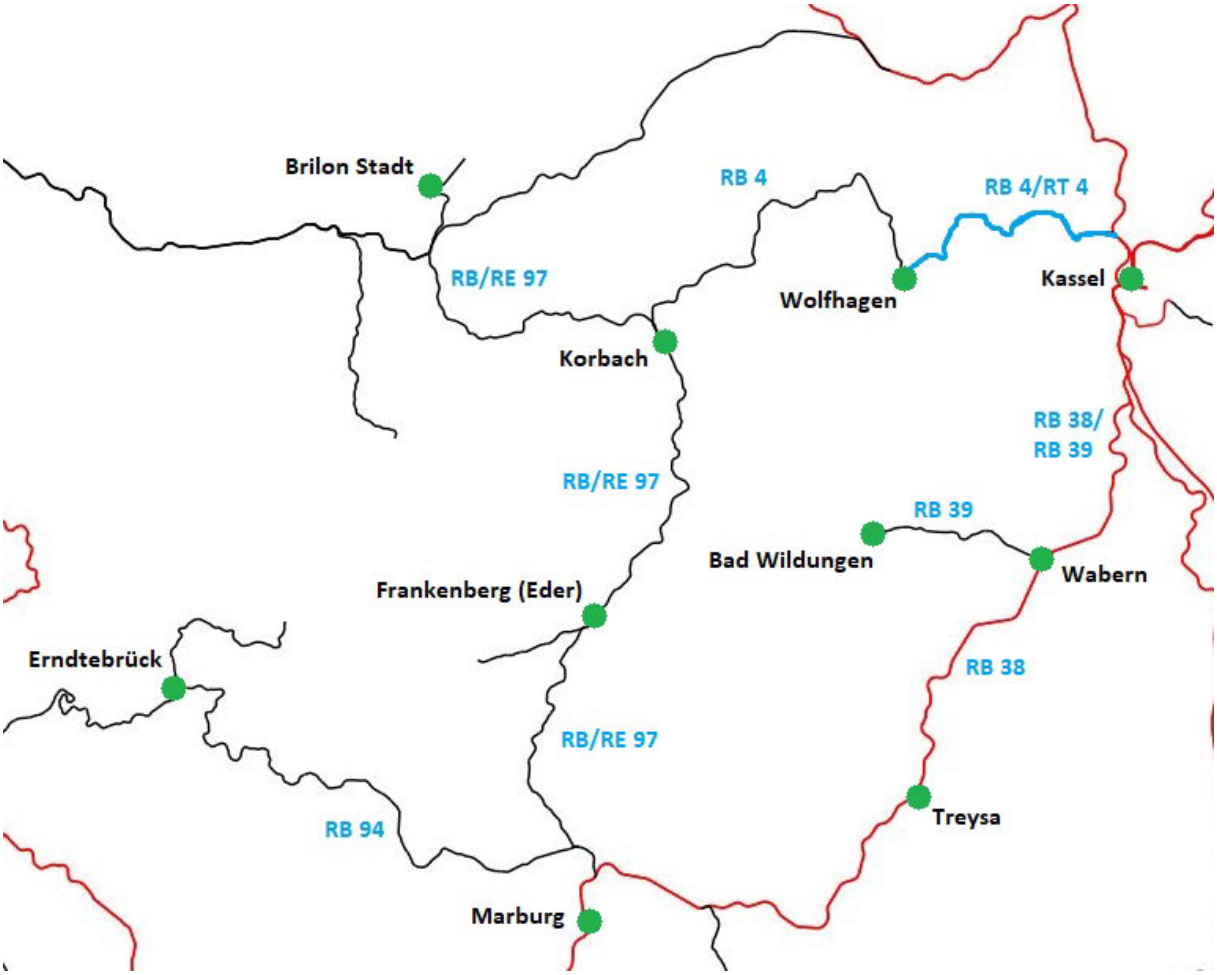


Abbildung 49: Kartenauszug des Untersuchungsgebiets mit eigener Beschriftung [99]

Unter Berücksichtigung des Grades der Elektrifizierung nach dem Ausbau lassen sich die Linien bezüglich ihrer Eignung für den Einsatz von FCEMU in die drei Kategorien „geeignet“, „bedingt geeignet“ und „nicht geeignet“ unterteilen. Als „geeignet“ wurden die Linien RB 94 und RB/RE 97 eingestuft, bei denen es sich um diejenigen mit den längsten Strecken ohne Elektrifizierung handelt, wodurch der Einsatz von BEMUs ungeeignet ist. Die Linie RB4 wird als „bedingt geeignet“ eingestuft, da ab dem Jahr 2029 nur noch die Strecke zwischen Wolfhagen bis Korbach nicht elektrifiziert ist und sich für Hin- und Rückfahrt nur eine nicht-elektrifizierte Strecke von 79,6 km ergibt. Somit könnte der Einsatz von BEMUs geeignet sein, sofern die Akkus auf dem elektrifizierten Teilstück oder während des Aufenthalts in Korbach, bei entsprechender Ladeinfrastruktur, ausreichend geladen werden. Die Linien RT 4, RB 38, RB 39 und die RB 93/94 wurden als „ungeeignet“ eingestuft, ein Teil der Strecken bereits aktuell oder ab dem Jahr 2029 vollständig elektrifiziert sein wird. Für die RB 39 und RB 93/94 ist die Länge des nicht-elektrifizierten Streckenabschnitts gering, sodass hier BEMUs eingesetzt werden können.

Ergebnisse

Es verbleiben drei Linien, die für den Einsatz von FCEMUs geeignet oder bedingt geeignet sind. Die Ergebnisse für den Wasserstoffbedarf dieser Linien sind in der Tabelle 30 aufgeführt. Für den Fall, dass die nicht vollständig elektrifizierten Strecken ausschließlich mit wasserstoffbetriebenen Zügen betrieben werden, ergibt sich ein Gesamtwasserstoffbedarf von

1.128 t pro Jahr. Wird jedoch eine Elektrifizierung berücksichtig wo möglich, dann reduziert sich der Wasserstoffbedarf auf von 928 t pro Jahr.

Tabelle 30: Übersicht der Ergebnisse für den Wasserstoffbedarf nach dem Ausbau für die Linien RB 4, RE/RB 97 und RB 94

Linie	Strecken-verlauf	Streckenlänge in km		Jahreskilometer in tsd. km/a 2022		H_2-Bedarf in t H_2 /a	
		Gesamt	Nicht elektrifiziert (nach Ausbau)	Gesamt	Nicht elektrifiziert (nach Ausbau)	H2-only FCEMU	FCEMU mit Nutzung der Elektrifizierung (nach Ausbau)
RB 4	Kassel - Korbach	71,6	39,8	895	510	403	229
RE/RB 97	Brilon Stadt - Marburg	102	98,1	1.059	1.012	477	455
RB 94	Marburg - Erndtebrück	63,5	59,6	551	511	248	230

Abschließend lässt sich festhalten, dass zwei der sieben Linien der Kurhessenbahn für den Einsatz von FCEMUs geeignet sind. Bei diesen beiden Linien handelt es sich um die RE/RB 97 und die RB 94. Bei einer Umstellung dieser Linien werden vor dem Ausbau 725 t Wasserstoff und nach dem Ausbau 685 t Wasserstoff benötigt. Die Eignung einer dritten Linie, der RB 4, ist nicht endgültig geklärt. Denn in diesem Fall muss untersucht werden, inwiefern BEMUs nach dem Ausbau der Strecke geeignet sein könnten. Sollte auch hier eine Umstellung auf FCEMUs stattfinden, ergibt sich unter der Berücksichtigung der anderen beiden Linien ein Wasserstoffbedarf von 1128 t, vor dem Ausbau, und 928 t nach dem Ausbau.

2.1.11.5 Fahrzeugverfügbarkeit

In den vergangenen Jahren ist die Auswahl an Fahrzeugen mit Brennstoffzellen gestiegen, sodass mittlerweile Fahrzeuge für den Individualverkehr, Nutzfahrzeuge für den Transport und Fahrzeuge für den Personenverkehr verfügbar sind.

Eine Übersicht über Fahrzeuge für den Individualverkehr liefert Tabelle 31. In dieser Kategorie wird der Wasserstoff bei einem Druck von 700 bar in den Tanks gespeichert. Die Fahrzeuge haben je nach Tankvolumen Reichweiten von bis zu 666 km. Aktuell (März 2023) sind lediglich drei Fahrzeuge verfügbar. Das ist zum einen der Mirai 2 von Toyota, zum anderen der Hyundai Nexo. Der iX5 Hydrogen von BMW ist seit Februar 2023 für Test- und Demonstrationszwecke im Einsatz.

Tabelle 31: Übersicht PKW mit Brennstoffzelle

Hersteller	Modell	Tank in kg bei 700 bar	Reichweite in km	Verbrauch in kg / 100km	Preis in €	Verfügbarkeit	Quelle
Toyota	Mirai 2	5,6	650	0,79-0,89	65.990-76.290	2020	[108], [109]
Hyundai	Nexo	6,33	756	0,77-0,89	77.290	2018	[110]
Mercedes-Benz	GLC F-Cell	4,4	430	1	Full-Service Mietmodell: 799 €/Monat	Aktuell nicht verfügbar	[111], [112]
BMW	iX5 Hydrogen	6	504	1,19*		2023	[113], [114]

* Eigene Berechnung: Tankinhalt dividiert durch die Reichweite

Ebenfalls im Bereich der Transporter mit Brennstoffzelle gibt es bereits ein Angebot verschiedener Hersteller. Eine Zusammenfassung von Fahrzeugen mit weiteren Informationen liefert die Tabelle 32. Wie bereits bei den PKWs wird auch hier der Wasserstoff bei 700 bar im Tank gespeichert. Ein wichtiges Kriterium bei dieser Fahrzeugklasse ist die Nutzlast, die transportiert werden kann. Diese beträgt bei den meisten Fahrzeugen 1.000 kg.

Tabelle 32: Übersicht Transporter mit Brennstoffzelle

Hersteller	Modell	Tank in kg bei 700 bar	Reich-weite in km	Verbrauch in kg / 100km	Nutzlast in kg	Preis in €	Verfüg-barkeit	Quelle
StreetScooter	H2 Panel Van	6	500	1,2*	800		2020 (DHL intern)	[115]
Opel	E-Vivaro Hydrogen	4,4	400	1,1*	1.000	700€/ Monat	2021	[116], [117]
Peugeot	e-Expert Hydrogen	4,4	400	1,1*	1.000			[118]
Citroen	e-Jumpy	4,4	400	1,1*	1.000		2021	

* Eigene Berechnung: Tankinhalt dividiert durch die Reichweite

Eine Übersicht von LKW-Modellen mit Brennstoffzelle liefert die Tabelle 33. Im Gegensatz zu den vorherigen Fahrzeugkategorien wird der Wasserstoff bei unterschiedlichen Bedingungen gelagert. Zum einen unter Druck bei 350 oder 700 bar und zum anderen in flüssiger Form. Die transportierbare Nutzlast liegt zwischen 19-70 t.

Herstellerangaben zu den Preisen sind nicht verfügbar. Deshalb werden durchschnittliche Richtwerte in der Literatur genutzt und mit einer größeren Spannweite angegeben. Dabei werden die LKWs in drei Gewichtsklassen eingeteilt. Bei der leichtesten Klasse handelt es sich um Fahrzeuge mit einem zulässigen Gesamtgewicht von 7,5-18 t, bei denen die Spannweite zwischen 375.000-475.000 €. In der nächsten Klasse liegt das zulässige Gesamtgewicht zwischen 18-27 t und hat einen Richtwert von 450.000-550.000 €. Die schwerste Klasse hat ein zulässiges Gesamtgewicht von >27 t mit einer Spannweite von 550.000-650.000 €. [119] Es wurden Hersteller direkt angefragt, jedoch ohne Antwort.

Tabelle 33: Übersicht LKW mit Brennstoffzelle

Hersteller	Modell	Tank	Reichweite in km	Verbrauch in kg/ 100 km	Nutzlast in t	Preis in €	Verfüg-barkeit	Quelle
Hyundai	XCIENT Fuel Cell	32,09 kg (350 bar)	400	8*	19-36	**	2020	[120]
Daimler	Truck GenH2	2x 40 kg (flüssig, - 253°C)	1.000	8*	25	**		[121]
Nikola	TRE FCEV	40 – 80 kg (700 bar)	800				2023	[122], [123]
Hyzon	HyMax 450	70 kg (350 bar); 90 kg (700 bar)	680 km; 600km	10,3; 15*	46; 70	**		[124], [125]

* Eigene Berechnung: Tankinhalt dividiert durch die Reichweite
** Richtwert für Sattelzugmaschinen: 550.000-650.000€ [119]

Für den Personentransport können Busse oder Züge mit Brennstoffzelle eingesetzt werden. In der Tabelle 34 sind vier Busse aufgeführt, die bereits heute verfügbar sind. Mit diesen ist es möglich zwischen 64 und 80 Personen zu transportieren. Herstellerangaben zu den Preisen sind nicht verfügbar. Deshalb wird bezüglich der Anschaffungskosten wird in der Literatur mit Richtwerten gearbeitet. In dieser liegen diese für Solobusse zwischen 580.000-650.000 €. Für Gelenkbusse liegen die Anschaffungskosten zwischen 800.000-850.000 €. [126]

Tabelle 34: Übersicht Busse mit Brennstoffzelle

Hersteller	Modell	Tank in kg bei 350 bar	Reichweite in km	Verbrauch in kg/100 km	Transport-kapazität in Personen	Preis in €	Verfüg-barkeit	Quelle
Toyota/ CaetanoBus	H2.City Gold	37,5	400	9,4*	64	***	2020	[127]
Solaris	Urbino 12 hydrogen		350		80	***	2019	[128]
ARTHUR BUS GmbH	H2 Zero	27**	450	6		***	2022	[129], [130]
Van Hool	A330 FC	35,8	350	10*	75	***	2015	[131], [132]

* Eigene Berechnung: Tankinhalt dividiert durch die Reichweite
** Eigene Berechnung: Reichweite multipliziert mit dem Verbrauch dividiert durch 100
*** Keine Herstellerangaben verfügbar. Es wurden Hersteller direkt angefragt, jedoch ohne Antwort.

Mit dem Zug des Herstellers Alstom können bis zu 300 Personen transportiert werden, siehe Tabelle 35. Zudem ist dieser bereits verfügbar. Mit dem Zug von Siemens sollen 120 Personen transportiert werden können und dieser soll 2024 erhältlich sein.

Tabelle 35: Übersicht Züge mit Brennstoffzelle

Hersteller	Modell	Tank	Reichweite in km	Verbrauch in kg/100 km	Transport-kapazität in Personen	Preis in €	Verfüg-barkeit	Quelle
Alstom	CORADIA iLINT	2x 125 kg (350 bar)	600 - 800	31 - 42	300	*	2018	[133]
Siemens	Mireo Plus H		600		120	*	2024	[134]

* Keine Herstellerangaben verfügbar

Förderprogramme für Fahrzeugbeschaffung

Um die Nachfrage nach Fahrzeugen mit einer Brennstoffzelle zu steigern, wurden diverse Förderprogramme aufgelegt. Für Privatpersonen gibt es die Möglichkeit einen Antrag auf den Umweltbonus vom BMWK zu stellen. Dabei orientiert sich die Fördersumme an dem Preis und dem Datum der Zulassung [135]. Für Unternehmen gibt es eine größere Bandbreite an Förderungen. Diese werden entweder als Zuschuss oder als Kredit gewährt. Bei den Krediten handelt es sich um die Programme 268 und 269 der KfW [136]. Die Zuschüsse unterteilen sich weiter in eine allgemeine Förderung der Brennstoffzelle und die Förderung einer bestimmten Anwendung iSm Mobilitätssektor. Zu ersterem zählt das „Nationale Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie NIP Phase II“. Mit diesem sollen Produkte unterstützt werden, die bereits marktreif sind, allerdings keine Wettbewerbsfähigkeit zu konventionellen Produkten erreichen [137], [138]. Während der Laufzeit dieses Programms werden fortlaufend neue Förderaufrufe veröffentlicht. Die aktuell offenen Programme können über [139] eingesehen werden. Um die Verwendung von Brennstoffzellen im Bereich von Nutzfahrzeugen und Bussen attraktiver zu machen, wurden für diese Anwendungen zusätzlich eigene Förderrichtlinie aufgelegt. Bei den Bussen läuft dies unter der Richtlinie zur Förderung alternativer Antriebe von Bussen im Personenverkehr [140], [141] und Umweltfreundlicher Öffentlicher Personennahverkehr der Innovationsförderung Hessen. Für die Nutzfahrzeuge findet sich näheres unter der Richtlinie KsNI. [142], [143], [144] Neben der Anschaffung der Fahrzeuge können je nach Programm ebenfalls Machbarkeitsstudien, sowie die Installation von Infrastruktur finanziell unterstützt werden. Tabelle 36 fasst die genannten Förderprogramme noch mal zusammen.

Tabelle 36: Übersicht zu Förderprogrammen

Programm	Antragsteller	Fördergegenstand	Quelle
Umweltbonus	*	Zuschuss in Abhängigkeit von Listenpreis und Zulassungsdatum	[135]
KfW Programm 268	**	Kredit bis zu 50 Mio.€ pro Vorhaben	[136]
KfW Programm 269	**	Individueller Kredit ab 25 Mio.€ pro Vorhaben	[136]
NIP II	***	Zuschuss von innovativen Produkten die marktreif sind, allerdings keine Wettbewerbsfähigkeit aufweisen	[137], [138], [139]

Richtlinie KsNI	**	Zuschuss Fahrzeugbeschaffung, Tank- und Ladeinfrastruktur, Machbarkeitsstudien	[142], [143], [144]
Richtlinie zur Förderung alternativer Antriebe von Bussen im Personennahverkehr	Juristische Personen des öffentlichen Rechts und des Privatrechts sowie natürliche Personen, soweit wirtschaftlich tätig	Förderung von Bussen, Infrastruktur und Machbarkeitsstudien	[140], [141]
Umweltfreundlicher Öffentlicher Personennahverkehr (Innovationsförderung Hessen)	****	Investitionsmehrausgaben, Investitionen in Werkstattausstattung sowie Schulungen	[145]

* Privatpersonen, Unternehmen, Unternehmen mit kommunaler Beteiligung, Stiftung, Körperschaften, Vereine
** Unternehmen, Unternehmen mit kommunaler Beteiligung, Stiftung, Körperschaften, Vereine
*** Unternehmen, Unternehmen mit kommunaler Beteiligung, Stiftung, Körperschaften, Vereine, Forschungseinrichtungen, Hochschulen
****Gemeinden, Landkreise, kommunale Zusammenschlüsse, Verkehrsverbünde, Verkehrsunternehmen, Vorhabenträger des öffentlichen Personenverkehrs

2.1.12 Regionales Tankstellennetz

Im folgenden Kapitel werden zunächst kurz der prinzipielle Aufbau und die Funktionsweise einer Wasserstoff Tankstelle beschrieben. Im Anschluss wird basierend auf den Daten aus den bisherigen Arbeitspaketen eine initiale Ermittlung von relevanten Tankstellenstandorten in der Region durchgeführt. Die ausgewählten Standorte werden bzgl. verschiedener Kriterien beurteilt und Handlungsempfehlungen gegeben.

2.1.12.1 Wasserstoff Tankstellenkonzepte

Das Kapitel 3.1.11.5 gibt einen Überblick über verschiedene derzeit und demnächst verfügbare Fahrzeuge, deren Betankungsdruck und Tankvolumen. Standardbetankungsdrücke sind 35 MPa und 70 MPa. Bei Pkw und leichten Nutzfahrzeugen der Sprinter Klasse ist die 70 MPa Betankung Standard. Busse sowie die derzeit verfügbaren Hyundai und Hyzon Lkws werden mit 35 MPa betankt. Schwere Nutzfahrzeuge, die mit 70 MPa betankt werden können, sind derzeit noch in der Entwicklung. Für die Schnellbetankung (10 – 15 min) von großen Fahrzeugtanks (bis 100 kg) mit 70 MPa wird derzeit noch an einem standardisierten Betankungsprozess gearbeitet.

Tankstellengrößen nach derzeitigem Standard in Deutschland und ihre Verwendung für die verschiedenen Fahrzeugklassen sind in Tabelle 37 zusammengefasst. Die Auslegung hängt dabei hauptsächlich von der Anzahl der zu betankenden Fahrzeuge, der Art der zu betankenden Fahrzeugen und deren Druckniveau und dem zeitlichem Betankungsprofil ab.

Tabelle 37: Einteilung der Tankstellen nach Abgabekapazität (nach H2Mobility [146]) LNFZ =leichte Nutzfahrzeuge, MNFZ = Mittelschwerenutzfahrzeuge, SNFZ = schwere Nutzfahrzeuge

	S	M	L	2XL
Max. Durchsatz in kg H2 / Tag	200	500	1000	4000
Durchschnittlicher Durchsatz in kg H2 / Tag	150	350	700	2500
Jährlicher H2 Bedarf in t	1 - 10	100	500	900
Anzahl Zapfsäulen	1	2	2 - 3	2 - 4
Flächenbedarf / m²	80 -250	200 - 350	250 -800	technologieabhängig
Fahrzeuge	Pkw, LNFZ	Pkw, LNFZ, MNFZ, Busse	Pkw, LNFZ, MNFZ, Busse, SNFZ	Pkw, LNFZ, MNFZ, Busse, SNFZ

Eine Wasserstoff Tankstelle lässt sich grob in drei Teile einteilen: Versorgung, Speicherung und Wasserstoff Abgabe.

Für die Versorgung einer Tankstelle mit Wasserstoff gibt es unterschiedliche Möglichkeiten wie z.B. der Produktion von Wasserstoff am Standort (on-site), die Belieferung mit komprimiertem gasförmigem oder flüssigem Wasserstoff per Trailer oder die Versorgung über eine Pipeline (Hoch- oder Niederdruck). Welche Möglichkeit für eine Tankstelle genutzt wird, hängt von mehreren Faktoren ab wie z.B. wirtschaftliche Aspekte, örtliche Gegebenheiten wie Platzverfügbarkeit oder Stromnetzkapazitäten, Kapazität der Tankstelle oder mögliche örtliche Synergien.

Die Anlieferung von Flüssigwasserstoff ist aufgrund der höheren Speicherdichte für Tankstellen mit großem Durchsatz von Vorteil. Zwar muss Wasserstoff dafür zunächst energieintensiv verflüssigt werden, dafür ist der Transport sowie das Handling an der Tankstelle mit reduziertem Energieaufwand möglich. Die Flüssigwasserstoffanlieferung spielt auch bei zwei Fahrzeugkonzepten eine Rolle, die derzeit in Entwicklung sind, da deren Fahrzeuge mit tiefkaltem Flüssigwasserstoff (Daimler Truck) bzw. mit tiefkaltem gasförmigen (cryocompressed) Wasserstoff (BMW) betrieben werden. Für diese Fahrzeugen ist eine Tankstelle mit Flüssigwasserstoff notwendig. Aktuell ist der Einsatz von Flüssigwasserstoff nur begrenzt möglich, da es derzeit in Deutschland nur eine Verflüssigungsanlage in Leuna gibt. In den Hyexpert Projekten ist eine regionale Wasserstofferzeugung, mit gasförmiger Verteilung und Nutzung geplant. Daher wird der Fall der Flüssiganlieferung im Weiteren nicht betrachtet.

Die on-site Produktion von Wasserstoff via Elektrolyse mit Strom aus erneuerbaren Energien erfordert am Tankstellenstandort einen höheren Platzbedarf, einen Wasseranschluss und einen stärkeren Stromanschluss.

Die Belieferung mit gasförmigem Wasserstoff per Trailer ist die derzeit am meisten genutzte Versorgungsoption von Tankstellen in Deutschland. Der Wasserstoff wird heute mit einem Druck von 20 MPa bis 35 MPa angeliefert. Derzeit werden auch erste Trailer mit 50 MPa genutzt und Trailer mit einem Druck von 70 MPa sind in der Entwicklung. Je höher der Druck, desto höher die Transportkapazität, aber desto höher auch die Investitionskosten für die Trailer. Mit zunehmender Wasserstoffnachfrage an der Tankstelle wird die Nutzung von Hochdruck-Trailern relevanter. In diesen Fällen wird der Trailer nicht genutzt, um Speicher vor

Ort zu füllen, sondern wird geparkt und zeitweise in die Tankstelle integriert, um direkt zur Fahrzeugbetankung verwendet zu werden. In Abbildung 50 sind die beiden Basiskonzepte schematisch dargestellt.

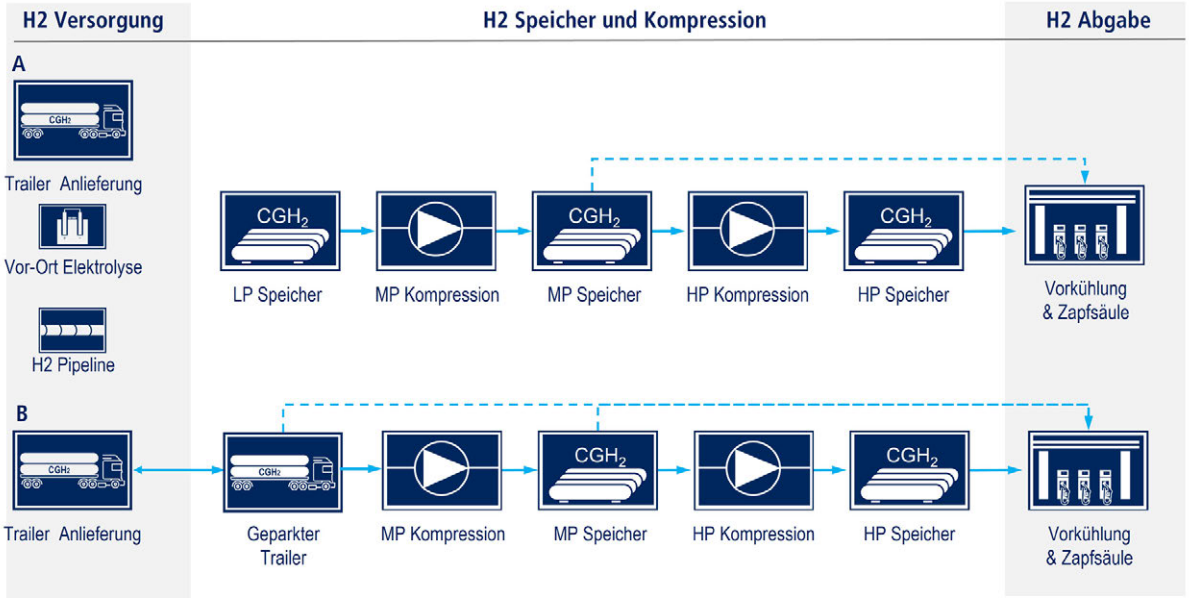


Abbildung 50: Basiskonzepte für Wasserstoff Tankstellen: A mit Speicher Befüllung vor Ort B: Trailer temporär integriert in die Tankstelle (LP Niederdruck, MP Mitteldruck, HP Hochdruck)

Die Speicher vor Ort sind meist aufgeteilt in Nieder-, Mittel und Hochdruckspeicher. Fahrzeuge werden dann aus einer Kaskade mit unterschiedlichen Druckniveaus durch Überströmen betankt. Diese Methode reduziert den Bedarf an Kompressoren sowie Hochdruckspeichern, beides Elemente, die mit hohen Investitionskosten verbunden sind.

Hochdruckspeicher (HP) werden im Bereich von ca. 80 bis 100 MPa betrieben, Mitteldruckspeicher (MP) von 30 bis 50 MPa und Niederdruckspeicher (LP) von 4 bis 20MPa. Der Druck des Mitteldruckspeicher erlaubt ggf. das direkte Betanken von Fahrzeugen mit 35 MPa Nenndruck.

Wichtiges und auch kostenrelevantes Teil einer Tankstelle sind die Kompressoren. Es gibt verschiedene Kompressor Technologien wie z.B. hydraulisch betriebene Kolben Kompressoren (z.B. von Haskel), ionische Kompressoren (Linde) oder Membrankompressoren (z.B. von NEL). Können Kompressor Kapazität und Laufzeit reduziert werden, wird Energie und Leistungsbedarf vor Ort reduziert und auch Kosten durch längere Wartungsintervalle.

Diese Basiskonzepte werden von verschiedene Wasserstofftankstellen-Hersteller auf unterschiedliche Weise mit unterschiedlichen Verdichtungstechnologien, unterschiedlichen Zwischendruckniveaus, unterschiedlichen Speichertechnologien (Stahl, Composite), Kapazitäten und Verdichtungsleistungen umgesetzt. Zur Betankung von Brennstoffzellen-Pkw deren Wasserstofftanks meist ca. 5 kg fassen, sind die Speicher in der Regel so ausgelegt, dass eine vollständige Betankung aus dem Speicher (Kaskade) erfolgen kann. Eine Wasserstoffverdichtung während der Betankungszeit (3 bis 5 Minuten) ist dann nicht erforderlich. Diese Speicher werden nach dem Betankungsvorgang durch die Kompressoren wieder unter Druck gesetzt. Die erforderliche Kompressor Leistung hängt von den Speichergrößen und dem erwarteten Wasserstoffbedarf innerhalb einer Spitzenbedarfszeit ab. Die Möglichkeit, mehrere Fahrzeuge ohne Verzögerung nacheinander zu betanken (sog. Back-to-Back-Fähigkeit), ist ein wesentliches Merkmal von Wasserstoff Tankstellen. Bei der

Betankung von Lkw mit Wasserstofftankinhalten von 30 bis 80 kg und Betankungszeiten von etwa 10 bis 20 Minuten sind die oben vorgestellten Ansätze u.U. keine optimale Lösung. Alternativ kann zukünftig Wasserstoff direkt in den Fahrzeugspeicher verdichtet werden. Die Nutzung kostenintensiver Hochdruckspeicher kann dann vermieden werden. Dieses sogenannte „Booster"-Konzept (siehe Abbildung 51) könnte mit steigendem Wasserstoffbedarf pro Betankung (z. B. schwere Lkw) und für größere Tankstellen relevanter werden. Dafür sind leistungsstarke und zuverlässige Wasserstoffkompressoren erforderlich.

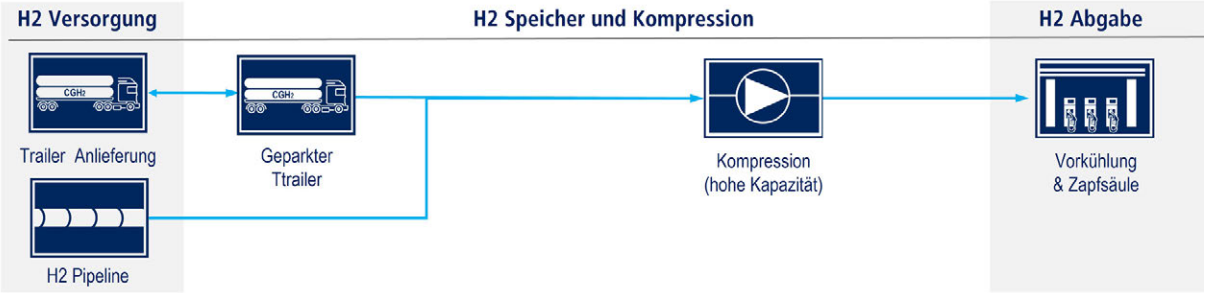


Abbildung 51: Booster Konzept für eine Wasserstoff Tankstelle

Abbildung 52: H2 Dispenser (Foto: LBST)

Die Wasserstoff Abgabe Einheit besteht aus Dispenser und aus einer meist notwendigen Vorkühleinheit für den Wasserstoff. Bei 70MPa Schnellbetankungen nach SAE J2601 ist es üblich, den Wasserstoff auf eine Temperatur zwischen -33 °C und -40°C zu kühlen, um die Erwärmung, die beim Tankvorgang auftritt, auszugleichen. Mit künftigen, optimierten Betankungsprotokollen, die den Betankungsprozess steuern, kann der Aufwand der Vorkühlung voraussichtlich auf ca. -20°C angehoben werden.

Der Dispenser (Abbildung 52) besteht aus der Füllkupplung, in die teilweise eine Kommunikationsschnittstelle integriert ist, sowie Bedienelementen. Die Kommunikationsschnittstelle ermöglicht einen rudimentären Austausch von Daten zwischen Fahrzeug und Tankstelle.

2.1.12.2 Standortermittlung

Um potenziell geeignete Standorte für Wasserstoff Tankstellen zu finden, wurden die Daten aus den bisherigen Arbeitspaketen, aber auch weitere Informationen berücksichtigt. Folgende Überlegungen wurden bei der Standortermittlung einbezogen:

- Die Auswertung der BASt-Daten zum Schwerlastverkehr auf den Autobahnen Nordhessens. Kapitel 3.1.11.2
- Die Auswertung der Zulassungszahlen kombiniert mit der Studie „Langfristszenarien zur Transformation des Energiesystems in Deutschland“ siehe Kapitel 3.1.11.1
- Erzeugungspotenziale für Wasserstoff durch Wind und Sonne aus Kapitel 3.1.9
- Bestehendes Autobahn- und Bundesstraßen Netz
- Gebiete mit vorwiegend industriellem oder kommerziellem Charakter
- Bestehendes Netz konventioneller Tankstellen
- Bereits bestehende Wasserstoff Tankstellen in Deutschland, bzw. Tankstellen, die bereits in der Umsetzungsplanungen sind
- Planungen aus anderen angrenzenden HyExpert Projekten
- Vorgaben die sich aus dem Europäischen Ten-T Korridor und dem Vorschlag der EU-Kommission zur Verordnung zum Aufbau von Infrastruktur für alternative Kraftstoffe AFIR (Alternative Fuel Infrastructure Regulation) ergeben

In Abbildung 53 sind die Auswertung der BASt-Daten, der Wasserstoffbedarf nach Zulassungszahlen, das Straßennetz und die Industrie- und Gewerbeflächen graphisch dargestellt.

Aus den BASt Daten wurde für verschiedene strategisch gelegene Zählstellen an der A4, A5, A7, A44 und A49 der durchschnittliche konventionelle Schwerlastverkehrs berücksichtigt. Die hell unterlegten Zahlen in Abbildung 53 geben die Anzahl der Fahrzeuge pro Tag gemittelt über beide Richtungen an.

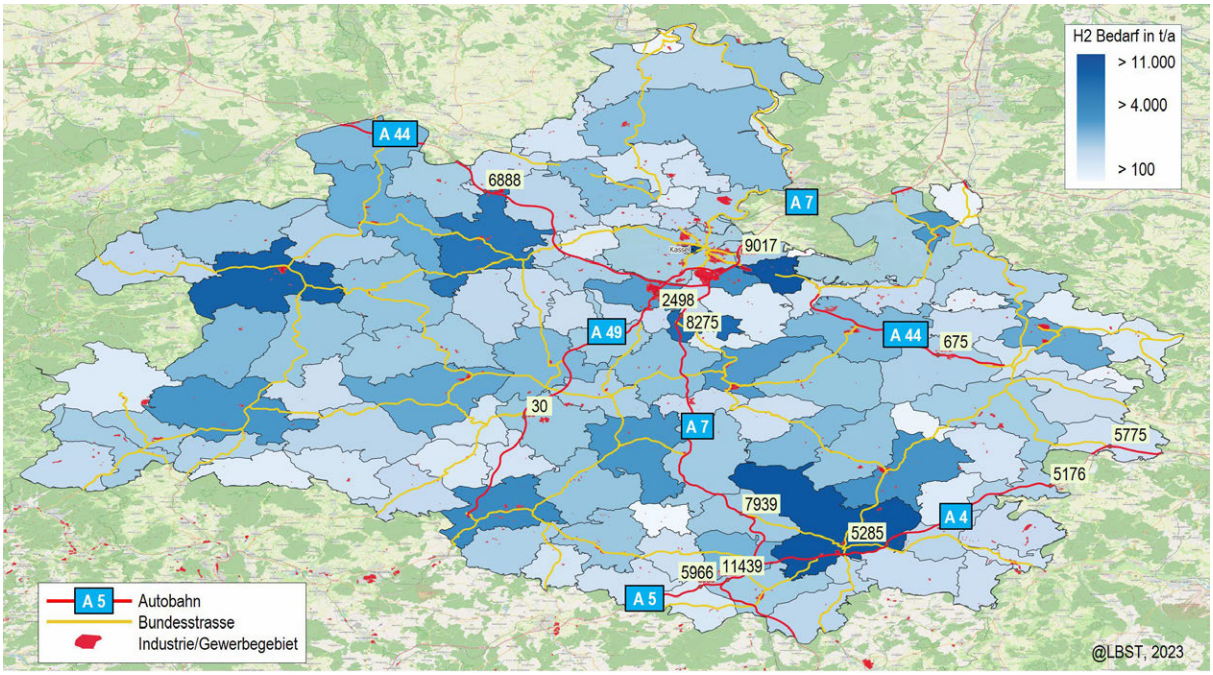


Abbildung 53: Wasserstoff Bedarfe in t/ a aus Kapitel 3.1.11.1. TN H2 2050 nach Postleitzahlenbereich, BASt Zählstellen mit durchschnittlichem Aufkommen von konventionellem Schwerlastverkehr, Anzahl der Fahrzeuge gemittelt je Richtung (hell unterlegte Zahlen)

Die A7 verfügt über ein sehr hohes Verkehrsaufkommen und ist auch Teil des Europäischen TEN-T Korridors. Hier sollte also eine gute Abdeckung mit Wasserstoff Tankstellen entstehen. Das Verkehrsaufkommen an den Zählstellen weist auf den Wasserstoff Bedarf durch Transitverkehr hin. Ergänzend können die Industrie- und Gewerbeflächen einen weiteren H2 Bedarf aus Ziel- und Quellverkehren zeigen. Damit können v.a. Schwerlastverkehre aus den Gewerbegebieten adressiert werden. Zusätzlich geben die Standorte bzw. die Dichte der konventionellen Tankstellen einen weiteren Hinweis auf hohes Verkehrsaufkommen und den Treibstoffbedarf.

Die Auswertung der Zulassungszahlen kombiniert mit der Studie „Langfristszenarien zur Transformation des Energiesystems in Deutschland“ ergibt für 2030 keine und für 2040 nur sehr geringe Wasserstoff Bedarfe. Erst für den Zeithorizont 2050 ergeben sich signifikante Werte, die Überlegungen zur Ermittlung von Tankstellenstandorten zulassen. Es wurde sich daher nur auf diese Werte gestützt und die Wasserstoffbedarfe je Postleitzahlenbereich berücksichtigt (Abbildung 53). Die Zulassungszahlen geben nur bedingt Auskunft über den tatsächlich auftretenden lokalen Verkehr, da der Betrieb von Fahrzeugen und der Zulassungsort nicht unbedingt übereinstimmen müssen, insbesondere bei Autovermietungen oder auch Speditionen.

Die Cluster für Erzeugungspotenziale, die in Kapitel 3.1.9 ermittelt wurden, sind für den Fall „max“ betrachtet worden und in Abbildung 54 aufgeschlüsselt nach Postleitzahlen dargestellt. Für die Ermittlung der Tankstellenstandorte ist jedoch der regionale Wasserstoffbedarf entscheidender als das regionale Wasserstofferzeugungspotenzial, da der Wasserstoff zu den Orten des Bedarfs transportiert werden kann.

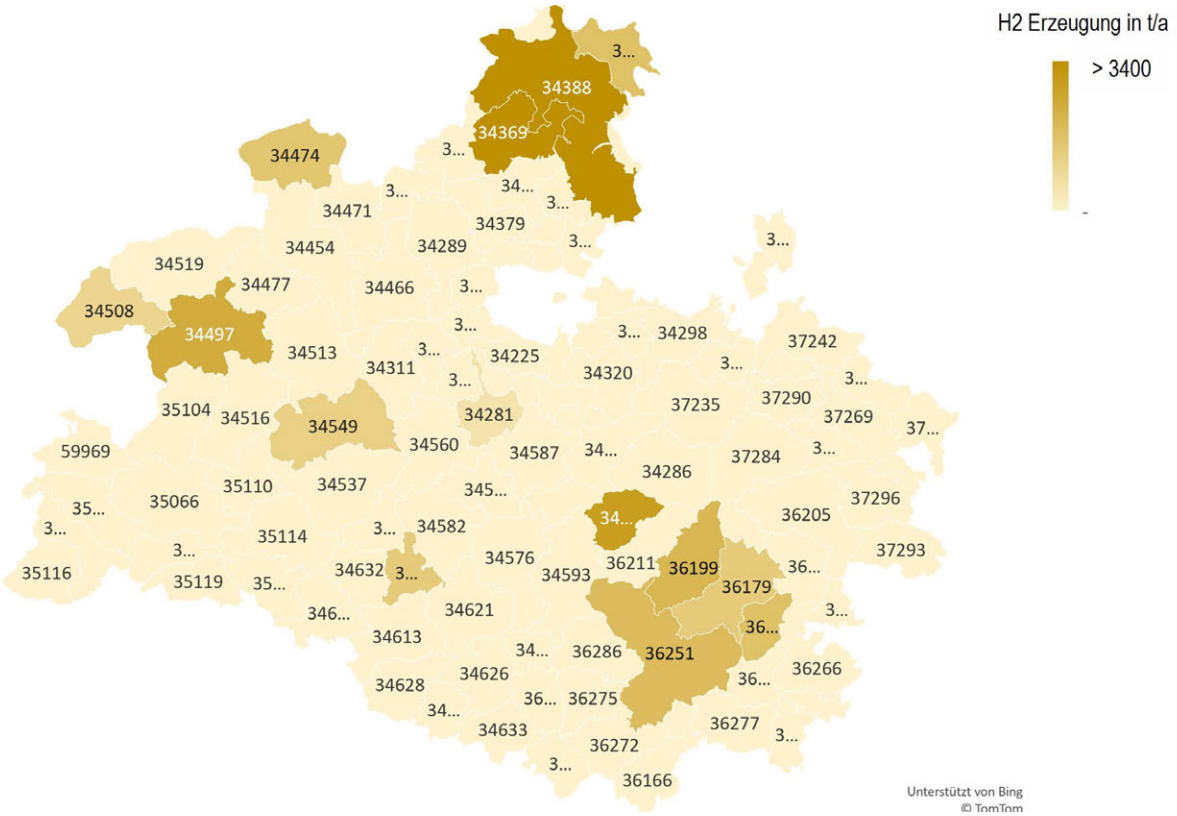


Abbildung 54: Potenzielle H2 Erzeugungsmengen, die in Kapitel 3.1.9 ermittelt wurden für den Fall „max“ in t/a dargestellt für die einzelnen Postleitzahlen

Mit Hilfe der Online Datenbank H2stations.org und der Übersichtskarte H2.live der H2 Mobility wurden bereits bestehende und konkret geplante Wasserstoff Tankstellenorte erfasst. H2.live zeigt nur öffentliche Tankstellen, wohingegen H2stations.org auch nicht öffentliche Betriebstankstellen oder ähnliche erfasst. Auch diese Standorte wurden mitberücksichtigt. Abbildung 55 zeigt alle Wasserstoff Tankstellen in Deutschland. Im Gebiet Nordhessen sind nur zwei Wasserstoff Tankstellen in Kassel Lohfelden und in Kirchheim in Betrieb. Die Tankstelle in Kassel Lohfelden ist auch für Nutzfahrzeuge ausgelegt. Die Tankstelle in Kirchheim, die sich derzeit noch im Optimierungsbetrieb befindet, ist nur für Pkw geeignet. Während sich im Westen von Deutschland entlang der Achse Stuttgart – Frankfurt – Düsseldorf - Dortmund sehr viele Wasserstoff Tankstellen befinden, sind es in der Mitte von Deutschland entlang der A7 vom Memmingen – Würzburg – Kassel – Hannover – Hamburg nur 6 Stück. Auf der Ost-West Achse Leipzig – Kassel – Dortmund (A44 und A38) ist in Kassel die einzige Wasserstofftankstelle auf gut 400 km. Im ca. 150 km Umkreis von Kassel befinden sich außer der Pkw Tankstelle in Kirchheim nur die Wasserstoff Tankstellen Siegen im Südwesten (ebenfalls nur für Pkw), Erfurt im Osten (für Pkw) und Hannover im Norden (auch für Nutzfahrzeuge). Im Süden soll Mitte 2023 eine Wasserstoff Tankstelle für Pkw und Nutzfahrzeuge in Gießen eröffnet werden.

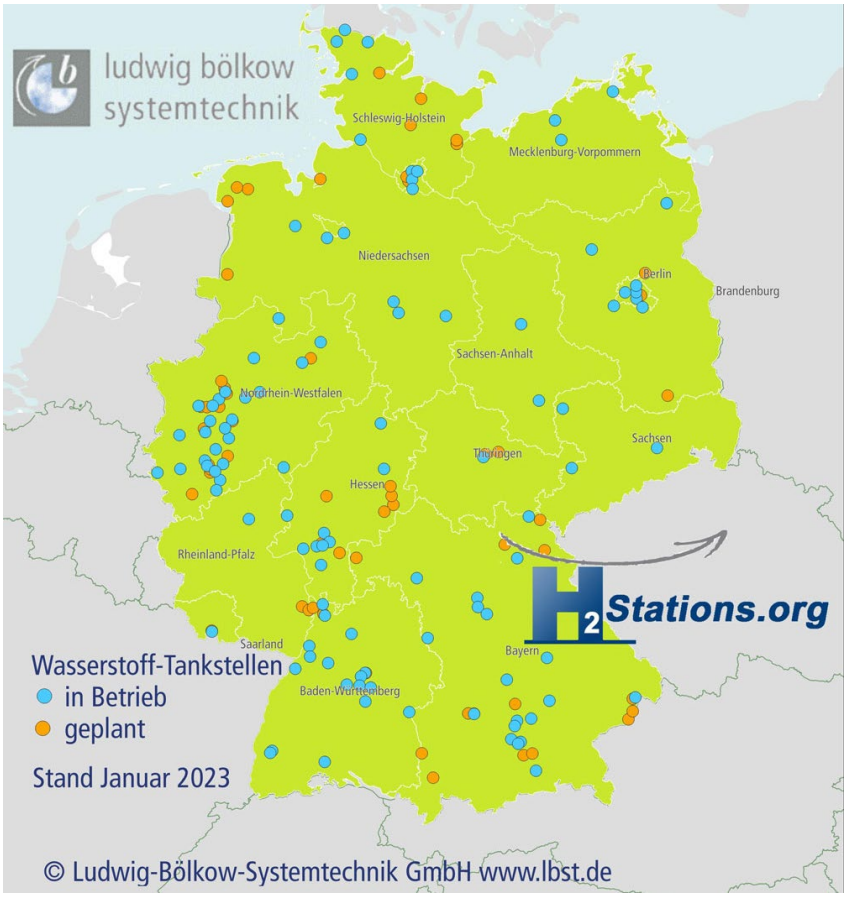


Abbildung 55: Wasserstoff Tankstellen in Deutschland, Pressemeldung 01.02.2023 H2stations.org

Die im Rahmen von HyLand geförderten Wasserstoffregionen in Deutschland sollten bei der Standortfindung berücksichtigt werden, um so Synergien aufzudecken und zu nutzen. Angrenzend an das Projekt NordH2essen sind unteranderem die HyExpert Projekte HyWheels in Osthessen und die Region Wartburgkreis im Osten, sowie die Region Helmstedt mit möglichen Tankstellen im Landkreis Goslar, Niedersachsen. Hier liegen jedoch nach derzeitigem Kenntnisstand noch keine konkreten Planungen vor [147]. Daher wurde nur ein

Standort in Goslar stellvertretend berücksichtigt. Aus dem Projekt HyWheels sind bereits zwei Tankstellenstandorte in die Umsetzungsplanung gegangen (grüne Tankstellensymbole in Abbildung 56), zwei weitere sind in Vorplanung [148]. Diese Tankstellenorte werden ebenfalls mitbetrachtet. Für die Region Wartburgkreis sind Standorte entlang der A4 in Unterbreizbach und Krauthausen im Gespräch, sowie eventuell in Bad Salzungen [149].

In Abbildung 56 sind nochmals die Wasserstoff Bedarfe (blaue Flächen) und die Erzeugungspotenziale (gelbe Kreise) aus Abbildung 53 und Abbildung 54 zusammengefasst. Ferner sind Autobahnen (rot), Bundesstraßen (gelb), BASt Zählstellen (rote Zahlen) eingezeichnet. Konventionelle Tankstellen sind durch graue Symbole dargestellt, Wasserstoff Tankstellen im Betrieb oder in der Umsetzungsplanung grün. Potenzielle Tankstellen der umliegenden HyExpert Projekte sind als türkisene Tankstellensymbole dargestellt, sowie Tankstellenorte, die von interessierten Akteuren genannt wurden. Die rosa unterlegten Zahlen markieren die ermittelten möglichen Standorte für Wasserstoff Tankstellen im Rahmen des NordH2essen Projekts.

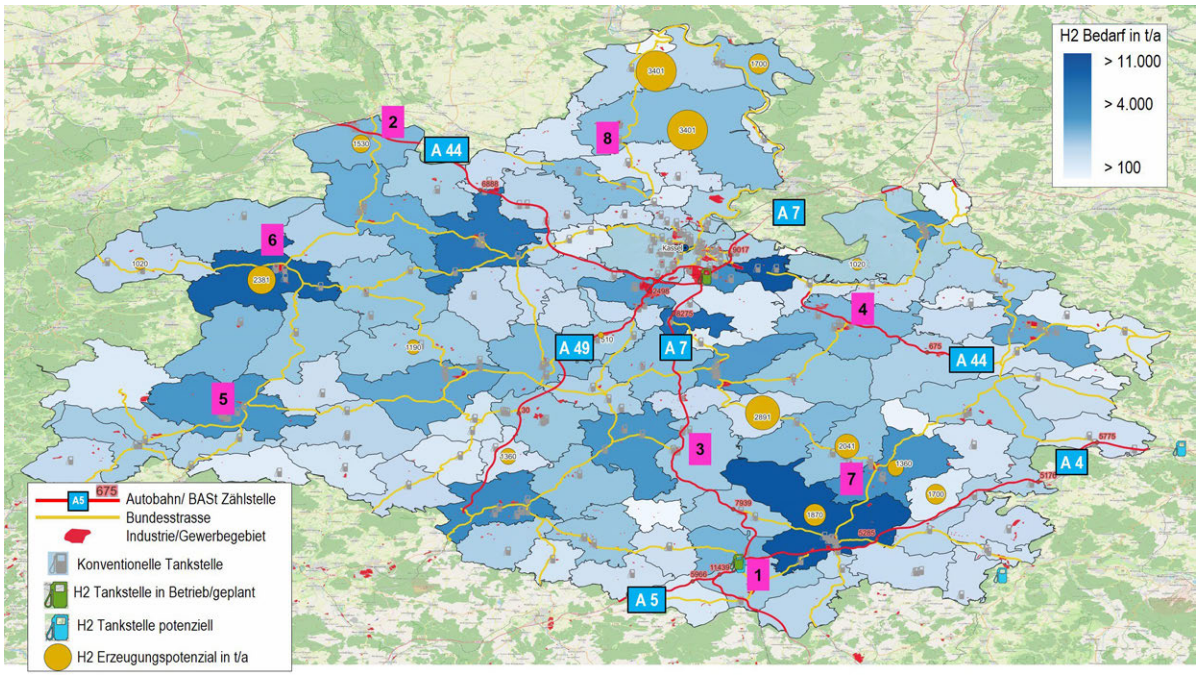


Abbildung 56: Nordhessen mit eingezeichneten H2 Bedarfen und H2 Erzeugungspotenzialen nach Postleitzahlen aus Kapitel 3.1.11.1 und 3.1.9 Die rosa unterlegten Zahlen markieren die ermittelten möglichen Standorte für Wasserstoff Tankstellen im Rahmen des NordH2essen Projekts.

Der Fokus bei der Standortsuche lag auf dem Transitverkehr und darauf, ein überregionales Netz aus Wasserstoff Tankstellen an den Verkehrshauptrouten zu vervollständigen und zu verdichten. Der mögliche Quellverkehr wurde mit Hilfe der Industrie- und Gewerbeflächen versucht zu berücksichtigen. Im Rahmen dieser Studie ist nur eine initiale Ermittlung von Standorten mit Hilfe von Luftbildern möglich. Eine Überprüfung z.B. bzgl. Eigentumsverhältnisse, Stromanschlussleistungen, baurechtliche und bautechnische Fragen oder vor Ort Besichtigungen können nicht durchgeführt werden. Die Standorte wurden mit folgenden Punkten charakterisiert:

- Ort
- Adresse: soweit eine genaue Angabe der Adresse möglich ist
- Entfernung zu Kassel (als Orientierungshilfe)

- Verkehrsaufkommen an der nächstliegenden BASt Zählstelle, die auch auf das Verkehrsaufkommen an dieser Stelle schließen lässt
- Verbindung zu „Bereich hoher Bedarf“
- Verbindung zu „Bereich Cluster max“
- Strategisches Merkmal: z.B. Knotenpunkt, Lückenschluss im H2 Tankstellennetz ö.ä.
- Konventionelle Tankinfrastruktur vorhanden ja/nein: es wurden bevorzugt Standorte ausgewählt, an denen bereits eine geeignete Tankinfrastruktur vorhanden ist
- Industrie/Gewerbe umliegend: es wurde nach Logistikbetrieben oder nach größeren Unternehmen (Produktionsstätten) gesucht, die auf einen erhöhten Lieferverkehr schließen lassen
- Platzverhältnisse: die räumlichen Verhältnisse sollten eine Erweiterung zulassen
- Besonderheit: z.B. H2 Tankstelle könnte in eine bestehende konventionelle Tankstelle integriert werden; proaktiver Akteur etc.

In Tabelle 38 sind die Standorte zum Überblick mit Stichpunkten aufgelistet. Bildmaterial zu den Standorten findet sich im Anhang. Im Folgenden werden die einzelnen Standorte kurz beschrieben und in Tabelle 39 in Kapitel 3.1.12.3 nach den obigen Kriterien mit Priorisierung gegenübergestellt.

Tabelle 38: potenzielle Wasserstoff Tankstellen Standorte

Nr	Ort	Bezeichnung	Kurzbeschreibung
1	Kirchheim	Knoten A4 A7	Wichtiger Knotenpunkt mit sehr hohem Verkehrsaufkommen; wichtig für überregionales H2 TS Netz; H2 Pkw TS in der Nähe; proaktiver Akteur (Standortangebot); Logistik/ Gewerbe angrenzend; Entfernung zu Kassel 66 km
2	Diemelstadt	Knoten A44 B252	Knotenpunkt mit hohem Verkehrsaufkommen; wichtig für überregionales H2 TS Netz; Autohof; Gewerbe angrenzend; potenzielle industrielle H2-Nachfrage identifiziert; Entfernung zu Kassel 50 km
3	Knüllwald	Knoten A7 B323	An A7 mit hohem Verkehrsaufkommen; konventionelle Infrastruktur vorhanden; Logistik / Gewerbe angrenzend; Akteur Fahrzeuge in der Nähe; Entfernung zu Kassel 42 km
4	Hessisch Lichtenau	Knoten A44 B487	Geringes Verkehrsaufkommen; Autohof; Logistik/ Gewerbe angrenzend; Akteur Busbetreiber mit Umsetzungsplänen; Entfernung zu Kassel 27 km
5	Frankenberg	Knoten B263 B252	Konkreter Standort fehlt noch; fügt sich in H2 TS Netz Siegen – Kassel; abhängig vom örtlichen Bedarf; Entfernung zu Kassel 72 km
6	Korbach	Knoten B252 B251	Zwei mögliche konkrete Standorte; Logistik/ Gewerbe angrenzend; abhängig vom örtlichen Bedarf; Entfernung zu Kassel 56 km
7	Bebra	Knoten B27 B83	Logistik/ Gewerbe angrenzend; abhängig vom örtlichen Bedarf; Entfernung zu Kassel 62 km
8	Hofgeismar	B83	Standort im Norden von Kassel; geeignete Tankstelle vorhanden; abhängig vom örtlichen Bedarf; Akteur mit geplanter privater H2 Tankstelle in der Nähe; Entfernung zu Kassel 24 km

Für die Stadt Kassel selbst wurden trotz hohen Bedarfs aufgrund der Zulassungszahlen keine weiteren Standorte kurzfristig abgeleitet. Die Entfernung Kassel Mitte zum Autobahnring im Südwesten zur bestehenden Wasserstoff Tankstelle Kassel Lohfelden ist mit ca. 12 km gering, ferner befinden sich die Logistik und Gewerbegebiete am Stadtrand. Perspektivisch wäre eine weitere Wasserstoff Tankstelle an der Autobahnausfahrt Kassel Nord der A7 eventuell aufgrund der hohen Verkehrszahlen zwischen den Anschlussstellen Kassel Nord und Kassel Ost zu berücksichtigen. Kurzfristig ist dies aber aufgrund der geringen Nähe von nur 6 km zur bereits bestehenden Wasserstoff Tankstelle Kassel Lohfelden nicht im Fokus. Angesichts der vielen Logistikbetriebe rund um Kassel sollten für die Zukunft weitere Standorte entlang des Autobahnrings als redundante Standort mit Akteuren direkt abgestimmt und herausgearbeitet werden.

Der Standort Kirchheim wurde trotz benachbarter Wasserstoff Tankstelle gewählt, weil er an einem sehr wichtigen Knotenpunkt mit sehr hohem Verkehrsauskommen liegt. Die bestehende H2 Mobility Tankstelle ist nur für Pkw Betankung ausgelegt, was diesem Standort für den überregionalen Logistiktransit nicht gerecht wird. Auf dem noch unbebauten Grundstück der Firma Autohaus Schade könnten die Platzverhältnisse auch den Ausbau mit einer Wasserstoff Produktion vor Ort ermöglichen. Das Autohaus Schade ist auf die Projektpartner proaktiv zugegangen. Mehrere Logistikbetriebe sind angrenzend. Die Zufahrt müsste aber noch erschlossen werden. Ein Erzeugungscluster max ist in ca. 20 km erreichbar.

Der Standort Diemelstadt liegt im Cluster max der Erzeugung und im Bereich hoher Bedarfe. Der Knotenpunkt der A44 mit der Bundesstraße B252 würde eine Stützstelle für die Verbindung Kassel zur nächsten Wasserstoff Tankstelle in Dortmund darstellen. Der vorhandene Autohof deutet auf ein hohes Lkw-Verkehrsaufkommen hin, und wäre für eine Erweiterung mit einer Wasserstoff Tankstelle prädestiniert. In nächster Umgebung gibt es eine weitere Lkw Tankstelle. Die umliegenden Gewerbe lassen ein hohes Logistikaufkommen vermuten. Eine Zählstelle zwischen Kassel und Diemelstadt zeigt ein hohes Verkehrsaufkommen.

Ähnlich verhält es sich beim Standort Knüllwald. Er liegt als Knoten zur B323 an der A7 mit hohem Verkehrsaufkommen. Eine Wasserstoff Tankstelle könnte eventuell in einen vorhandenen Autohof integriert werden. Mehrere Logistiker und produzierendes Gewerbe sind umliegend. Ein Akteur mit eventuellem Interesse am Einsatz von Brennstofffahrzeugen liegt 19 km entfernt.

Vergleichbar, aber mit weniger Verkehrsaufkommen ist der Standort Hessisch Lichtenau an der A44. Auch hier würde sich die Integration einer Wasserstoff Tankstelle in einen bestehenden Autohof anbieten. Die Tankstelle würde die Route zur Wasserstoff Tankstelle in Erfurt ergänzen. Logistik und produzierendes Gewerbe ist vor Ort. Ein Akteur mit geplanten 5 Brennstoffzellenbusse ist ortsansässig.

Am Standort Frankenberg wurde kein konkreter Standort ermittelt. Dieser Postleitzahlenbereich weist aber aufgrund einer großen Zahl an zugelassenen Sattelzugmaschinen einen hohen Wasserstoff Bedarf auf. Es sind zwei große Produktionsstätten vorhanden. Eine geeignete bestehende konventionelle Tankinfrastruktur wurde im Luftbild nicht gefunden, was auch auf wenig Transitverkehr schließen lässt. Der Ort liegt jedoch strategisch gut am Knotenpunkt der Bundesstraßen B263 und B252 und würde in der Mitte zwischen Kassel und der nächsten Wasserstoff Tankstelle in Siegen liegen. Zur Verdichtung des Wasserstoff Tankstellennetzes wäre dieser Standort also sehr gut geeignet. Ein entsprechend zur Verfügung stehendes Grundstück muss ermittelt werden. Zur Auslastung sollten regionale Abnehmer gefunden werden.

Der Standort Korbach am Knotenpunkt der Bundesstraßen B252 und B251 würde mit Frankenberg eine Wasserstoffroute von Siegen nach Diemelstadt bilden. Er liegt auch in einem Cluster max der Erzeugung. Neben großen Produktionsstätten sind mehrere Logistikbetriebe ansässig. Trotzdem wurde keine geeignete bereits bestehende Lkw Tankstelle gefunden. Als geeignete Flächen würden sich eventuell eine Raiffeisen Tankstelle oder ein Lkw Parkplatz der Firma Continental anbieten. Regionale Betriebe sollten als Abnehmer akquiriert werden.

Der Standort Bebra liegt aufgrund der Zulassungszahlen im Bereich hohen Bedarfs und im Erzeugungscluster max. Er liegt an der Kreuzung der Bundesstraßen B27 und B83 und nicht fern der A4 mit hohem Verkehrsaufkommen. Mehrere Logistik- und Gewerbebetriebe sind vor Ort. Zwei Tankstellen in der Robert-Bunsen-Straße sollten auf ihre Tauglichkeit hinsichtlich einer Erweiterung zur Wasserstoff Tankstelle geprüft werden. Zur Auslastung sollten auch hier regionale Abnehmer gefunden werden.

Um dem hohen Bedarf und dem hohen Erzeugungspotenzial im Norden von Kassel gerecht zu werden, wurde ein potenzieller Standort bei Hofgeismar gelegt. Eine Tankstelle an der B83 könnte für eine mögliche Erweiterung mit Wasserstoff untersucht werden. Trotz hoher Zulassungszahlen von Sattelzügen in diesem Postleitzahlenbereich konnte über Luftbilder in der näheren Umgebung nur ein größerer Produktionsstandort gefunden werden. Auch hier sollten zur Auslastung regionale Abnehmer gefunden werden. In der Nähe befindet sich die Firma Sera Hydrogen GmbH, die eventuell eine hauptsächlich privat zu nutzende Tankstelle plant.

Nimmt man den aus den Zulassungszahlen ermittelten Gesamtbedarf an Wasserstoff in Tonnen pro Jahr für die jeweiligen Postleitzahlen der ermittelten Standorte, so würde sich entsprechend der Tabelle 37 für alle Standorte jeweils eine Wasserstoff Tankstelle der Größe 2XL empfehlen. Dabei ist aber zu berücksichtigen, dass für den Wasserstoffbedarf der Zeithorizont 2050 verwendet wurde. In den nächsten Jahren wird sich damit noch kein Wasserstoffbedarf von 900 t pro Jahr und Standort ergeben. Sollten Anwender mit Flotten von z.B. ca. 10 Lkw gefunden werden, so würde sich unter der Annahme, dass eine Betankung pro Tag erforderlich ist, ein Bedarf von ca. 300 kg H2 pro Tag ergeben. Dies entspricht einer Tankstellengröße M. Der tatsächliche Wasserstoffbedarf und damit auch die Auslegung und der Platzbedarf der Tankstelle hängt aber selbstverständlich von der tatsächlichen Auslastung der Fahrzeuge ab.

Die Auslegung der Tankstellen hängt neben der Verfügbarkeit des Wasserstoffs, von der Anzahl der zu betankenden Fahrzeuge, dem bereitzustellendem Druckniveau und neben dem Gesamtbedarf auch vom zeitlichen Auslastungsprofil ab und kann in diesem Stadium der initialen Standortermittlung nicht gemacht werden.

2.1.12.3 Zusammenfassung regionales Tankstellennetz

In Tabelle 39 sind alle ermittelten Standorte für Wasserstoff Tankstellen zusammenfassend gegenübergestellt. Alle vorgeschlagenen Standorte würden sich gut in überregionale Wasserstoff Korridore einfügen. Eine Lage an Autobahnknotenpunkten und hohes Verkehrsaufkommen führten zu einer höheren Priorisierung als die Lage an Bundesstraßen. Für eine Umsetzung und Investitionsentscheidung sind jedoch auch Akteure vor Ort wichtig, die eine gewisse Auslastung der Standorte garantieren würden. Daher war das Kriterium „Industrie/Gewerbe umliegend“ für die Priorisierung wichtig. Neben der Lage zu Bereichen hohen Bedarfs und hoher Erzeugungskapazität war für die Priorisierung auch von entscheidender Bedeutung, ob bereits geeignete Tankinfrastruktur vorhanden ist, um so eine einfachere Umsetzung zu gewährleisten. Als Pluspunkt kamen bei dem Standort 1 der proaktive Standortakteur und bei Standort 3 und 4 die potenziellen Wasserstoff Fahrzeugbetreiber hinzu. Mit diesen Kriterien erreichten die Standorte 1 bis 4 eine hohe Priorität, wohingegen die Standorte 5 bis 8 eine geringere Priorität erreichten.

Entscheidend wird sein, vor Ort Akteure zu finden, die in Brennstoffzellen-Fahrzeugflotten investieren würden. Logistikunternehmen und produzierendes Gewerbe ist in Nordhessen und an fast allen vorgeschlagenen Standorten ansässig. Es bedarf nun regionaler Aufklärungsarbeit, um Akteure für eine Umsetzung zu gewinnen.

Tabelle 39: Gegenüberstellung der einzelnen potenziellen Wasserstoff Tankstellen Standorte nach verschiedenen Kriterien: Grün = positiv, gelb= weniger positiv, orange= negativ bewertet (TS = Tankstelle, KP = Knotenpunkt)

Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8
Ort	Kirchheim	Diemelstadt	Knüllwald	Hessisch Lichtenau	Frankenberg	Korbach	Bebra	Hofgeismar
PLZ	36275	34474	34593	37235	35066	34497	36179	34369
Adresse	Motelstraße	Wrexer Teich 1	Schilfwiese 1	Leipziger Str. 201	tbd	tbd	Robert-Bunsen-Straße	Grebensteiner Straße
Verkehrsaufkommen[11] an nächster BASt Zählstelle	11.439	6.888	7.939	675	--	--	--	--
Verbindung zu Bereich hoher Bedarf:	innerhalb	innerhalb	innerhalb	innerhalb	innerhalb	innerhalb	innerhalb	innerhalb
Verbindung zu Bereich Cluster max:	in 20 km	innerhalb	in 20 km	in 30 km	in 35 km	innerhalb	innerhalb	innerhalb
Strategisches Merkmal:	KP A4/A7; H2 Pkw TS in der Nähe Akteur Standortangebot	KP A44/B252; zwischen H2 TS Dortmund und Kassel	KP A7/B323; Akteur Fahrzeuge	KP A44/B487; zwischen H2 TS Erfurt und Kassel; Akteur Fahrzeuge	KP B263/B252; zwischen H2 TS Siegen und Kassel	KP B252/B251; Korridor H2 TS Siegen, Frankenberg, Korbach, Diemelstadt	nahe an A4, KP B27/B83	an B83, im Norden von Kassel; Akteur private TS
konventionelle Tank-infrastruktur vorhanden:	nein	ja, Autohof und Lkw TS	ja, Autohof und Lkw TS	ja, Autohof	nein	nein	ja	ja
Industrie/Gewerbe umliegend:	ja	ja	ja	ja	wenig	ja	einige	wenig
Priorität	hoch				geringer			

[11] Durchschnittlicher konventioneller Schwerlastverkehr in Fahrzeuge/Tag, gemittelt über beide Fahrtrichtungen

2.1.13 Potenzielle Sauerstoffbedarfe

In diesem Kapitel werden potenzielle Abnehmer für den Sauerstoff, der bei der Elektrolyse als Nebenprodukt anfällt, beschrieben und die potenziellen Mengen abgeschätzt.

Intensivmedizin

Sauerstoff findet medizinische Verwendung unter anderem bei medizinischen Eingriffen, Wiederbelebungen, unterschiedlichen Therapien und auf Intensivstationen. Im Folgenden wird eine Abschätzung des Sauerstoffbedarfs für Intensivstationen getroffen.

Als Berechnungsgrundlage für den Sauerstoffbedarf in Nordhessen wird die Anzahl an Betten auf Intensivstationen in Deutschland zum 28.07.2022 sowie die Auslastung der Intensivbetten in Deutschland Stand 2019 genutzt. Ferner wird vereinfacht angenommen, dass Deutschland 83 Millionen Einwohner und Nordhessen eine Millionen Einwohner hat, um den Bedarf auf die Modellregion übertragen zu können. Bezüglich des Sauerstoffstroms zur Behandlung von Intensivpatienten wird ein Volumenstrom von 50 l/min bei einem Sauerstoffgehalt von 50% angenommen. [150], [151], [152]

Daraus ergibt sich ein theoretischer Bedarf an medizinischem Sauerstoff von ca. 3.500 tO2/a in Nordhessen. Der tatsächliche Bedarf kann aufgrund von unterschiedlichen Durchflussmengen und Sättigungsraten, aber auch aufgrund nicht notwendiger Sauerstofftherapie von dieser Abschätzung abweichen.

Um im medizinischen Rahmen eingesetzt werden zu können, muss das Produkt (Elektrolyse-Sauerstoff) zertifiziert werden. Für den Einsatz des Elektrolyse-Sauerstoffs für medizinische Zwecke ist zu beachten, dass Qualitätsanforderungen sowohl bezüglich des Mindestsauerstoffgehalts im Gasstrom als auch bezüglich der Grenzwerte für die enthaltenen Spurenelemente einzuhalten sind. Neben der Zertifizierung könnten somit eine Aufbereitung und Veredelung des Elektrolyse-Sauerstoffs erforderlich sein.

Klärtechnik

Sauerstoff kann auch in Klärwerken Verwendung finden. Das Abwasser wird dort in mehreren Stufen mit unterschiedlichen Reinigungsverfahren geklärt und abschließend wieder in die Natur, z.B. ein nahes Fließgewässer, entlassen.

Die erste Reinigung erfolgt an der Rechenanlage und ist mechanischer Natur. Dort werden grobe Verunreinigungen wie Äste oder Papierreste abgefangen. Im darauffolgenden Sandfang wird die Fließgeschwindigkeit des Abwassers so weit reduziert, dass sich Kies und Sand am Boden des Sandfangs und Fette sowie andere schwimmende Bestandteile an der Oberfläche absetzen. Im Vorklärbecken wird die Fließgeschwindigkeit weiter reduziert, damit sich organischer Schlamm absetzt.

Im Belebungsbecken (rechteckige Becken in der oberen Bildhälfte von Abbildung 57 erfolgt eine biologische Reinigung durch eine hohe Konzentration von Bakterien und anderen Mikroorganismen – dem sogenannten Belebtschlamm. Der Belebtschlamm reinigt das Abwasser unter aeroben Bedingungen, weshalb eine Sauerstoffzufuhr notwendig ist. Konventionell wird hierfür Luftsauerstoff eingebracht, der mittels Kompressoren auf ein ausreichendes Druckniveau gehoben werden muss, um über die Austrittsdüsen am Beckenboden in ca. 4,5 m Tiefe in das Belebungsbecken eingebracht zu werden. In

Industriekläranlagen und bei starken Abwasserbelastungen wird auch Reinsauerstoff verwendet.

Im Nachklärbecken (runde Becken in der unteren Bildhälfte von Abbildung 57) wird das gereinigte Wasser und der Belebtschlamm voneinander getrennt. Das Wasser wird in die Natur zurückgeführt, der Belebtschlamm wird zum Teil wieder ins Belebungsbecken geführt, abgestorbene Bestandteile jedoch werden in den Faulturm weitergeleitet. Dort findet eine Schlammfaulung unter Luftabschluss statt und es kommt zum Abbau von Feststoffen und des Überschussschlamms. Das entstehende Klärgas besteht zu einem Großteil aus Methan und wird in modernen Kläranlagen zur Energiegewinnung genutzt. [153]

Abbildung 57: Kläranlage Kassel von oben [154]

Die Nutzung von Reinsauerstoff zur Belüftung des Belebungsbeckens bringt einige Vorteile mit sich. Ein Vorteil ist das Druckniveau. Bei der Verwendung von Luftsauerstoff muss die Luft auf 0,5 bar über Atmosphärendruck komprimiert werden, um in 4,5 m Tiefe in das Belebungsbecken eingebracht zu werden. Da die Belebungsbecken permanent belüftet werden müssen, fällt auch die Kompressionsarbeit permanent an. Da Luft nur zu etwa 21% aus Sauerstoff besteht, fällt die Verdichtungsarbeit bei Verwendung von Luftsauerstoff auch für die übrigen 79% Stickstoff und weitere Bestandteile an. Dies führt u.a. dazu, dass die Kompressoren für das Belebungsbecken für circa 80% des Strombedarfs eines Klärwerks verantwortlich sind. [155], [156]

Für das Klärwerk Kassel wurde ein potenzieller Bedarf an Sauerstoff zur Belüftung des Belebungsbeckens ermittelt. Das Klärwerk Kassel ist auf 340.000 Einwohnerwerte ausgelegt und hat 220.000 Einwohner im Versorgungsbereich. Es ist damit das größte Klärwerk in Nordhessen, das zweitgrößte Klärwerk ist auf lediglich 60.000 Einwohnerwerte ausgelegt. Der Einwohnerwert (EW) ist ein Kennwert für die Schmutzfracht im Zulauf einer Kläranlage. Der durchschnittliche Einwohnerwert entspricht einer Belastung von 60 g BSB5 pro Tag. BSB5 ist der Sauerstoffbedarf von Bakterien zum Abbau einer Wasserprobe im Zeitraum von 5 Tagen bei 20 °C. Da dem Klärwerk nicht nur private, sondern auch gewerbliche Abwässer zulaufen, ist das Klärwerk auf 340.000 Einwohnerwerte und nicht nur auf 220.00 Einwohner ausgelegt. Die Berechnungsgrundlage für die Bedarfsermittlung ist die tägliche Schmutzfracht. Das Klärwerk Kassel gibt eine tägliche Belastung von 20t BSB5 an, was in etwa der Auslegung auf 340.000 EW entspricht (die Auslegung entspricht einer täglichen Schmutzfracht von 20,4 t BSB5). [157], [158], [156], [159], [160], [161], [162]

Für die Berechnung des potenziellen Bedarfs wird auf zwei Studien verwiesen. Büttner et al. 2018 konnten einen Reinsauerstoffbedarf von etwa 0,5 kgO_2/kgBSB5 ermitteln. Rudolph, Müller-Czygan und Bombeck [155] hingegen zitieren eine Annahme von etwa 1 kgO_2/kgBSB5. Für die vorliegende Bedarfsabschätzung wird mit diesen beiden Werten gearbeitet, um einen groben Rahmen des potenziellen Sauerstoffbedarfs im Klärwerk Kassel liefern zu können. Tabelle 40 fasst die ermittelten potenziellen Sauerstoffbedarfe durch das Klärwerk in Kassel pro Tag und pro Jahr zusammen. Zusätzlich wird der theoretische Sauerstoffbedarf für ganz Nordhessen aufgeführt. Dieser beruht auf einer Hochrechnung des Bedarfs für Kassel auf die Gesamteinwohnerzahl Nordhessens. Dieser Bedarf dient primär dem Vergleich mit dem produzierten Sauerstoff einer Elektrolyseanlage. Inwiefern eine Umrüstung von mittleren und kleinen Kläranlagen auf den Eintrag von Reinsauerstoff wirtschaftlich sinnvoll ist, wurde nicht betrachtet.

Tabelle 40: Sauerstoffbedarfe für Klärwerke in Kassel und ganz Nordhessen sowie potenzieller Bedarf an medizinischem Sauerstoff im Vergleich zur Sauerstoffproduktion eines 57 MW-Elektrolyseurs

	Sauerstoffbedarf
Sauerstoffbedarf Klärwerk Kassel	11-20 t pro Tag
Sauerstoffbedarf Klärwerk Kassel	4.100-7.300 t pro Jahr
Sauerstoffbedarf Klärwerke in Nordhessen	18.500-33.200 t pro Jahr
Medizinischer Sauerstoffbedarf auf Intensivstationen in Nordhessen	3.500 t pro Jahr

2.1.14 Raumwärme und Quartiere

Im Folgenden werden die Möglichkeiten und Rahmenbedingungen für den Einsatz von Wasserstoff im Bereich der Raumwärme und speziell in Form von Quartieren erörtert und anschließend für die Region Nordhessen evaluiert.

Rahmenbedingungen und Technologien

Die aktuelle Entwicklung der Wärmeversorgung in Deutschland weist, insbesondere im Neubau, bereits seit Jahren eine steigende Tendenz in Richtung nachhaltiger Strukturen in Form von beispielsweise Wärmepumpen, Holz/Holzpellets und Strom, wie in Abbildung 58 zu sehen, auf. [163]

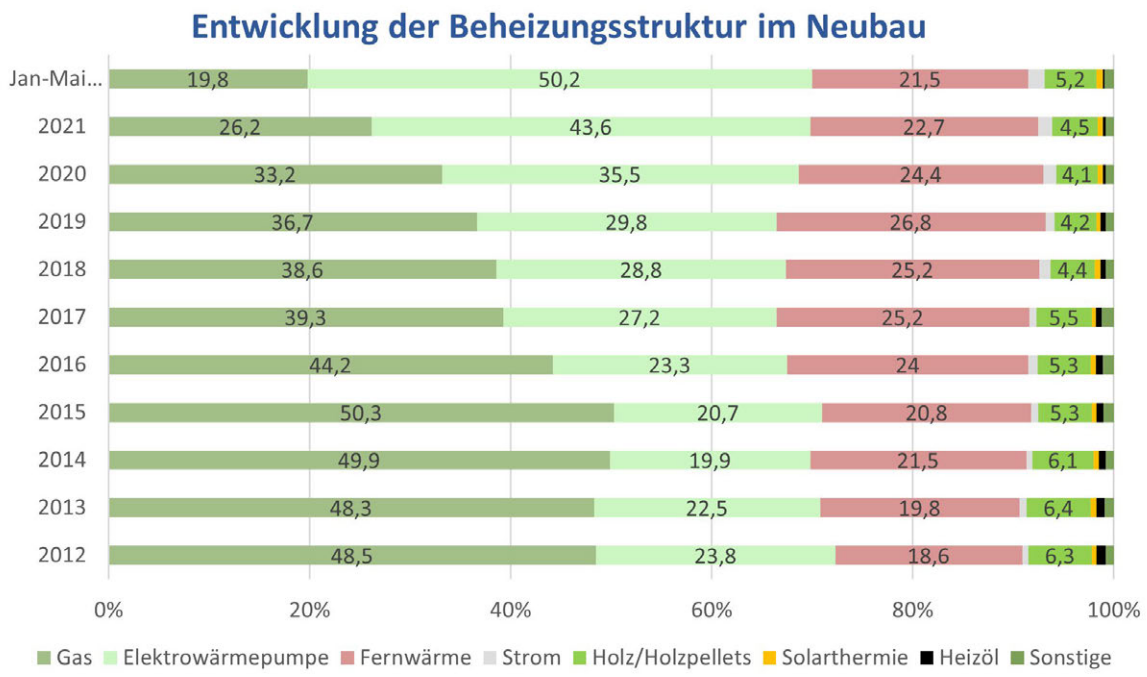


Abbildung 58: Entwicklung der Beheizungsstruktur im Neubau. [163]

Mit der kürzlich beschlossenen Novelle des Gebäudeenergiengesetz [164] wird sich dieser Anteil noch einmal drastisch erhöhen. Dennoch spielen wasserstoffbetriebene Heizsysteme in Deutschland bisher kaum eine Rolle. [165] [166] [167] [168] [169] [170] Generell ist der Einsatz von Wasserstoff in drei möglichen Szenarien denkbar. Die simpelste Methode ist eine Beimischung (bis 20 %) oder Substitution von Wasserstoff zu der bestehenden Erdgasversorgung. [171] Eine Voraussetzung hierfür ist zum einen die H_2-Readiness aller angeschlossenen Gasverbraucher sowie Verteilnetze und zum anderen die flächendeckende Verfügbarkeit großer Mengen Wasserstoff sowie eine ausreichende Versorgungssicherheit.

Aufgrund der Komplexität einer solchen Umstellung ist ein lokal begrenzter Aufbau der wasserstoffbasierten Wärmenutzung von Vorteil. Einzelne Gebäude können hierbei durch eine eigene solare Wasserstoffproduktion und eingebauten Brennwertkesseln sowie Brennstoffzellen mit Energie versorgt werden. Gerade in Gebäuden mit niedrigen Energieeffizienzstandards kann diese Art der Wärmeversorgung aufgrund der niedrig ausfallenden initialen Investitionskosten mitgedacht werden. [172]

Bei der Aus- bzw. Umrüstung von Wohnquartieren auf eine wasserstoffbasierte Energieversorgung ist die Umstellung oder der Bau von H_2-fähigen BHKWs oder der Einsatz von Brennstoffzellensystemen notwendig. Ein Vorteil ist hier, dass nicht nur mit Wasserstoff gearbeitet werden muss, sondern auch andere erneuerbare Energiequellen und Technologien in einem ganzheitlichen Konzept mitgedacht werden können. Auch kann die bei der Verwertung des Wasserstoffs entstehende Wärme durch Nahwärmesysteme mitgenutzt werden, was die Gesamteffizienz weiter steigert. Erste Modellprojekte wie das Projekt „Neue Weststadt“ [173] oder das SmartQuart Projekt [174] sind bereits in der Erprobung. Die Umsetzung von Wasserstoffquartieren stellt dennoch erst perspektivisch eine größer skalierbare Lösung dar.

Als letzte Option können die Fernwärmenetze, welche heute meist auf fossilen Technologien beruhen, auf Wasserstoff umgestellt werden. [175] Dies ist für heute bereits bestehende große

Fernwärmenetze besonders interessant, um so die Dekarbonisierung der Wärmeversorgung mit relativ geringem Aufwand voranzutreiben. Es kann daher erwartet werden, dass gerade diese Methode perspektivisch zunehmend eine Rolle spielen wird.

Allgemein muss jedoch erwähnt werden, dass im Vergleich zu anderen bestehenden Technologien, wie insbesondere Wärmepumpen, die Energieeffizienz von wasserstoffbasierten Lösungen selbst bei einer hohen Integration der Wärme niedrig ist. Dies hat zur Folge, dass gerade in der individuellen Wärmeversorgung aus energetischer Perspektive eine direkte Nutzung des verfügbaren Stromes bevorzugt wird. Zusätzlich müssten für den im Wärmesektor notwendigen Wasserstoff neue Importmöglichkeiten aufgebaut werden, da der lokal erzeugte Wasserstoff sowohl zu teuer als auch zu wenig ist, um den heimischen Bedarf zu decken.

Implikationen für Nordhessen

Um die Situation in Nordhessen einschätzen zu können erfolgt zuerst eine Analyse des Gebäudebestandes. Die meisten Gebäude haben ein Baujahr vor 1979 und sind daher noch vor den ersten Verordnungen für Heizanlagen und Wärmeschutz errichtet worden. Auf dieser Basis lässt sich vermuten, dass der Einsatz von Wasserstoff sinnvoll sein könnte, jedoch wird in keiner aktuellen Studie ein Einsatz von Wasserstoff im Bereich der Raumwärme angenommen und auch für die Zeit danach nur in vereinzelten Szenarien.

Im Raum Nordhessen gibt es darüber hinaus nur ein großes Fernwärmenetz in Kassel. Dieses wird durch verschiedene Kraftwerke versorgt, die aktuell hauptsächlich auf Erdgas und Heizöl sowie eines mit Biomasse betrieben werden. Eine Umstellung dieser Kraftwerke muss individuell evaluiert und mit den Betreibern diskutiert werden. Da aktuell keine Umstellungspläne bekannt sind, ist hier kurz bis mittelfristig mit keinem besonderen Wasserstoffbedarf zu rechnen.

Zusammenfassend lässt sich somit sagen, dass in Nordhessen Wasserstoff im Bereich der Wärmenutzung nach aktuellem Kenntnisstand keine bzw. nur eine geringe Rolle einnehmen wird. Individuelle kurzfristige Änderungen sind jedoch möglich und insbesondere im Bereich der Fernwärmeversorgung oder in lokal begrenzten Quartierskonzepten denkbar.

2.1.15 Transport und Speicherung

Da Wasserstoffproduktion und -bedarf selten am gleichen Ort und zur gleichen Zeit anfallen, sind Speicherung und Transport des Gases von essenzieller Bedeutung für den Aufbau einer funktionierenden Wasserstoffwirtschaft. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden sind neben einer lokalen Verteilung des Gases auch die Möglichkeiten des Imports aus anderen Regionen Deutschlands zu prüfen. Aufgrund der geringen volumetrischen Energiedichte ist eine Handhabung des Gases in Normalzustand schwer realisierbar. Daher wird, um die Energiedichte zu erhöhen und somit den Transport zu erleichtern, auf verschiedene Technologien und Medien zurückgegriffen. Die Wahl der geeigneten Kombination aus Speichermedium und Transportmethode hängt hauptsächlich von der Art der Endanwendung und der zu überbrückenden Strecke ab. [176]

Speichermedien

Speichermedien können in drei verschiedene Klassen unterteilt werden. Die Einteilung erfolgt in die physikalische Speicherung (Verflüssigung und Verdichtung), Bindung an

Trägermaterialien (z.B. LOHC) und die Synthese von Wasserstoffderivaten (Herstellung von Produkten auf Basis von Wasserstoff, wie beispielsweise Methanol und Ammoniak). [177]

Bei der physikalischen Speicherung kann entweder durch hohen Druck (bis 700 bar) Wasserstoff komprimiert werden (GH_2) oder durch niedrige Temperatur (-253 °C) in seinen flüssigen Zustand (LH_2) überführt werden. [178] Beides hat eine enorme Erhöhung der Energiedichte zur Folge, kommt jedoch mit einem nicht unerheblichen Energieaufwand in der Umwandlung einher. So wird für die Komprimierung in etwa 15 bis 25 % der gespeicherten Energiemenge benötigt, während bei der flüssigen Speicherung etwa 30 % benötigt werden. [179] Bei letzterer kommen zusätzlich Verdampfungsverluste hinzu, die bis zu 5 % pro Tag betragen können, jedoch mit entsprechenden Isolationen im Bereich von 0,01 bis 0,05 % liegen. Die für den Transport in diesen Formen notwendigen Prozesse sind bereits am Markt etabliert und entsprechend technisch ausgereift. Insbesondere komprimierte Gase sind bereits seit Jahrzehnten im Einsatz und die Handhabung dementsprechend erprobt. Nichtsdestotrotz gibt es noch Optimierungspotenzial speziell im Bereich der Verflüssigung. [180]

Neben der physikalischen Speicherung kann Wasserstoff auch reversibel an Trägermaterialien gebunden werden. Hierfür stehen verschiedene Optionen zur Verfügung, von denen die temporäre Speicherung an flüssigen organischen Wasserstoffträgern (engl. Liquid organic hydrogen carriers (LOHC)) die aktuell aussichtsreichste Option darstellt. Generell werden bei diesem Prozess flüssige, ungesättigte organische Verbindungen wie Dibenzyltoluol oder N-Ethylcarbazol hydriert und nach dem Transport kann durch Dehydrierung der Wasserstoff wieder gewonnen werden. Der Gewichtsanteil von Wasserstoff liegt abhängig vom eingesetzten Trägermaterial bei etwa 6 wt%. Diese Technologie verspricht den Vorteil, dass für den Transport bereits einfach Stahltanks bei Umgebungsdruck und -temperatur ausreichend sind. Dem gegenüber steht zum einen der hohe Energiebedarf insbesondere in Form von Wärme und der notwendige Aufbau geeigneter Anlagen für die Hydrierung und Dehydrierung. Auch muss der LOHC zwischen Wasserstoffquelle und -senke im Kreis geführt werden, sodass ein zusätzlicher Transportaufwand entsteht. [178]

Zusätzlich können Transport und Speicherung auch durch die Synthese von Wasserstoffderivaten erfolgen. Hierbei sind insbesondere Methanol und Ammoniak vielversprechende Lösungen. [179] Das Grundprinzip der Synthese von Ammoniak ist mit dem Haber-Bosch-Verfahren bereits seit Anfang des 20. Jahrhunderts bekannt und dementsprechend etabliert. Neben grünem Wasserstoff wird lediglich Stickstoff aus der Luft für die Synthese benötigt. Ammoniak selbst besitzt eine relativ hohe Energiedichte, sodass er sich als Energieträger eignet. Die Rückgewinnung von Wasserstoff aus der Stickstoffverbindung ist durch Cracking möglich, jedoch aus wirtschaftlichen Aspekten und aufgrund der energetischen Ineffizienz im Vergleich zu anderen direkten Anwendungen bisher nur bedingt sinnvoll. Ein direkter Einsatz von grünem Ammoniak als Treibstoff für Hochseefrachtschiffe und als grüner Rohstoff in der Düngemittel- und Chemieindustrie sind aber denkbar. Die Rahmenbedingungen der Methanolsynthese sind ähnlich zu denen der Ammoniakherstellung. Auch hier handelt es sich um eine chemische Verbindung mit hohem Energiegehalt, welche in einem etablierten Verfahren hergestellt und in bereits existierende Infrastruktur eingebunden werden kann. Ebenso ist die Rückgewinnung von Wasserstoff aus Methanol aus wirtschaftlichen und energetischen Gesichtspunkten wenig praktikabel und daher bietet sich ein direkter Einsatz in der chemischen Industrie oder als Kraftstoff via beispielsweise einer Direkt-Methanol-Brennstoffzelle an. Ein zusätzliches Hindernis ist das während der Synthese benötigte CO_2, da hier nur durch Direct Air Capture (DAC) gewonnenes als grün bezeichnet werden kann. Diese Methode ist jedoch derzeit noch im Entwicklungsstadium und daher nur bedingt für die Synthese von grünem Methanol geeignet.

[181] Eine Zusammenfassung der Energiedichten der verschiedenen Wasserstoffspeicher- und transportmedien ist in Abbildung 59 dargestellt.

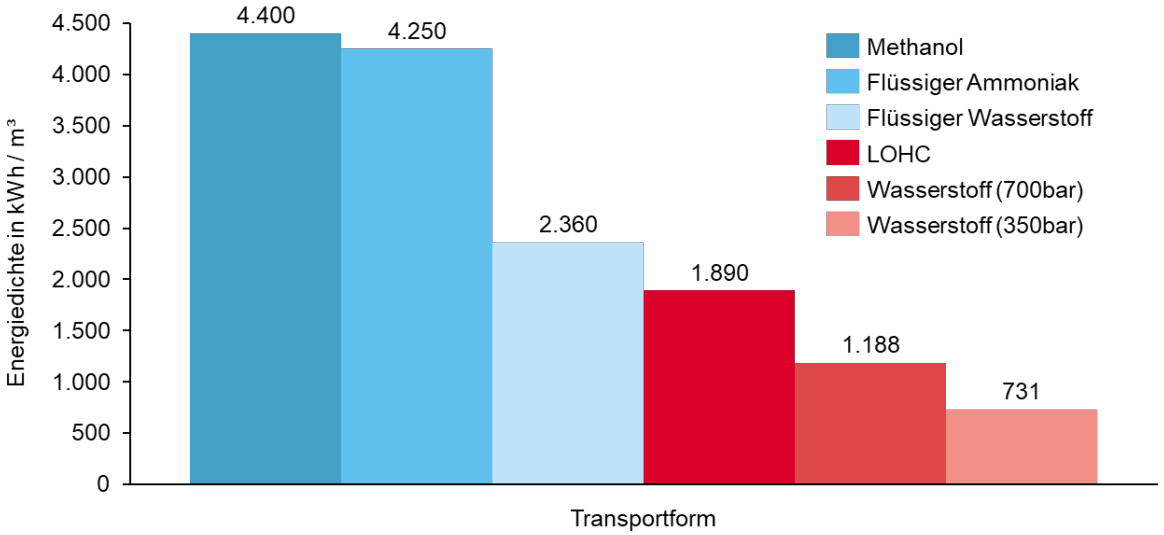


Abbildung 59: Energiedichte verschiedener Transportformen von Wasserstoff; bei Normalzustand 3 kWh/m3

Transporttechnologien

Neben dem Speichermedium ist die Transporttechnologie von zentraler Bedeutung und eng mit dem genutzten Wasserstoffform sowie der zu überbrückenden Distanz und infrastrukturellen Rahmenbedingungen verbunden. Dabei lassen sich drei Transportebenen identifizieren. Der Import von Wasserstoff nach Deutschland, der nationale Transport und auf den letzten Kilometern die lokale Verteilung. Eine Übersicht über die Eignung der verschiedenen Methoden für die unterschiedlichen Ebenen ist in Abbildung 60 gegeben.

Der Transport per Schiff ist insbesondere für den internationalen bzw. interkontinentalen Import von großen Mengen geeignet. [179] Ammoniak, Methanol und LOHC können per Tanker bereits transportiert werden, da es sich hier um ausgereifte Technologien handelt. Der Import von LH_2 befindet sich aktuell in der Entwicklung und es kann erwartet werden, dass dieser in Zukunft eine größere Rolle spielt. GH_2 ist aufgrund der geringen volumetrischen Energiedichte nicht für den Schiffstransport geeignet. Während des Transports ist die relative CO_2-Belastung selbst bei ölbasierten Schiffsantrieben gering, die Investitionskosten für den Aufbau zusätzlicher Infrastruktur sowie für die Entwicklung und Ausbau der Transportkapazitäten sind hoch.

Eine weitere Option für den Transport über weite Strecken ist per Pipeline Als Transportmedium ist bei dieser Form GH_2 am besten geeignet. Der Transport via LH_2 ist jedoch aufgrund der physikalischen Herausforderungen durch die notwendigen tiefen Temperaturen nicht möglich. Der Transport von Wasserstoffderivaten ist via Pipeline technisch möglich, allerdings im Bezug auf den großflächigen Einsatz unwahrscheinlich. Bei angemessener Auslastung sind die Betriebskosten einer Pipeline relativ niedrig, stehen aber den hohen Anfangskapitalkosten gegenüber. Aufgrund des hohen infrastrukturellen Aufwands bietet sich dieses Konzept in Form eines Transportnetzes für die Versorgung über weite Entfernungen und mit großen Mengen an. [182] In kleineren Maßstäben ist anschließend ein

Verteilnetz für die lokale Versorgung möglich, wobei eine konstante Abnahme relativ hoher Mengen zu beachten ist.

Eine weitere Möglichkeit für den Transport über weite Distanzen ist per Schiene. Vorausgesetzt, die infrastrukturellen Gegebenheiten lassen es zu ist es auch möglich Verbraucher direkt auf diesem Weg zu versorgen. Für GH_2 und Ammoniak ist der Transport mit Güterwagen bereits bewährt und kommerziell verfügbar, während LH_2 und LOHC sich aktuell in der Entwicklung befinden. Aufgrund der Entlastung des Straßenverkehrs und der hohen Lebensdauer der Systeme ist die Umweltbilanz der Schiene von Vorteil. Auch sind die Kosten pro Tonne transportiertem Wasserstoff relativ gering, sobald die notwendige Infrastruktur verfügbar ist. Letztere geht jedoch mit hohen Investitionskosten einher und ein umfangreicher Ausbau ist notwendig. Häufig sind bestehende Industrielle anlagen aber bereits an das Schienennetz angeschlossen, wodurch eine Versorgung entsprechender Unternehmen via Güterwagons möglich ist. [183]

Als letzte Option steht der Transport per LKW zur Verfügung. Diese ist die flexibelste Methode, da alle oben erwähnten Speichermedien transportiert werden können. Auch ist die Infrastruktur entsprechend ausgebaut, sodass jeder potenzielle Wasserstoffabnehmer angebunden werden kann. Aufgrund der hohen Emissionen bezogen auf die transportierte Wasserstoffmenge ist diese Form nicht für einen Transport über größere Distanzen geeignet, sondern hauptsächlich für die letzten hundert Kilometer im Verteilsystem. Darüber hinaus sind die Transportkapazitäten pro LKW im Vergleich zu den anderen Technologien sehr gering, wodurch der LKW für eine Versorgung von Großabnehmern nicht geeignet ist.

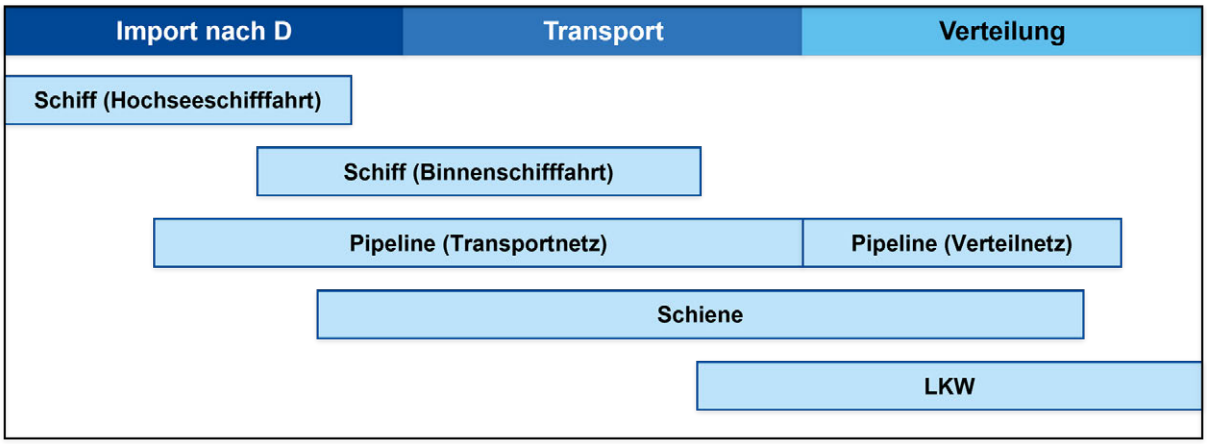


Abbildung 60: Eignung verschiedener Transportoptionen für Import, Transport und Verteilung.

Speicherung

Aufgrund saisonaler Schwankungen in der Produktion bzw. dem Bedarf strategischer Reserven, ist eine Speicherung von Wasserstoff notwendig. Bei der Speicherung ist vor Allem der Zeitraum und die Anzahl der Be und Entladezyklen. Für die kurzfristige Speicherung sind vor allem GH_2 und LH_2 geeignet. Dabei lassen sich mit Hilfe von Tanks oder Gasflaschenbündeln lokale Speichersysteme aufbauen. Solche Formen der Speicherung sind vor allem für Unternehmen und den lokalen Gebrauch geeignet. Für eine Strategische Energiespeicherung zum saisonalen Ausgleich erneuerbarer Energien sind Fels- oder Salzkavernen mögliche Großspeicher. Aufgrund der aktuellen Nutzung für Erdgas müssen diese umgewidmet werden und dementsprechend auf ihre Wasserstofftauglichkeit geprüft.

In Abbildung 61 ist ein abschließend ein Überblick über verschiedene Umwandlungs- und Transportoptionen aufgezeigt. Es zeigt sich, dass eine Vielzahl an Kombinationen für die

Distribution von Wasserstoff möglich ist. Der optimale Weg muss auf die örtlichen Gegebenheiten

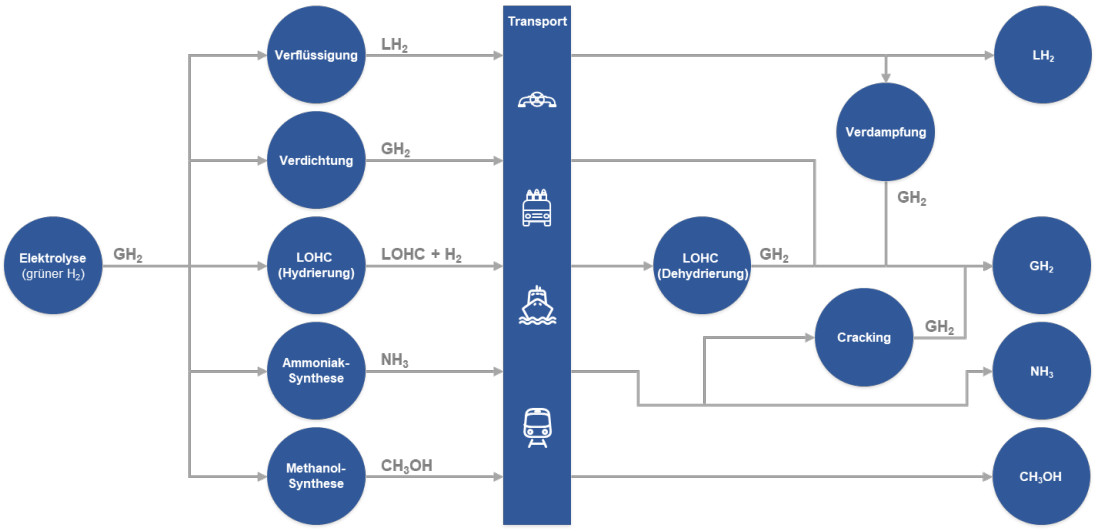


Abbildung 61: Schematische Darstellung verschiedener Umwandlungs- und Transportmöglichkeiten von Wasserstoff

Zusammenfassung und Evaluation für Nordhessen

Für den Import von Wasserstoff nach Deutschland ist, wie in Abbildung 62 zu sehen, ein umfangreicher Ausbau des europäischen Wasserstoffnetzes im Rahmen des European Hydrogen Backbone geplant. [184] Speziell für Deutschland ist hierbei der Import von Wasserstoff über die Beneluxstaaten interessant.

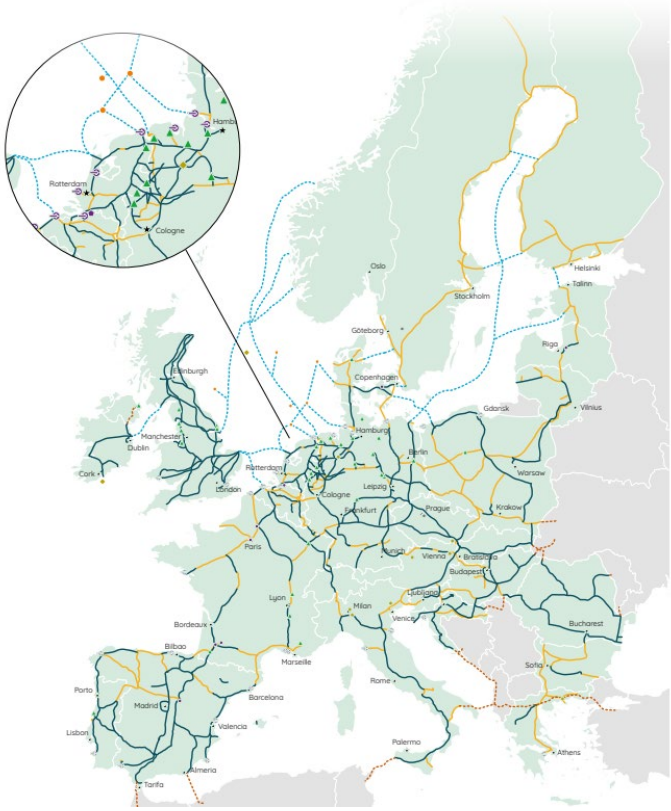


Abbildung 62: Übersichtskarte über den geplanten Ausbau des European Hydrogen Backbone. [184]

Zusätzlich soll innerhalb von Deutschland durch Umrüstung von Erdgasleitungen sowie Neubau von Wasserstoffleitungen ein Transportnetz entstehen. Im Rahmen dieser Maßnahmen wird nach aktuellem Kenntnisstand eine umgestellte Erdgasleitung bis 2050 von Südost nach Nordwest (siehe Abbildung 63 a)) und eine Neubauleitung bis 2032 von Ost nach west (siehe Abbildung 63b)) durch Nordhessen verlaufen.

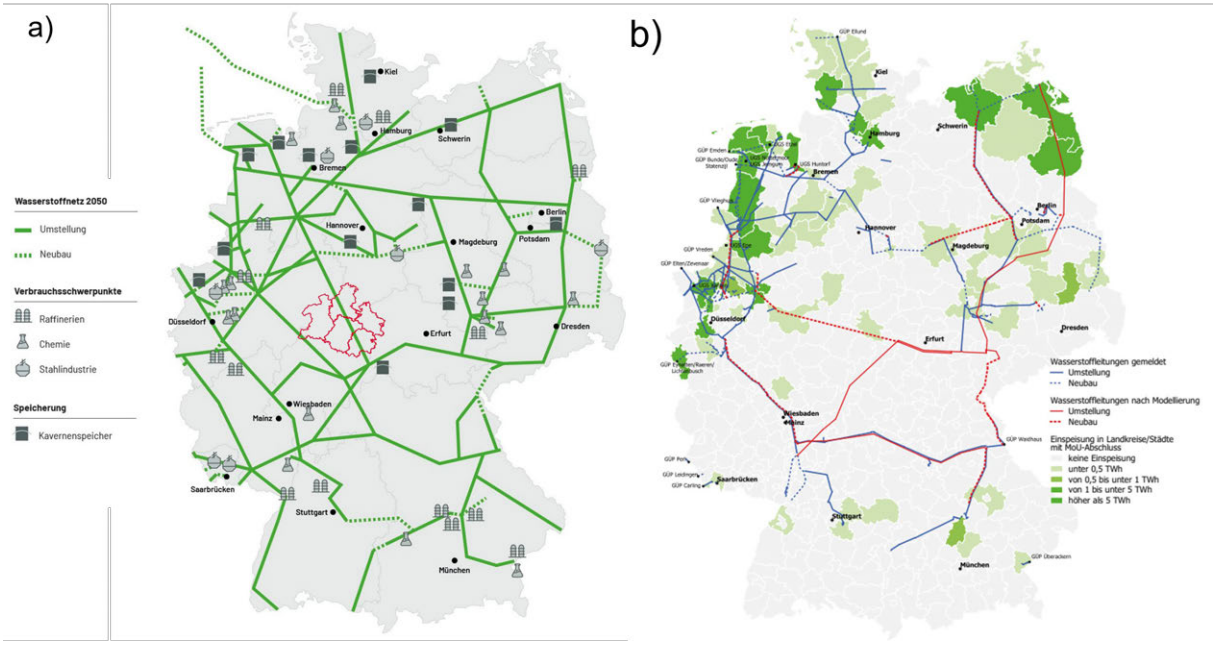


Abbildung 63: Karte der geplanten Wasserstoffnetze a) Netzentwicklungsplan Gas 2050 [185] b) Wasserstoffbericht 2032 [186]

Für den Import bzw. die Verteilung von größeren Wasserstoffmengen sind zusätzlich Schiene und Binnenschifffahrt als Transportwege möglich. Aufgrund des bereits beschriebenen Mangels an Tankschiffen und den mangelnden Voraussetzungen in Bezug auf Kapazitäten der Wasserstraßen ist ein Import via Binnenschifffahrt nach Nordhessen nicht abzusehen. Im Gegensatz dazu kann die Versorgung von Industrieunternehmen teilweise per Schiene erfolgen. Zusätzlich hierzu ist auf lokale Wasserstoffproduktion zu setzen und eine Verteilung via LKW als GH_2 und LH_2 möglich. Aufgrund der fehlenden Infrastruktur für Methanol, Ammoniak oder LOHC und den daraus resultierenden hohen Investitionskosten ist auch bei diesen Technologien vorerst nicht von einer Relevanz für Nordhessen auszugehen. Für die Speicherung von Wasserstoff stehen in Nordhessen selbst keine Salzkavernen oder Porenspeicher zur Verfügung. Angrenzende Speicher in Thüringen und im Landkreis Fulda können aber perspektivisch eine Rolle spielen. Kavernenspeicher wie in Reckrod sind laut einer DBI Studie [187] für die Umstellung auf Wasserstoff prinzipiell geeignet, es sind aber aktuell keine Pläne zur Umstellung bekannt. Die beiden Porenspeicher Allmenhausen und Kirchheiligen befinden sich in einer zu großen Distanz zu Nordhessen und müssten darüber hinaus individuell auf ihre Wasserstofftauglichkeit geprüft werden. Daraus lässt sich schließen, dass aktuell vorhandene Speicherkapazitäten aktuell keine Rolle für die Wasserstoffversorgung in Nordhessen spielen. Eine Übersicht über die in Deutschland verfügbaren Kavernen- und Porenspeicher gibt Abbildung 63.

Zusammenfassend ist somit perspektivisch von einer Kombination aus einem Import von Wasserstoff via Pipeline und in kleineren Mengen per Schiene sowie lokaler Produktion zu rechnen. Notwendige Mengen zur Zwischenspeicherung werden mit Hilfe von lokalen Gastanks realisiert.

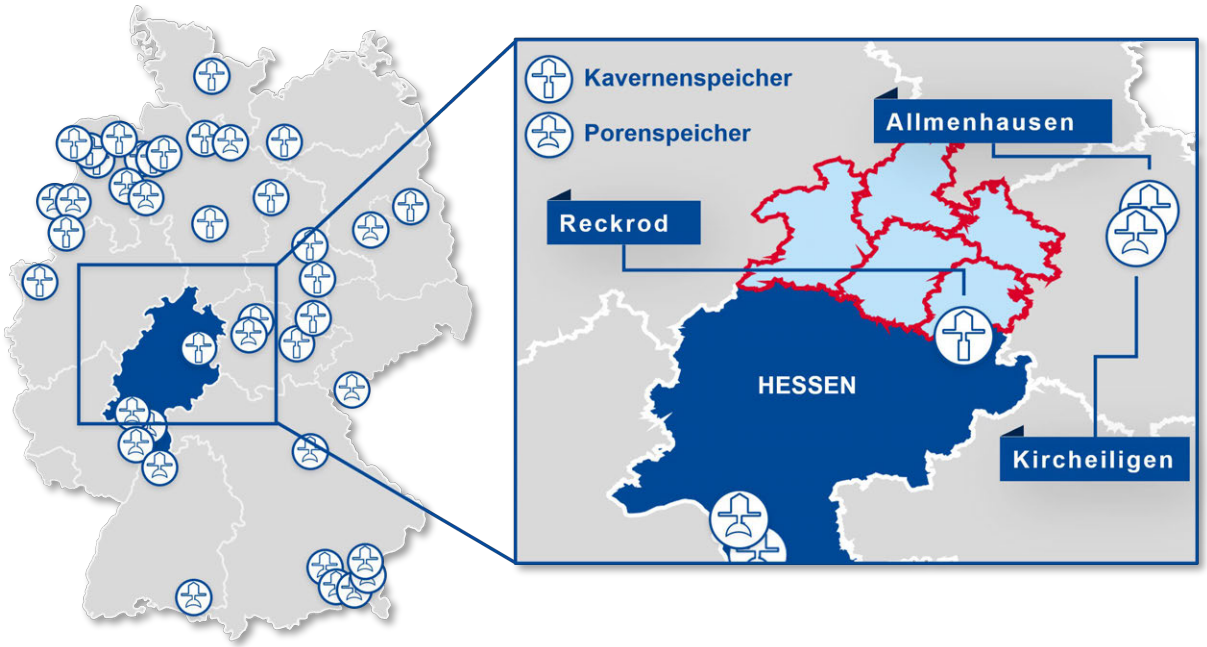


Abbildung 64: Übersichtskarte zu Kavernen und Porenspeichern in Deutschland.

2.2 Dialog-Ansatz

Ergänzend zum studien- und datenbasierten Ansatz berücksichtigt der Dialog-Ansatz die Bedeutung der Einbindung regionaler Unternehmen, Interessengruppen und Menschen, um detaillierte Informationen über ihre Perspektiven, Bedürfnisse und Herausforderungen zu erhalten. Dieser Ansatz beinhaltet die Durchführung von Umfragen, Interviews und Workshops mit verschiedenen Interessengruppen, um ein detailliertes Verständnis der lokalen Bedingungen, potenziellen Hindernisse und Möglichkeiten in der Region zu erhalten. Durch die Einbeziehung der lokalen Gemeinschaft ermöglicht dieser Ansatz die Identifizierung von Möglichkeiten für die Zusammenarbeit und Partnerschaften zwischen den Interessengruppen.

Neben der Untersuchung der theoretischen Potenziale im Rahmen der Top-Down Analyse wurden eine Vielzahl von Akteuren aus der Region kontaktiert, um die tatsächlichen Potenziale zu konkretisieren und ein umfassendes Stimmungsbild der Akteurslandschaft in Nordhessen zu ermitteln. Hierzu wurden mehrere Online-Umfragen, Austauschveranstaltungen sowie bilaterale Interviews durchgeführt. Anhand der Online-Umfrage konnte ein initialer Überblick der Ausgangssituation geschaffen werden. Durch die Experteninterview wurde ein tiefergehendes Verständnis der regionalen Akteure und deren Vorhaben aber auch Hindernisse bei der Umsetzung von Wasserstoffprojekten erarbeitet. An dieser Stelle ist zu erwähnen, dass nicht alle Teilnehmer der Online-Umfrage für ein Experteninterview zur Verfügung standen, d. h. die Akteure der beiden Befragungen sind nicht komplett deckungsgleich. Dementsprechend können auch die Ergebnisse teilweise voneinander abweichen. So sind bspw. im Mobilitätsbereich laut Online-Umfrage Aktivitäten geplant, die im Rahmen der Experteninterviews nicht erhärtet werden konnten.

Bei den Experteninterviews wurden insbesondere auf Wasserstoffprojekte und -vorhaben eingegangen. Im Allgemeinen lag der Fokus beider Akteursbefragungen zum einen auf qualitativen Faktoren, wie dem aktuellen Wissensstand zu Wasserstoff innerhalb des Unternehmens oder der Motivation sich mit dem Thema auseinander zu setzen sowie zum

anderen auf quantitativen Faktoren, wie geplante Wasserstoffanwendungen. Der aktuelle Reifegrad der Vorhaben wurde außerdem abgefragt, um die Konkretisierung der Vorhaben zu beurteilen.

Online-Umfrage

Die angefragten Akteure für die Online-Umfrage wurden durch verschiedene Quellen identifiziert. So wurden die LOI-Geber für den HyExperts NordH2essen kontaktiert. Aber auch weitere Kontakte des Regionalmanagements, ergänzt durch Recherche und Hinweise von bereits-identifizierten Akteuren wurden für die Online-Umfrage angesprochen. So wurden 150 Teilnehmer kontaktiert, wovon 39 an der Online-Umfrage teilgenommen haben.

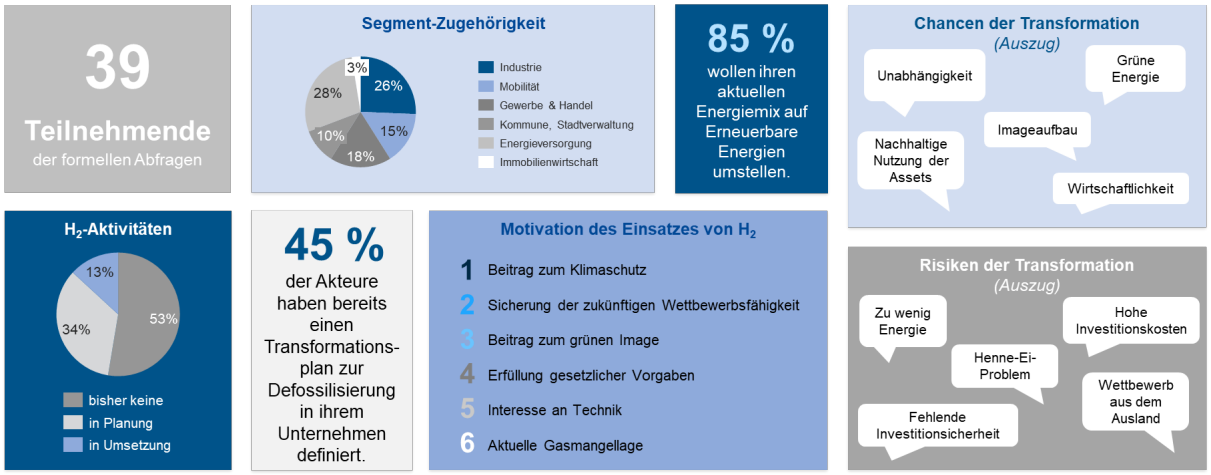


Abbildung 65: Überblick ausgewählter Informationen aus der Online-Umfrage

Der Großteil der Teilnehmenden (28 %) ordnete sich der Energiebranche zu, dicht gefolgt von Akteuren aus der Industrie mit 26 %. Ebenso waren Teilnehmer aus den Branchen Gewerbe, Handel und Dienstleistung (18 %), Mobilität (15 %), Kommune und Stadtverwaltung (10 %) und aus der Immobilienwirtschaft (3 %) vertreten. Da die Energiewirtschaft als Vorreiterbranche im Bereich Wasserstoff gilt ist die hohe Teilnehmeranzahl nicht verwunderlich. Zusätzlich ist in die Energiewirtschaft besonders von der Erdgaskrise betroffen und muss dementsprechend Alternativen für das wegbrechende Erdgasgeschäft identifizieren. Wasserstoff bietet eine solche Chance. Dies spiegelt sich in der hohen Teilnahmebereitschaft der Energiewirtschaft an dieser Online-Umfrage teilzunehmen.

Knapp die Hälfte der Teilnehmenden treiben bereits erste Wasserstoffvorhaben voran. So planen 33 % der nordhessischen Akteure bereits Wasserstoffprojekte und 13 % setzen sogar schon Vorhaben um. Laut Online-Umfrage werden besonders im Mobilitätsbereich Wasserstoffprojekte bereits umgesetzt. Beispielsweise werden bereits Wasserstoff-LKW eingesetzt oder Wasserstoff-Tankstellen gebaut und betrieben. An dieser Stelle gilt nochmal der Hinweis, dass diese Ergebnisse aufgrund der fehlenden Rückmeldungen dieser Akteure in den Experteninterviews nicht erhärtet werden konnten. Den starken Fortschritt im Mobilitätsbereich ist vor allem der Verfügbarkeit und Reifegrad der Wasserstoffanwendungen für den Sektor zu verdanken. Wasserstofffahrzeuge haben bereits eine Marktreife erreicht und sind in verschiedenen Ausführungen kommerziell erwerbbar. Die geplanten Projekte finden hingegen neben dem Mobilitätssektor in weiteren Bereichen statt: Wasserstoffgewinnung, Umwindung von Infrastruktur für den Wasserstofftransport oder die Umstellung von Gasöfen auf Wasserstoffbetrieb im industriellen Kontext.

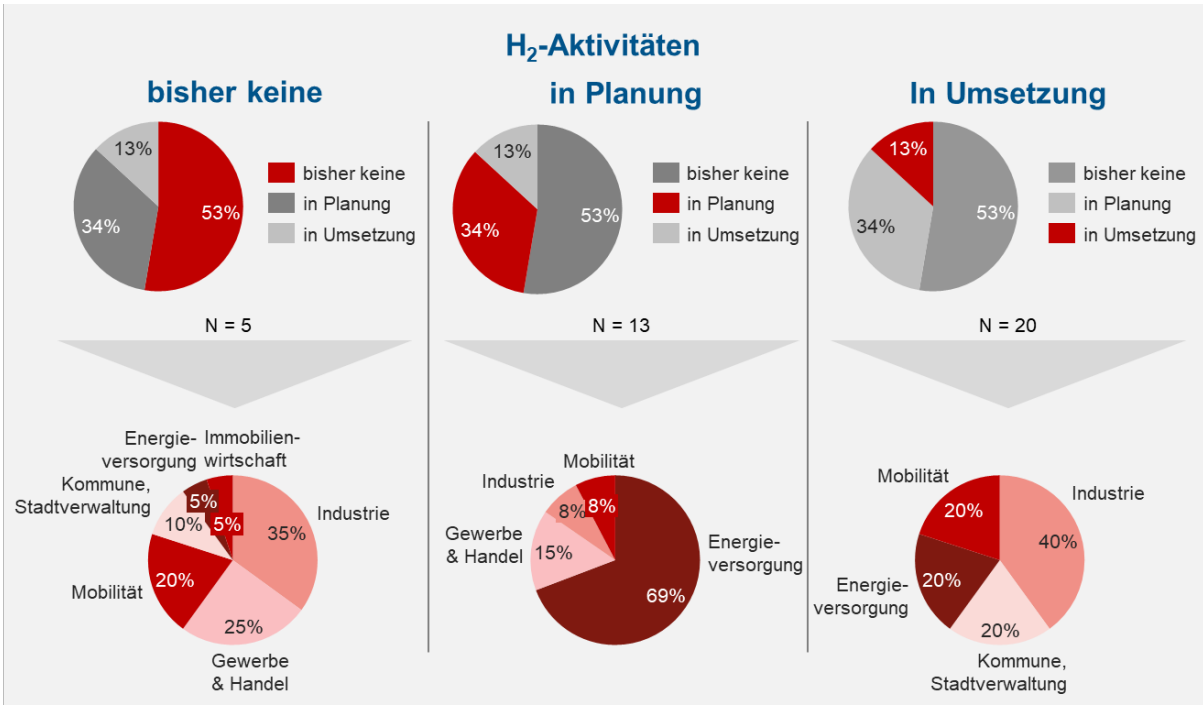


Abbildung 66: Übersicht des Reifegrads sowie der Sektorzuordnung kommunizierter H_2-Aktivitäten in der Region

Einen Beitrag zum Klimaschutz zu leisten ist für die Teilnehmer der Haupttreiber sich mit dem Thema Wasserstoff auseinander zu setzen, dicht gefolgt von dem Bedürfnis die zukünftige Wettbewerbsfähigkeit des Unternehmens zu sichern. Andere Motivationsgründe (in gewichteter Reihenfolge) sind der Beitrag zum „grünen Image“, die Erfüllung gesetzlicher Vorgaben, das Interesse an Technik und die aktuelle Erdgasmangellage. Passend zu dem starken Bedürfnis einen Beitrag zum Klimaschutz zu leisten, haben 44 % der Unternehmen bereits einen Transformationsprozess zur Defossilisierung erarbeitet. Eckpunkte des Defossilisierungsplans umfassen u. a. die Erzeugung und Einsatz von erneuerbaren Energien, die Erfassung des CO_2-Footprints oder Umstellung der bestehenden Erdgasinfrastruktur sowie des Fuhrparks auf nachhaltige Antriebe. Dabei ist den Unternehmen auch bewusst, dass Risiken mit dem Transformationsprozess einhergehen. Hohe Investitionskosten, Inflexibilität der Behörden bei Anträgen, Unsicherheit der Märkte sowie der internationale Wettbewerb sind Aspekte, die von den Teilnehmern oft genannt wurden. Doch für viele Akteure aus Nordhessen überwiegen die Chance einer nachhaltigen Transformation. Die Unabhängigkeit von Energielieferanten und fossilen Brennstoffen, Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit sowie den Aufbau als Vorreiterrolle sind ein paar der Argumente, die von den Unternehmen als Motivationstreiber genannt wurden.

Experteninterviews

In den Experteninterviews ging es vor allem darum ein tiefergehendes Verständnis der regionalen Wasserstoffvorhaben zu gewinnen. Welche Hemmnisse hindern die Akteure an der Umsetzung ihrer Wasserstoffvorhaben? Was für Wasserstoffanwendungen sind geplant? Welche konkreten Mengen werden zukünftig benötigt? Die Akteure für die Experteninterviews wurden auf Basis der Online-Umfrage sowie Impulsen des Projektteams ausgewählt.

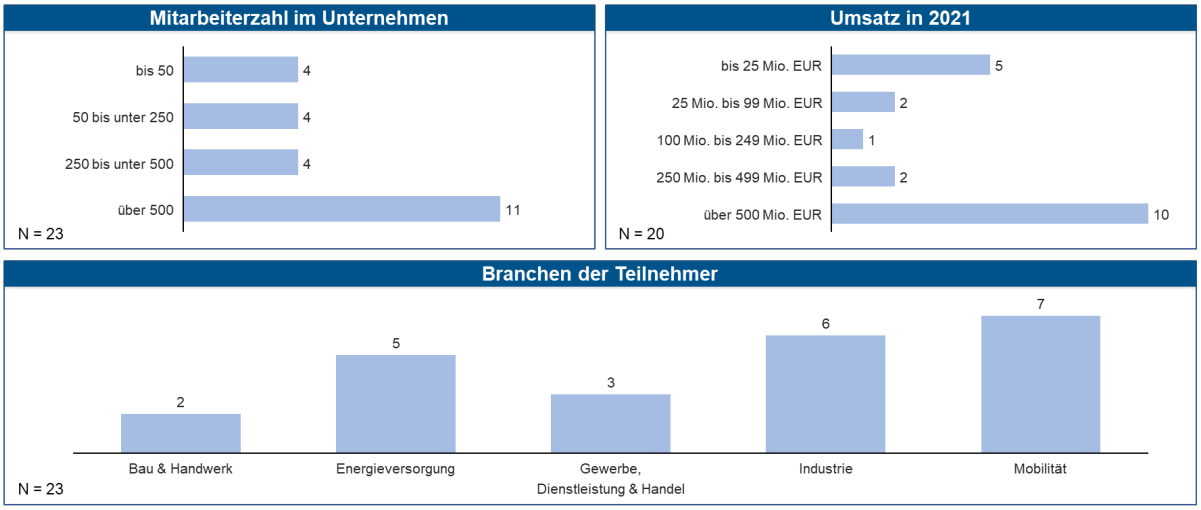


Abbildung 67: Kennzahlen zu den Teilnehmenden an den weiterführenden Experteninterviews

So konnten mit 23 von 50 kontaktierten Unternehmen Interviews geführt werden. Der Großteil (40 %) der interviewten Akteure planen Wasserstoffanwendungen im Mobilitätssektor, gefolgt von Wasserstofferzeugung (32 %), Wasserstoffeinsatz in der Industrie (16 %), Wasserstofftransport (8 %) und im Wärmebereich (4 %). Abbildung 1 zeigt die geographische Übersicht der Akteure, inklusive eine Auswahl besonders relevanter Wasserstoffprojekte in Nordhessen.

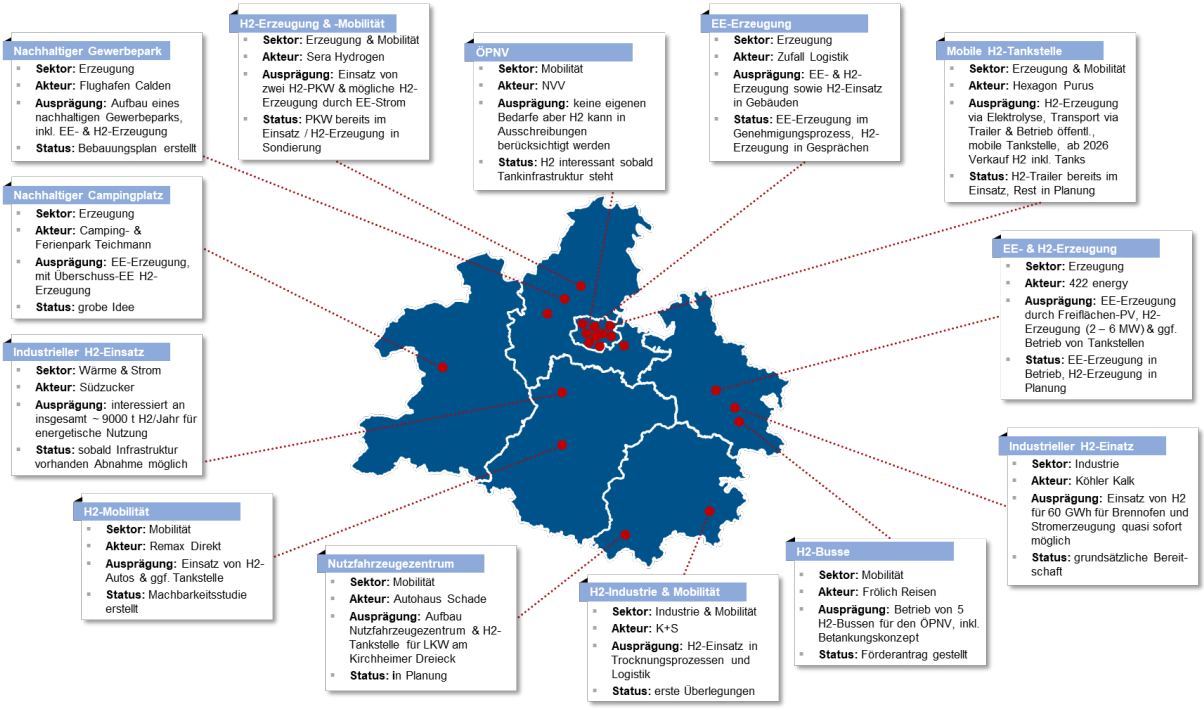


Abbildung 68: Auswahl der im Rahmen des Projektes erfassten Wasserstoffprojekte in Nordhessen.

Innerhalb des Dialog-Ansatzes werden ausschließlich Informationen berücksichtigt, welche von den teilnehmenden regionalen Akteuren übermittelt und für das Projekt freigegeben wurden. Informationen und Daten z. B. aus Pressemitteilungen oder Social-Media Posts werden nur berücksichtigt, wenn Sie innerhalb des Dialogs mit den regionalen Akteuren auch bestätigt werden konnten.

In den folgenden Abschnitten werden lediglich die Teile der Wertschöpfungskette beschrieben, innerhalb derer konkrete Projekte, Initiativen, Bedarfe oder Potenziale innerhalb des Dialog-Ansatzes identifiziert werden konnten.

2.2.1 Potenzieller künftiger Wasserstoff in der Industrie

Innerhalb der durchgeführten Akteursdialoge machte die Industrie den größten Anteil der teilnehmenden Akteure aus der Region aus.

Von den Teilnehmern der Online-Umfrage möchte ein Akteur bis 2030 Wasserstoff in industriellen Prozessen (also energetisch oder stofflich) einsetzen.

Weitere 5 % stellen Komponenten und/oder Systeme für die Wasserstoffindustrie her. Dabei handelt es sich bspw. um Kompressoren für Wasserstofftankstellen. Diese Akteure sehen sich in den Bereichen Wasserstofftankstellen, Power-to-Gas Anlagen sowie Groß-Batterien als System-Integratoren. Zusätzlich zu der Herstellung von Komponenten für die Wasserstoffindustrie bieten 5 % der teilnehmenden Unternehmen Dienstleistungen im Bezug auf Wasserstoff, wie z. B. die Auslegung von Wasserstoff-Tankstellen oder das Engineering von Elektrolyseursanlagen, an.

Im Rahmen der Experteninterviews konnten noch drei weitere Akteure mit Interesse an Wasserstoff im industriellen Bereich identifiziert werden: Köhler Kalk, K+S und Unternehmen aus der Papierindustrie. Die Unternehmen aus den Experteninterviews möchten Wasserstoff in ihren Prozessen wie folgt einsetzen:

- **Köhler Kalk**: Für Brennofen sowie ggf. zur Eigenstromerzeugung
- **K + S:** Einsatz bei den vorhandenen Trocknungsprozessen
- **Papierunternehmen** (*anonymisiert*): Substitution von Erdgas bei den Gasturbinen & Kesseln

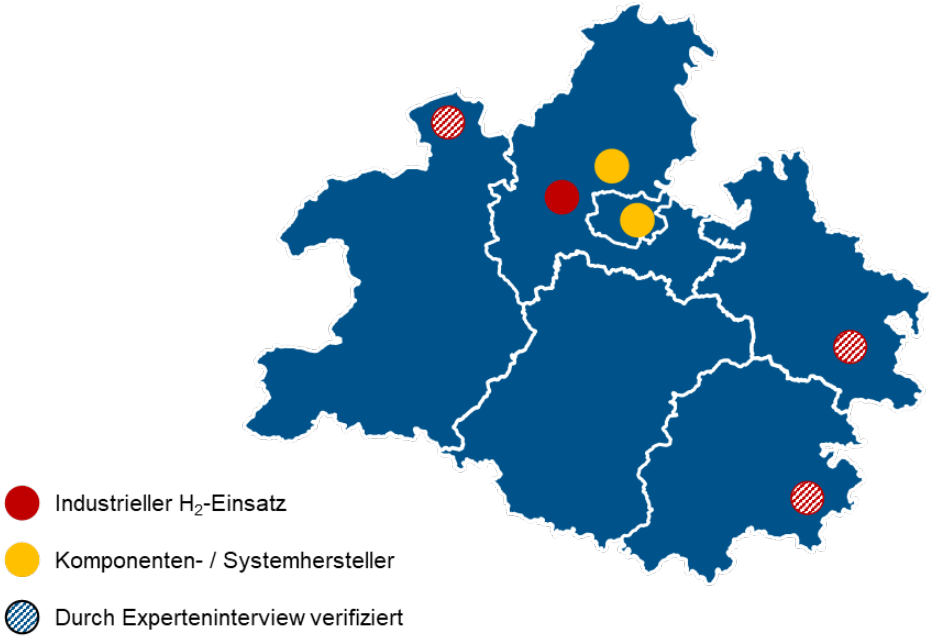


Abbildung 69: Geografische Verortung interessierter Akteure aus der Industrie (basierend auf den Ergebnissen der Online-Umfrage & Experteninterviews)

Konkrete Mengen wurden nur vereinzelt von Akteuren im Rahmen der durchgeführten Dialog-Formate kommuniziert. In der folgenden Abbildung 70 sind diese Mengen als absolute Zahlen sowie in Relation zu den im Rahmen des studienbasierten Ansatzes ermittelten Potenzialen dargestellt.

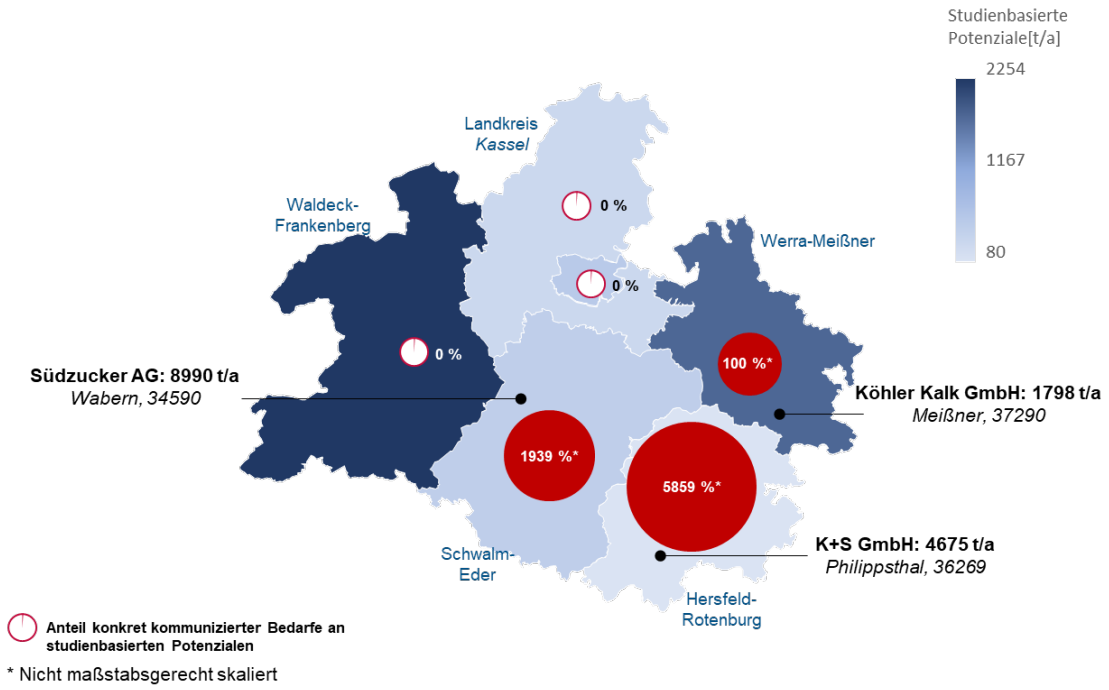


Abbildung 70: Gegenüberstellung studienbasierter sowie im Dialog identifizierter H_2-Bedarfe aus der Industrie für das Jahr 2030

Konkrete Bedarfe wurden lediglich in den Kreisen Schwalm-Eder, Hersfeld-Rotenburg sowie Werra-Meißner kommuniziert. Es ist festzustellen, dass bereits einzelne Akteure den Potenzialrahmen des studienbasierten Ansatzes deutlich übersteigen. Für Südzucker ist festzuhalten, dass die gemeldeten Bedarfe in der Größenordnung der datenbasierten Analyse und deutlich über den Potenzialen der studienbasierten Analyse liegen.

2.2.2 Potenzieller künftiger Wasserstoff in Mobilität und Logistik

Wie in der Industrie wurde auch für Mobilitätsanwendungen die konkreten Planungen und Projekte regionaler Akteure in den zuvor beschriebenen Dialogformaten abgefragt. In den folgenden Absätzen ist die Auswertung dieser Austausche detailliert dargestellt.

Von den 38 Teilnehmern der Online-Umfrage betreiben 55 % eine betriebliche Fahrzeugflotte bzw. haben einen Dienstleister hierfür beauftragt. Der nachfolgende Abschnitt bezieht sich ausschließlich auf die Ergebnisse aus der Akteursbefragung mit einem Mobilitätsbezug. Von diesen Akteuren ordnen sich 33 % der Intralogistik zu. Von diesen 33 % wiederum möchten nur 14 % der Akteure H2-Flurförderfahrzeuge beschaffen.

Im Schwerlastverkehr hingegen möchten 27 % der befragten Akteure bis 2025 Wasserstoff-LKW beschaffen. Von der Anschaffung eines Wasserstoff-LKWs bis hin zur Umrüstung der kompletten LKW-Flotte unterscheiden sich die Dimension der LKW-Beschaffungen allerdings.

Im Bereich der städtischen Mobilität betreiben 16 % der befragten Akteure Busse, z. B. für den ÖPNV. Von diesen Akteuren existieren bereits bei einem Drittel der teilnehmenden Akteure

Planungen bis zu 50 Wasserstoff-Busse zu beschaffen. Weitere 11 % der Teilnehmenden sind in städtischen Betrieben für Abfallentsorgung sowie Wasserversorgung oder Grünordnung tätig.

Durch die Experteninterviews konnte ein tiefergehender Einblick in die Wasserstoffvorhaben des nordhessischen Mobilitätssektor gewonnen werden. Dafür wurde mit sechs regionalen Akteuren gesprochen. Bei diesen Akteuren liegt der Schwerpunkt auf der Beschaffung von Wasserstoff-Fahrzeugen. Auf die Ergebnisse in Bezug auf H2-Tankstellen wird in Kapitel 3.5.4. ausführlich eingegangen. Die verbleibenden Akteure planen die folgenden Wasserstoffaktivitäten im Mobilitätssektor:

- Remax Direkt: Beschaffung von H2-PKW
- K+S: Einsatz von bis zu 5 MW für den Logistikbetrieb am Standort in Nordhessen
- Nordhessischer Verkehrsverbund (NVV): Berücksichtigung von Wasserstoffantrieben in ihren Ausschreibungen
- Sera Hydrogen: zwei H2-PKW bereits vorhanden, Beschaffung weiterer PKW möglich
- Frölich Reisen: Antrag auf Fördermittel für fünf H2-Busse gestellt
- Hexagon Purus: Versorgung der eigenen Logistik ab 2025 durch eigene H2-Tankstelle

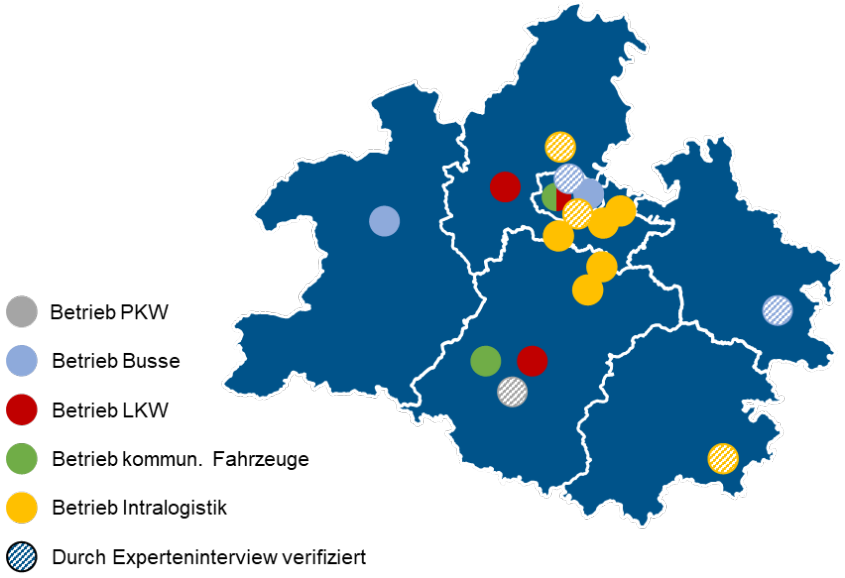


Abbildung 71: Geografische Übersicht der interviewten Akteure aus dem Mobilitätsbereich (Ergebnisse aus Online-Umfrage & Experteninterviews)

Im Bereich der Mobilität- und Logistik, konnten bei vier teilnehmenden Akteuren konkrete Bedarfsmengen ermittelt werden.

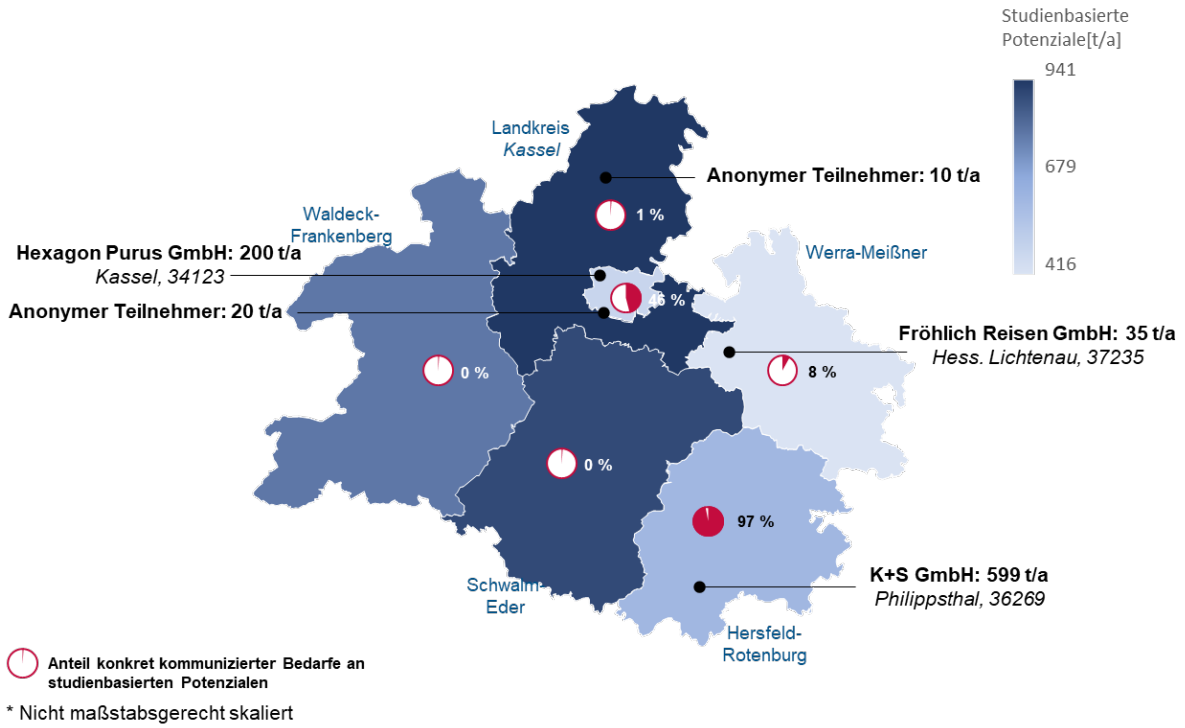


Abbildung 72: Gegenüberstellung studienbasierter sowie im Dialog identifizierter H_2-Bedarfe aus der Mobilität für das Jahr 2040

Hier konnten in den Landkreisen Kassel, Werra-Meißner sowie Hersfeld-Rotenburg und in der Stadt Kassel konkrete Bedarfe ermittelt werden. Gerade in den Regionen mit studienbasiert den höchsten Bedarfen Schwalm-Eder, Waldeck-Frankenberg konnten keine, oder im Landkreis Kassel lediglich sehr geringe konkrete Bedarfe identifiziert werden.

2.2.3 Regionales Tankstellennetz

Aus den Experteninterviews ergaben sich wie bereits in Kapitel 3.2.3 aufgelistet 6 Akteure, die Wasserstoffaktivitäten planen. Daraus lassen sich für die Standortermittlung folgende Informationen ableiten:

- Remax Direkt GmbH: Als niederschwelliger Einstieg für das Unternehmen wäre eine Betankung von Wasserstoff Fahrzeugen auch an anderen öffentlichen Tankstellen in der Nähe möglich. Der vorgeschlagene Standort Nr.3 Knüllwald ist nur 19 km vom Betriebshof in Frielendorf entfernt und von dort gut über die B254 und B323 erreichbar.
- Sera Hydrogen GmbH: Sera Hydrogen ist selbst ein Hersteller von Wasserstoff Tankstellen und verfügt derzeit über zwei Wasserstoff betriebene Firmenfahrzeuge. Die Anschaffung weiterer Fahrzeuge ist noch in Diskussion. Es soll eine 70 MPa Tankstelle auf dem Werksgelände in Immenhausen oder in 10 – 20 km Entfernung aus eigener Herstellung errichtet werden. Die Tankstelle soll, wenn überhaupt, dann nur über Tankkarte mit Einweisung öffentlich nutzbar werden. Immenhausen liegt 10 km von dem vorgeschlagenen Standort Nr 8 Hofgeismar entfernt und ist gut über die B83 erreichbar.
- Frölich Reisen: Das Busunternehmen, das einen Förderantrag für 5 Wasserstoffbusse gestellt hat, liegt mit 2 km Entfernung fast direkt am vorgeschlagenen Standort Nr. 4 Hessisch Lichtenau. Sollte sich der vorgeschlagene Standort an der bestehenden Tankstelle nicht umsetzen lassen, so könnte auch eine öffentliche Tankstelle am Betriebshof der Firma Frölich Reisen in Erwägung gezogen werden.

- Hexagon Purus: Das Unternehmen ist selbst im Bereich Wasserstoff tätig und baut Wasserstoff Tanks und Transportbehälter (Trailer). Für den eigenen Logistikbereich bestünde kein hoher Wasserstoffbedarf. Das Unternehmen hat einen Sitz in der Otto-Hahn-Straße in Kassel, nur ca. 3 km entfernt von der bereits bestehenden H2 Mobility Tankstelle Lohfelden. Hexagon Purus sieht ein Geschäftsfeld darin, Wasserstoff an Erzeugungsanlagen abzuholen und über mobile Tankstellenlösungen an Standorten im Raum Kassel anzubieten. Dabei würde das Unternehmen aufgrund der eigenen Logistikströme einen Standort für eine mobile Tankstelle Richtung Westen bevorzugen.
- Für K + S und den Nordhessischen Verkehrsverbund können in diesem Zusammenhang keine konkreten Standorte abgeleitet werden. Der Standort Philippstal von K+ S liegt nur 4 km entfernt vom Standort Unterbreizbach in Thüringen an dem K+S bereits im Rahmen vom HyExpert Wartburgkreis eine Wasserstoff Tankstelle plant.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die aus überregionalen Überlegungen vorgeschlagenen Standorte auch für die konkret ermittelten Bedarf geeignet sind.

2.2.4 Transport und Speicherung Regionale Projekte & Initiativen

Von den 40 teilnehmenden Akteuren an der Online-Umfrage betreiben mehr als 20 % Gas-, Strom- oder Wärmenetze. Im Austausch mit ihrem jeweiligen vorgelagerten Infrastrukturstruktur zum Thema Wasserstoff stehen nur 38 %. Von diesen Netzbetreibern haben ebenfalls bereits 38 % eine **Wasserstoffstrategie** für ihr Unternehmen entwickelt, die Eckpunkte wie die Umstellung der bestehenden Infrastruktur auf Wasserstoff oder die Initiierung von internationalen Transportketten vorsehen. Die folgenden Ergebnisse basieren ausschließlich auf den Rückmeldungen der Netzbetreiber, die bereits eine Wasserstoffstrategie erarbeitet haben.

Nur einer dieser Netzbetreiber plant basierend auf der vorhandenen Wasserstoffstrategie den **Neubau von Wasserstoffinfrastruktur**. Die restlichen Netzbetreiber planen hingegen die Umstellung ihrer bestehenden Infrastruktur auf 100 % Wasserstoff. Dabei haben bereits 67 % dieser Netzbetreiber **konkrete Leitungsabschnitte identifiziert** und eine Wasserstoff-**Tauglichkeitsprüfung** für Beimischungen bzw. Umstellungen der Transportinfrastruktur durchgeführt.

Im Rahmen des Netzbetreiberforums, welches innerhalb dieses Projekts durchgeführt wurde, konnten insbesondere die Projekte FLOW [188] der GASCADE, ONTRAS und Terranetz BW sowie TH2ECO [189] der Ferngas Netzgesellschaft, als potenzielle, überregionale Anknüpfungspunkte identifiziert werden.

Beide Projekte werden im Folgenden kurz beschrieben.

FLOW

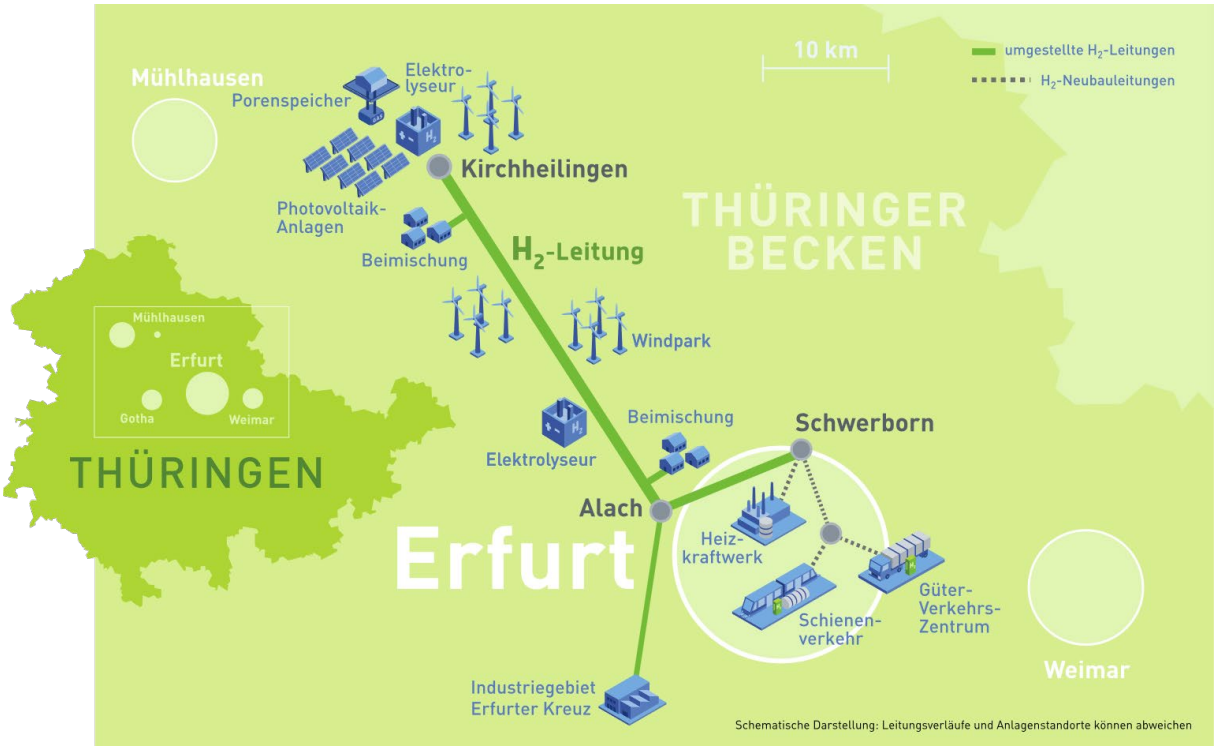
Mit dem Projekt „Flow – making hydrogen happen“ soll bis 2028 eine überregionale Transportleitung in einer Nord-Süd-Route aufgebaut werden, um so wichtige Wasserstoffmärkte zu verbinden. Abbildung 73 gibt einen Überblick über die geplante Route. Der Aufbau des 1100 km langen Pipelinesystems von Lubmin bis in die Region Stuttgart soll hauptsächlich durch die Umwidmung von bestehenden Erdgasleitungen erfolgen. Von diesen sollen die ersten Leitungsabschnitte bereits 2025 in Betrieb genommen werden. Um die Resilienz des Systems zu erhöhen ist ein Anschluss an Kavernenspeicher in Brandenburg, Sachsen-Anhalt und Hessen möglich. In Bezug auf Nordhessen ist insbesondere der

Anschluss des Speichers Reckrod von Interesse. Die Einspeisekapazität in der Region Lubmin und aus der Ostsee, vor Allem durch die direkte Verbindung nach Bornholm (Interconnector Bornholm-Lubmin) ist mit 20 GW angesetzt. Perspektivisch sind Anschlüsse nach Polen, Tschechien, Frankreich, Dänemark, die Schweiz und in die nordwestliche Richtung denkbar. Insbesondere bei letzterem wäre eine Trassenführung von Erfurt über Kassel in Richtung der Niederlande denkbar, wodurch Nordhessen an das geplante Pipelinenetz angeschlossen werden würde.

Abbildung 73: Geplanter Trassenverlauf und benachbarte Projekte und Anknüpfungspunkte des Projektes FLOW.

TH2ECO

Dieses in Thüringen verortete regionale Projekt hat das Ziel den Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur innerhalb Thüringens voranzutreiben. Hierfür werden die erneuerbaren Energien aus lokalen Windkraftanlagen in der Region von Kirchheiligen bzw. dem thüringer Becken zur Erzeugung von grünem Wasserstoff genutzt. Das Gas wird anschließend zu seinen Abnehmern in den Raum Erfurt transportiert. Hierfür werden ca. 42 km Erdgasleitung umgewidmet sowie ein 3 km langer Leitungsabschnitt neu gebaut. Zunächst sollen das Heizkraftwerk Erfurt, sowie ein Teil des Erfurter Gasnetzes mit Wasserstoff versorgt werden. Mittelfristig soll das Industriegebiet am Erfurter Kreuz und der Schienenverkehr an das Netz angeschlossen werden. Langfristig ist eine Kooperation mit bzw. ein Anschluss an angrenzende Stadtwerke sowie interessierte Industrieunternehmen möglich und ein Anschluss an das European Hydrogen Backbone geplant. Hier bietet sich für Nordhessen als angrenzende Region weiteres Potenzial in das überregionale Wasserstoffnetz eingebunden zu werden.


10 km
umgestellte H_2-Leitungen
H_2-Neubauleitungen
Mühlhausen
Porenspeicher
Elektro-
lyseur
Kirchheilingen
Photovoltaik-
Anlagen
Beimischung
H_2-Leitung
THÜRINGER
BECKEN
Windpark
Mühlhausen
Erfurt
Gotha
Weimar
THÜRINGEN
Elektrolyseur
Beimischung
Schwerborn
Alach
Erfurt
Heiz-
kraftwerk
Schienen-
verkehr
Güter-
Verkehrs-
Zentrum
Weimar
Industriegebiet
Erfurter Kreuz
Schematische Darstellung: Leitungsverläufe und Anlagenstandorte können abweichen

3 Clusterbildung

Für Nordhessen ist die Identifikation von Clustern sinnvoll, um Wasserstoff als Energieträger in der Region zu etablieren und Synergieeffekte beim Ausbau der notwendigen Infrastruktur zu nutzen. Zudem können sich neue Unternehmen in einem bestehenden Cluster ansiedeln und dadurch das Ökosystem stärken.

Wie die vorherigen Abschnitte gezeigt haben, sind sowohl Erzeugungs- als auch Anwendungspotenziale in Nordhessen vorhanden. Dem AP7 liegt die Fragestellung zugrunde, inwiefern die identifizierten Potenziale verbunden werden können. Im Rahmen der „Clusterbildung“ sind zwei mögliche Ansätze diskutiert worden. Eine Möglichkeit ist das Übereinanderlegen der Ergebnisse der vorherigen Kapitel. Regionen, die einerseits Potenziale als Quellen sowie andererseits als Senken aufweisen, eignen sich demnach tendenziell als Standorte für ein Cluster. Der Aufbau einer Wasserstoff-Infrastruktur bzw. die Entwicklung von Wasserstoff-Projekten liegt hier besonders nahe. Im Gegensatz dazu ist auch eine dezentralisierte Vorgehensweise denkbar. Hierbei werden die Cluster „von unten aus“ gedacht und basierend auf konkreten Akteuren vor Ort entwickelt (Bottom Up Ansatz). Somit kann besser auf die lokalen Bedingungen eingegangen werden. Für die Bearbeitung des Arbeitspakets wurde daher letztere Vorgehensweise gewählt. Clusterbildung wurde in diesem Sinne als Entwicklung von sogenannten „Lupenräume“ gesehen. Diese können als Keimzellen für eine künftige Wasserstoffwirtschaft verstanden werden und werden im Folgenden erläutert.

3.1 Lupenraumbetrachtung nach der Bottom Up Methode

Die Lupenraumbetrachtungen zu potenziellen Keimzellen von Aktivitäten im Rahmen einer aufstrebenden Wasserstoffwirtschaft in Nordhessen wurden parallel zu den Ermittlungen von möglichen Potenzialen zur Erzeugung und zur Anwendung von Wasserstoff durchgeführt. Bei der Betrachtung der verschiedenen zur Verfügung stehenden Technologien zur Herstellung von Wasserstoff wurde versucht, diese im Zusammenhang mit vorhandenen, adressierbaren Industriezweigen und deren Stoff- und Energieströmen zu bringen. Nicht alle angedachten potenziellen Lupenraum-Partner konnten im Rahmen der Untersuchung zu den Themen befragt oder in die Untersuchung eingebunden werden. Daher bedürfen die nachfolgend aufgeführten Kombinationen verschiedener Parteien eines Clusters, eine genauere Überprüfung, um sowohl das Zusammenspiel der angedachten Stoff- und Energieströme als auch deren wirtschaftlichen Betrieb darzulegen. Vor diesem Hintergrund können die beschriebenen Lupenräume als Ausganspunkte für Pilotprojekte angesehen werden und beispielsweise im Rahmen der HyPerformer-Förderung umgesetzt werden, um als Keimzellen für eine Wasserstoffwirtschaft in Nordhessen zu fungieren.

Eine der größten Herausforderungen bei angehenden Projektentwicklungen in den aufgezeigten Lupenräumen dürfte es sein, einen Investor und Betreiber für die Anlagen zu finden. Zum einen sind die notwendigen Investitionen in diese neuen Technologien zur Wasserstoffherstellung recht hoch, zum anderen sind sowohl die Investition als auch der Betrieb an Risiken gekoppelt, welche es abzuwägen gilt. Das Betreiben von Anlagen zur Wasserstofferzeugung erfordert zusätzliches Knowhow, Arbeitskraft, Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen und damit für viele Unternehmen auch eine Erweiterung des Portfolios beziehungsweise eine gewisse Entfernung vom Kerngeschäft. Des Weiteren sollten Stoff- und Energieströme langfristig gesichert sein und es ist ratsam bereits zu Projektbeginn über alternative Quellen nachzudenken. Systemisch gesehen sollten die Stoff- und

Energieströme so genutzt werden, dass sie einen größtmöglichen Nutzen erzielen und somit die Amortisation der Investition so attraktiv wie möglich gestalten.

3.2 Lupenraum Kläranlage KasselWasser

Im Zentrum dieser Betrachtung steht das Klärwerk von KasselWasser gelegen im Stadtgebiet von Kassel.

Die Technologie:

In einem Verfahren, wie es beispielsweise durch die Firma Blueflux eingesetzt wird, kommen jegliche biogene Abfälle wie Gülle, Klärschlamm oder jegliche organische Haushaltsabfälle in einem nassen Gemisch mit mindestens 30 % Trockensubstanz in einen Reaktor. Selbst Kunststoffe können dem Gemisch zugefügt und ebenso verarbeitet werden. Bei einem gewissen Druck und hoher Temperatur entsteht bei der Hydrolyse in einem ersten Schritt pulverförmige Braunkohle und Wasserdampf. Beide Produkte werden im zweiten Schritt einem Vergasungsprozess zugeführt und es entsteht Synthesegas. Im dritten Schritt entsteht in einer CO-Shift-Reaktion Wasserstoff. Während die entstandene Kohle ebenso als hochwertiger Dünger in der Landwirtschaft eingesetzt werden kann, wird der Wasserstoff vom Produktgas abgetrennt, aufgefangen und kann anderen Zwecken zugeführt werden. Zudem hat die Anlage ein hohes Abwärmepotenzial, was durch entsprechende Vorkehrungen ebenfalls nutzbar gemacht werden kann. Energetisch gesehen ist das Verfahren, nach eigener Aussage, vier Mal effizienter im Vergleich zu Elektrolyseverfahren.[12]

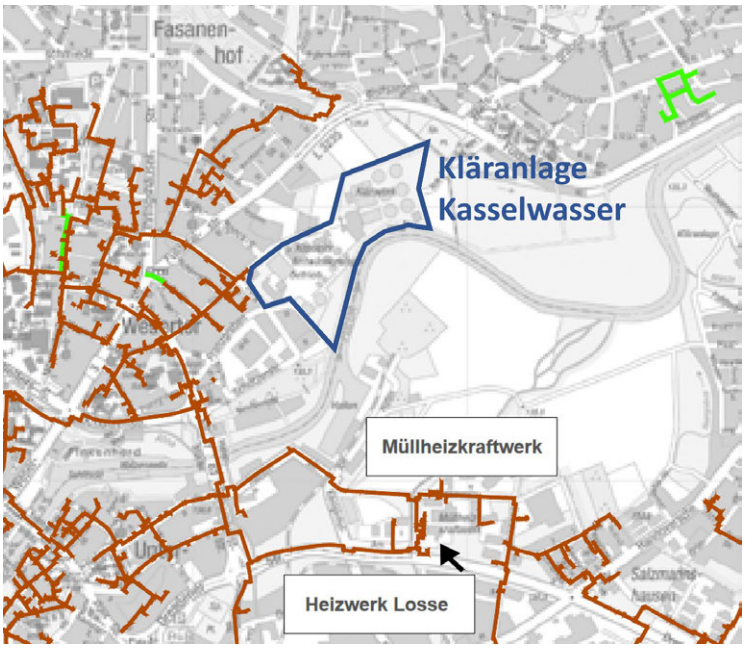


Abbildung 74: Fernwärmenetz und Kläranlage Kassel[13]

Die Situation:

Aktuell wird der Klär-schlamm vom Klärwerk Kasselwasser in ein Kraftwerk im Süden der Stadt Kassel gebracht. Dort wird er getrocknet und verbrannt wodurch Energie in Form von Strom und Wärme erzeugt wird.

Mögliches Szenario:

Durch den Einsatz der aufgezeigten Wasserstofferzeugungs-technologie könnten mehrere positive Ansätze verfolgt werden. Wird der Klärschlamm vor Ort verwertet, entfällt der

[12] Quellen: Gespräch mit Dr. Ulrich Mach am 22.02.22 und Website Blueflux, abgerufen am 16.02.2022, https://www.bluefluxenergy.com

[13] Quelle: https://www.ew-kassel.de/fileadmin/ewks/docs/Fernwaermenetz/Fernwaerme_Kassel_Stand_2022.pdf, Abruf am 19.01.2023

Transport und es kann CO2 eingespart werden. Bei der Verkohlung des Klärschlammes entsteht Bio-Kohle, welche in der Landwirtschaft zur Düngung eingesetzt werden kann. Überschüssige Abwärme könnte über einen bidirektionalen Anschluss an das Nahwärmenetz eingespeist werden. Der entstehende Wasserstoff kann aufgefangen werden und in internen Prozessen einen Eigenbedarf decken sowie zur Betankung von Fahrzeugen der Stadtreiniger eingesetzt werden. Ebenso ist es denkbar den erzeugten Wasserstoff in umliegenden Industrien einzusetzen, wie beispielsweise in der VW-Gießerei.

Ebenso könnten zusätzliche Biomasse-Ressourcen aus nahegelegenen Industrien eingebunden werden, um möglichst viel Wasserstoff aus den vorhandenen Potenzialen herzustellen oder um unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten eine geeignete Anlagengröße auszuwählen. Beispielsweise werden mehrere tausend Tonnen Biomüll jährlich aus Kassel nach Göttingen transportiert, um dort weiterverarbeitet zu werden. Durch die lokale Einbindung dieser Ressourcen kann man sowohl CO2 für den Transport einsparen als auch die Biomasse einer noch gewinnbringenderen Verwertung zuführen.[14]

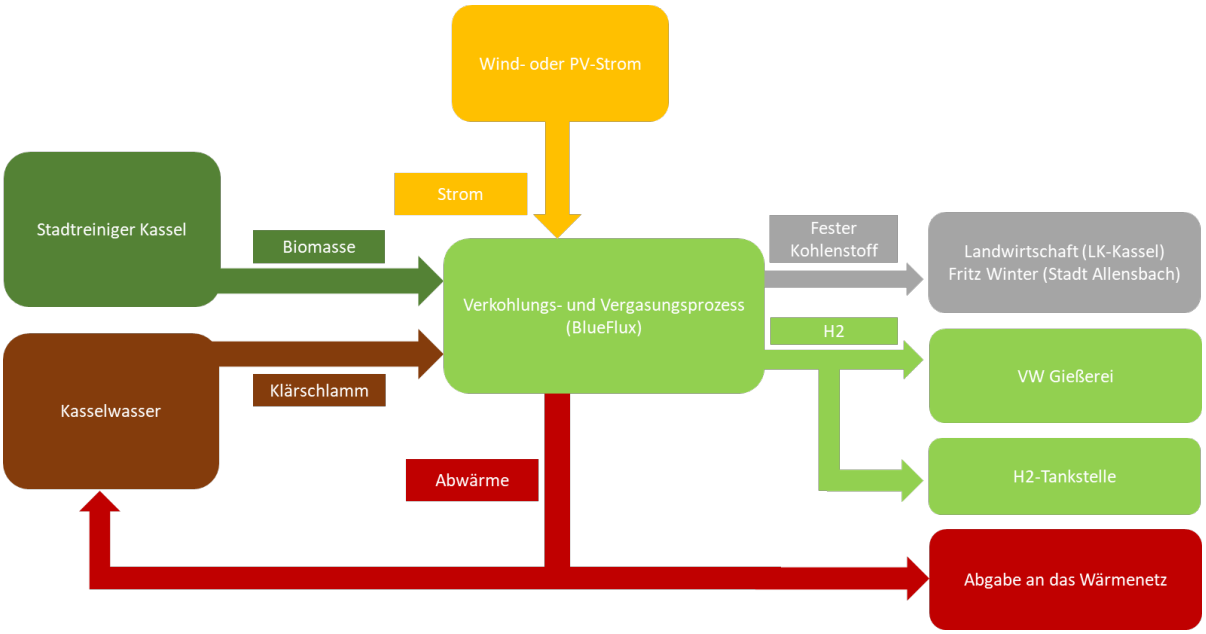


Abbildung 75: Systembild KasselWasser

Mögliche Partner:

[14] Quelle: Telefonat mit Hr. Schaumburg/Stadtreiniger Kassel am 12.10.22

- Blueflux - Dr.-Ing. Ulrich Mach: Anlagenhersteller
- KasselWasser: lokales Abwasserunternehmen
- Stadtreiniger: Lieferant von zusätzlicher Biomasse, potenzieller Verbraucher von H2 durch Fahrzeuge des eigenen Fuhrparks
- Städtische Werke Energie + Wärme: Abnehmer von Abwärme
- VW-Gießerei: potenzieller Abnehmer von Wasserstoff
- Eisengießerei Fritz Winter: potenzieller Abnehmer von Bio-Kohle
- Landwirte LK Kassel: potenzieller Abnehmer von Bio-Kohle

3.3 Lupenraum Wabern

Bei der Betrachtung des Lupenraum Waberns steht die Abwasseraufbereitung des Ortes Wabern im Zentrum. Hierbei spielen sowohl die Abwässer aus der kommunalen Abwasserwirtschaft als auch jene des Unternehmens Südzucker eine Rolle.

Die Technologie:

Das Unternehmen Graforce hat mit der Schmutzwasserplasmalyse ein Verfahren entwickelt bei welchem mithilfe eines hochfrequenten Spannungsfeldes im Wasser enthaltene Kohlenstoff- und Stickstoffverbindungen (wie Harnstoff, Aminosäuren, Nitrate und Ammonium) in einzelne Kohlenstoff-, Stickstoff-, Wasserstoff- und Sauerstoffatome aufbricht. Diese einzelnen Atome verbinden sich neu zu Wasserstoff, Stickstoff und Methan welche durch eine Membran sortiert und in Gasbehältern eingespeichert werden. Zurück bleibt gereinigtes Wasser, welches dem Kreislauf zurückgeführt werden kann.

Die Situation:

Südzucker hat ein recht hohes Aufkommen an Abwässern aus der Zuckerherstellung. Ebenso hat Südzucker einen enormen Energiebedarf, um die Prozesse für die Zuckerherstellung zu betreiben. Auch die Gemeinde Wabern betreibt ein, gleich neben der Zuckerfabrik gelegenes kommunales Klärwerk.

Mögliches Szenario:

Die Abwasseraufkommen beider Klärwerke könnten in einer gemeinsamen Anlage zur Extrahierung von nutzbaren Gasen eingebunden werden. Eine Bedingung für eine Umsetzung ist ein Faulturm, welcher ammoniumhaltiges Zentratwasser hinterlässt (Ammoniumgehalt von mindestens 1600 mg/m³). In Verfahren der Schmutzwasserplasmalyse kann Co2-neutraler Strom aus erneuerbaren Energiequellen zum Einsatz gebracht werden und es entstehen neben gereinigtem Wasser Wasserstoff, Methan, CO2 und Stickstoff. Während der Wasserstoff in einer H2-Tankstelle veräußert werden könnte, kann das Methan in einem BHKW verbrannt werden und somit Strom für die beteiligten Partner generiert werden. Die bei der Verbrennung des Methans entstehende Abwärme sowie die Abwärme aus dem Schmutzwasserplasmalyse-Verfahren könnten über ein lokalen Nahwärmenetz sowohl in der Kläranlage als auch bei dem Unternehmen Südzucker eingesetzt werden. Der erzeugte Sauerstoff kann in verschiedenen Prozessen von Kläranlagen (z.B. im Belebungsbecken) eingesetzt werden. Durch den Einsatz von Sauerstoff anstelle von Luft kann die notwendige Pumpleistung deutlich reduziert werden, da weniger Gas transportiert werden muss.

Durch diverse Ansatzpunkte und die Nutzung von Synergien lassen sich die CO2-Bilanzen verschiedener Partner gleichzeitig verbessern.

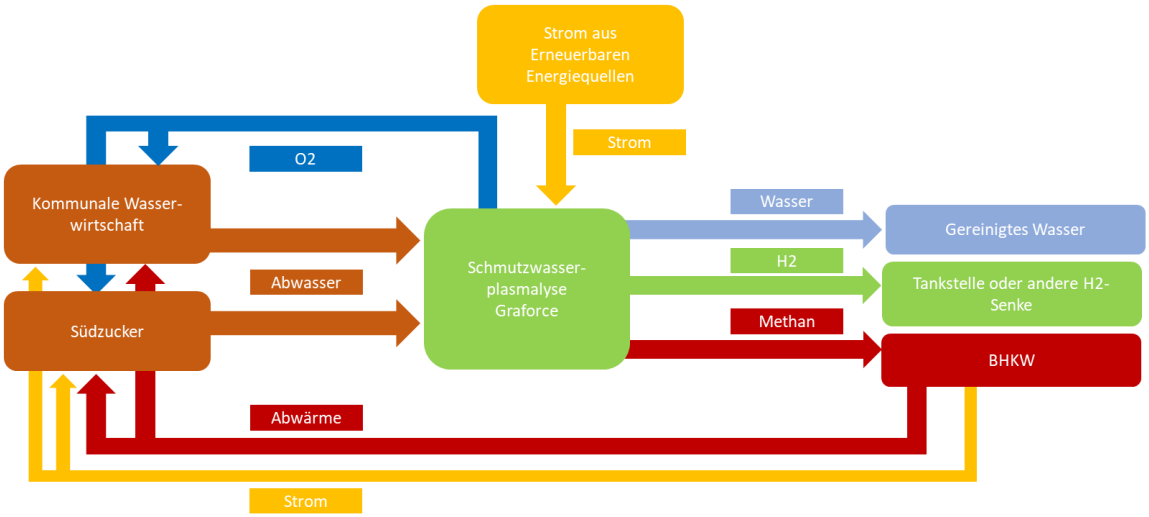


Abbildung 76: Systembild Lupenraum Wabern

Mögliche Partner:

- Graforce: Anlagenhersteller Schmutzwasserplasmalyse
- Südzucker: Abwasserlieferant, Abnehmer von Abwärme
- Kommunale Kläranlage: Abwasserlieferant, Abnehmer von Abwärme und Sauerstoff

Alternative Ansätze:

Ebenso könnte eine Verwertung der biologischen Reste aus der Zuckerherstellung in Erwägung gezogen werden. Ein Zusammenspiel von mehreren Lieferanten biologischer Abfälle könnte den notwendigen Bedarf für eine Biomassehydrolyse-Anlage decken. Hier könnte neben der Kläranlage welche Klärschlämme als Abfallprodukt einbringen könnte, ebenso die kommunale Abfallwirtschaft eine Rolle spielen. Auch weitere im Umfeld befindliche Industrien mit relevanten Abfällen könnten effektiv in ein Konzept eingebracht werden.

3.4 Lupenraum Knallhütte

Beim Lupenraum Knallhütte stehen sowohl die Brauerei Hütt in Baunatal, die Abfallwirtschaft Baunatal, das Unternehmen Volkswagen und die Städtischen Werke im Fokus der Betrachtungen.

Die Technologie:

In einem Verfahren, wie es beispielsweise durch die Firma blueFLUX eingesetzt wird, kommen jegliche biogene Abfälle wie Gülle, Klärschlamm oder jegliche organische Haushaltsabfälle in einem nassen Gemisch mit mindestens 30 % Trockensubstanz in einen Reaktor. Selbst Kunststoffe können dem Gemisch zugefügt und ebenso verarbeitet werden. Bei einem gewissen Druck und hoher Temperatur entsteht bei der Hydrolyse in einem ersten Schritt pulverförmige Braunkohle und Wasserdampf. Beide Produkte werden im zweiten Schritt einem Vergasungsprozess zugeführt und es entsteht Synthesegas. Im dritten Schritt entsteht in einer CO-Shift-Reaktion Wasserstoff. Während die entstandene Kohle ebenso als hochwertiger Dünger in der Landwirtschaft eingesetzt werden kann, wird der Wasserstoff vom Produktgas abgetrennt, aufgefangen und kann anderen Zwecken zugeführt werden. Zudem hat die Anlage ein hohes Abwärmepotenzial, welches durch entsprechende Vorkehrungen ebenfalls nutzbar

gemacht werden kann. Energetisch gesehen ist das Verfahren, nach Aussage der Firma blueFLUX, vier Mal effizienter im Vergleich zu Elektrolyseverfahren.[15]

Die Situation:

Das Unternehmen Volkswagen als einer der größten Arbeitgeber der Region hat einen hohen Energiebedarf für die Fertigungsprozesse in Baunatal und verfolgt das Ziel bis zum Jahr 2050 bilanziell CO2-neutral zu werden. Die Hütt-Brauerei, ebenfalls in Baunatal gelegen, ist ebenfalls bestrebt das Brauereihandwerk in Nordhessen, so nachhaltig wie möglich zu betreiben. Die Stadtreiniger Kassel, welche als das lokale Müllentsorungsunternehmen fungieren, transportieren jährlich mehrere tausend Tonnen biologische Abfälle zur weiteren Verwertung nach Göttingen.[16]

Mögliches Szenario:

Im Focus der Betrachtungen dieses Lupenraumes stehen sowohl die biologischen Abfälle der Hütt-Brauerei sowie weitere biogene Abfälle der Stadt Baunatal. In diesem Lupenraum könnte mit Hilfe des dreistufigen Verfahrens der Firma blueFLUX aus den biologischen Abfällen Wasserstoff gewonnen werden. Dieser könnte an einer Wasserstofftankstelle veräußert werden oder in energieintensiven Prozessen der VW-Gießerei zum Einsatz gebracht werden. Die Anlage kann mit Strom aus erneuerbaren Energiequellen betrieben werden. Entstehende Abwärme könnte über einen bidirektionalen Anschluss in das Fernwärmenetz eingespeist werden aber auch von den in der Nähe gelegenen Unternehmen direkt verbraucht werden.

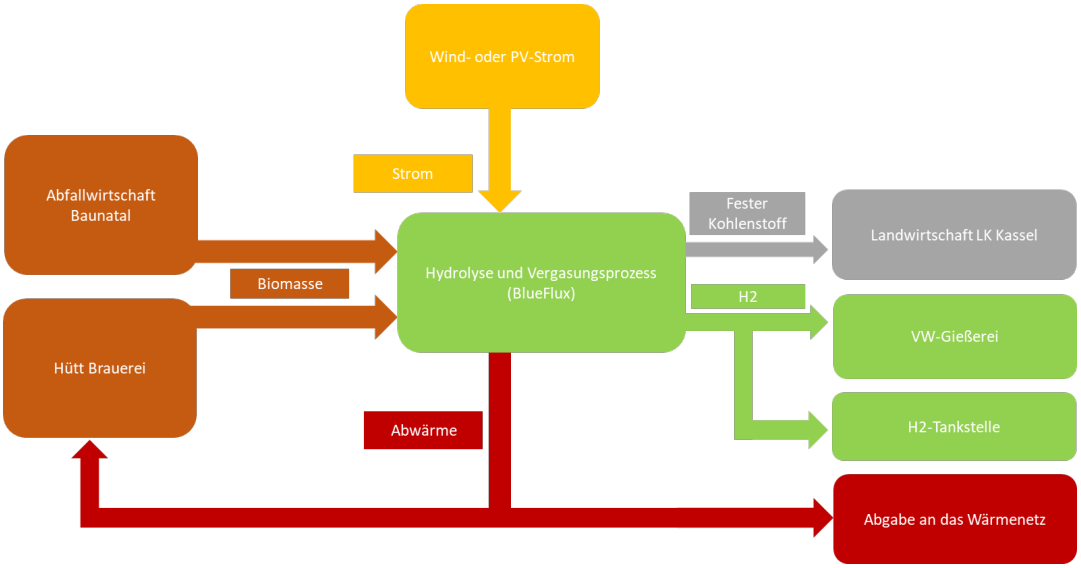


Abbildung 77: Systembild Lupenraum Knallhütte

[15] Quellen: Gespräch mit Dr. Ulrich Mach am 22.02.22 und Website blueFLUX, abgerufen am 16.02.2022, https://www.bluefluxenergy.com

[16] https://www.volkswagenag.com/de/news/stories/2019/12/what-volkswagen-is-doing-for-the-environment.html, aufgerufen am 18.04.2022

Mögliche Partner:

- Hütt-Brauerei: Lieferant von biologischen Abfällen aus dem Brauhandwerk
- Abfallwirtschaft Baunatal: Lieferant von biogenen Abfällen aus der Braunen Tonne
- VW: Wasserstoffsenke in der Gießerei, H2-Tankstellenbetreiber für eigenen Fuhrpark
- Städtische Werke Energie + Wärme: Abnehmer von überschüssiger Abwärme

3.5 Lupenraum Volkmarsen

Der Lupenraum Volkmarsen betrachtet die aktuell in Betrieb befindlichen Biogasanlagen und die umliegenden energetisch relevanten möglichen Energie- und Stoffströme.

Die Technologie:

Die Methanplasmalyse, welche beispielsweise von der Firma Graforce eingesetzt wird, ist ein Verfahren zur Herstellung von Wasserstoff durch die Spaltung von Methan (CH4) in einem Plasma, welches durch elektrische Entladungen erzeugt wird. Bei diesem Verfahren wird Methan einem Hochtemperatur-Plasma ausgesetzt, das aus einer Mischung von Wasserstoff und Stickstoff besteht. Das Plasma wird durch einen elektrischen Strom erzeugt, der durch eine spezielle Vorrichtung geleitet wird. Durch die Einwirkung des Plasmas wird das Methan in seine Bestandteile Wasserstoff (H2) und Kohlenstoff (C) zerlegt. Das Verfahren hat den Vorteil, dass es eine hohe Ausbeute an reinem Wasserstoff liefert. Es ist jedoch energieintensiv und erfordert eine sorgfältige Steuerung der Reaktionsbedingungen, um unerwünschte Nebenreaktionen zu vermeiden.

Die Situation:

In Volkmarsen gibt es aktuell zwei Biogasanlagen, deren wirtschaftlicher Weiterbetrieb in den kommenden Jahren auf dem Prüfstand stehen dürfte[17]. Die Abwärme des BHKWs wird in einem Wärmespeicher aufgefangen und kommt sowohl zur Industrieholztrocknung sowie für eine Wurstfabrik zum Einsatz.

Mögliches Szenario:

Als Alternative zum aktuellen Betriebskonzept könnte eine gemeinsam genutzte Methanplasmalyse-Anlage errichtet werden. Beide Biogasanlagen könnten als Zulieferer von Biomethan fungieren, welches durch das genannte Verfahren in die Bestandteile Wasserstoff und Kohlenstoff aufgespaltet werden kann. Der dafür notwendige elektrische Energiebedarf könnte per Power-Purchase-Agreement zum einen vom nahegelegenen Solarpark und zum anderen über zusätzlich zu installierende Solarenergieanlagen der Partner gedeckt werden. Es ist auch denkbar das hier ein Agri-PV-Konzept sowohl Rohstoffe für die Biogasanlage als auch elektrische Energie für die Methanplasmalyse erzeugen kann. Ebenso könnten in der Nähe gelegene Windkraftpotenziale an der Lieferung der notwendigen elektrischen Energie beteiligt sein. Der erzeugte Wasserstoff könnte in einer lokalen Wasserstofftankstelle

[17] Quelle: Gespräch Hr. Emde, WFA Agrargas Volkmarsen GmbH am 21.02.2023

veräußert werden oder zum Betrieb des öffentlichen Nahverkehrs dienen. Hierbei spielt zudem die Nähe zur Autobahn A44 eine Rolle. Abwärme aus der Methanplasmalyse könnte in den bereits etablierten Senken zum Einsatz kommen. Hierbei sind die Industrieholz-Trocknung sowie der Wärmespeicher zu erwähnen. Des Weiteren könnte ein Wärmenetz die Quartiersversorgung in der Umgebung übernehmen. Der im Prozess entstehende Bio-Kohlenstoff könnte ebenfalls gewinnbringend veräußert werden.

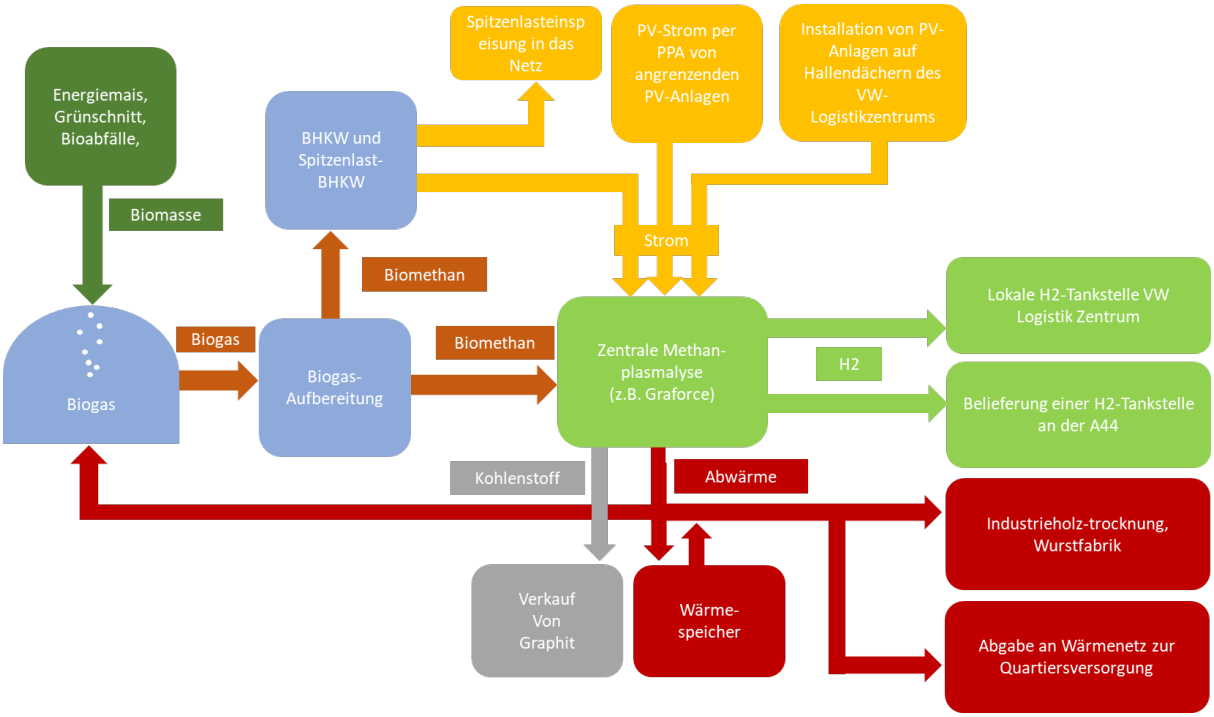


Abbildung 78 Systembild Lupenraum Volkmarsen

Mögliche Partner:

- Maschinenring/Betreiber Biogasanlagen: Biogaslieferant
- Graforce: Mehtanplasmalyse Lieferant
- Industrieunternehmen: Abnehmer für überschüssige Wärmeenergie

3.6 Potenziale für ein nachhaltiges Industriegebiet in Waldau

Im Rahmen des Klimaschutzplanes Kassel soll der Industriepark Waldau dekarbonisiert werden und erste Maßnahmen zielen darauf ab unternehmensspezifische Transformationskonzepte zu entwickeln und die Abwärmepotenziale der ansässigen Unternehmen in einem Abwärmekataster zu erfassen.

Die Technologie: Die Elektrolyse ist ein Verfahren zur Erzeugung von Wasserstoff, bei dem Wasser mithilfe elektrischer Energie in seine Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff aufgespalten wird. Hierbei wird elektrischer Strom durch eine wässrige Lösung von Elektrolyten geleitet, die üblicherweise aus Natron- oder Kalilauge bestehen. Die Lösung wird zwischen zwei Elektroden platziert, die als Kathode und Anode bezeichnet werden.

Durch Anlegen einer elektrischen Spannung zwischen den beiden Elektroden wird die Wassermolekülstruktur aufgebrochen und der enthaltene Wasserstoff wird an der Kathode freigesetzt. Gleichzeitig wird an der Anode Sauerstoff erzeugt. Der erzeugte Wasserstoff kann dann gespeichert und als Brennstoff in Brennstoffzellen oder anderen Anwendungen genutzt werden.

Die Elektrolyse sollte unter Verwendung erneuerbarer Energiequellen wie Wind- oder Solarenergie erfolgen, was als grüne Elektrolyse bezeichnet wird. Dies ist eine vielversprechende Methode zur Erzeugung von Wasserstoff, da sie eine nachhaltige und klimafreundliche Energiequelle darstellt.

Die Situation: Im Industriepark Waldau gibt es eine Vielzahl von Unternehmenssitzen mit unerschlossenen Energieerzeugungspotenzialen. Hierbei sind insbesondere die ungenutzten Dachflächen hervorzuheben, welche sich potenziell zur Erzeugung von Solarenergie eignen.

Ein Szenario: Bei einer zentral gelegenen Wasserstofferzeugung könnten umliegende Dachflächen genutzt werden mit dem Ziel möglichst viel Solarenergie zur Wasserstofferzeugung zu installieren. Hierfür könnte das von der Stadt Kassel initiierte Vorhaben zur Dekarbonisierung des Industriegebietes Waldau unterstützen. Die geplante energetische Beratung von bis zu 50 Unternehmen in dem Industriegebiet könnte dabei als Ausgangspunkt genutzt werden. Dabei könnte bei den Unternehmen angeregt werden die maximal mögliche Kapazität an Solarenergie zu installieren und die über den Eigenbedarf der Unternehmen hinausgehenden Mengen an Solarenergie einer zentralen Elektrolyseeinheit im Industriegebiet Waldau zur Verfügung zu stellen. Dabei können die Unternehmen einen Teil des Eigenbedarfes mit Solarenergie decken und einen Gewinn über den Verkauf von überschüssigem Strom oder die Verpachtung von Dachflächen generieren. Aus Sicht der Elektrolyseeinheit können so zusätzliche grüne Energiequellen gewonnen werden, um grünen Wasserstoff zu erzeugen.

Ebenso ist es denkbar vorhandene Flächen in der unmittelbaren Nähe des Industriegebietes für eine grüne Energieerzeugung heranzuziehen. Dabei ist beispielsweise die A49, welche in einer West-Ost-Ausrichtung nördlich des Industriegebietes Waldau entlangführt, ideal gelegen, um eine mit PV-Modulen bestückte Schallschutzwand mit Südausrichtung zu installieren, welches eine weitere Energiequelle für einen Elektrolyseur darstellen könnte. Auch die vier Autobahnauffahrten, welche an das Industriegebiet Waldau grenzen könnten als geeignete Flächen für eine solare Energieerzeugung herangezogen werden.

Für die sinnvolle Verwertung der entstehenden Abwärme könnte gezielt für eine Ansiedelung von Industrien geworben werden, welche diese kostengünstig in ihre Prozesse einbinden könnten, um eine maximale Ausnutzung der Energieströme zu realisieren.

3.7 Ausblick Lupenräume

Die aufgeführten Lupenräume stehen exemplarisch für das Potenzial in der Region und zeigen die vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten. Weitere Lupenräume sind denkbar, beispielsweise im Industriegebiet Kassel Calden oder im Gewerbegebiet Langes Feld. In allen betrachteten Fällen und darüber hinaus ist weiterer Austausch mit den lokalen Akteuren notwendig, welcher weit über die einjährige Projektlaufzeit hinausgeht. Die einzelnen Lupenräume stellen somit

die Diskussionsbasis für künftige Wasserstoff-Umsetzungsprojekte dar. Aus den einzelnen Projekten bzw. Clustern kann sich in den kommenden Jahren ein Wasserstoffökosystem in Nordhessen entwickeln.

3.8 Akzeptanz und Innovationen

Innovation ist der Schlüssel zum Erfolg für jede neue Technologie, und wasserstoffbasierte Technologien sind da keine Ausnahme. Wasserstoff hat das Potenzial, den Energiesektor zu revolutionieren und eine wichtige Rolle bei der Abschwächung des Klimawandels zu spielen.

Neben der Innovation ist die Akzeptanz von wasserstoffbasierten Technologien ebenso wichtig. Innerhalb des durchgeführten Dialog-Ansatzes ist festzustellen, dass die Beteiligung an den durchgeführten Formaten in Summe verhältnismäßig zurückhaltend war. Innerhalb der teilnehmenden Akteure ist ein großes Interesse, jedoch bisher nur vereinzelt ein hoher Konkretisierungsgrad hinsichtlich bereits durchgeführter, detaillierter Analysen und Bedarfsabschätzungen festzuhalten. Für die weitere Konkretisierung und flächendeckende sowie sektorübergreifende Aktivierung eines Wasserstoffmarkts in der Region sind daher weitere Informations- sowie Dialogformate empfehlenswert. Mit diesen kann sowohl über Wasserstoff als Energieträger und Rohstoff, die mit seiner Anwendung verknüpften Technologien informiert werden, aber auch konkrete Beispiele zur Nutzung geschaffen werden. Insbesondere „Mobilitätstage“ mit Exponaten und Testfahrzeugen mit Wasserstoffantrieb sind hier eine ideale Möglichkeit, die Technologie mit vertretbarem Aufwand erlebbar zu machen.

Für industrielle Anwendungen gilt es vor allem, Sensibilität dafür zu schaffen, dass perspektivisch Versorgungskonzepte ohne fossile Energieträger und Ressourcen erforderlich sein werden. Innerhalb dieser Konzepte ist Wasserstoff jeweils anwendungsfall- bzw. prozessspezifisch zu bewerten.

3.9 Vernetzung und Digitalisierung

3.9.1 Aufzeigen der Anwendungsfelder zur Vernetzung der relevanten Systeme in der Wertschöpfungskette

Ziel dieses Arbeitspaketes ist es, die Möglichkeiten für ein intelligentes digitales Wasserstoffversorgungsnetz, das die Erzeugung, Speicherung und den Verbrauch von Wasserstoff steuert, zu identifizieren und die relevanten Einflussfaktoren für eine optimierte Steuerung zu untersuchen. Dazu wurden verschiedene wissenschaftliche Arbeiten gesichtet und reale Anwendungsfälle betrachtet sowie eine Modellierung und Simulation durchgeführt, um die Auswirkungen bestimmter Schlüsselparameter in einem wasserstoffbasierten Smart-Grid-Konzept aufzuzeigen.

3.9.1.1 Entwicklung eines wasserstoffbasierten intelligenten Stromnetzes

Wenn das Stromangebot aus erneuerbaren Energiequellen in einem Stromnetz die Gesamtnachfrage der Endverbraucher übersteigt, kann die überschüssige Energie zur Erzeugung und Speicherung von Wasserstoff verwendet werden, der zur Rückverstromung verwendet werden kann. Zusätzlich dienen Akkumulatoren (nachfolgend als Batterie bezeichnet) zur kurzfristigen

Energiespeicherung. Eine schematische Skizze eines solchen Smart-Grid-Konzepts aus [1] ist in Abbildung 79 zu sehen. Die Studie befasst sich mit der Integration von Wasserstofferzeugung, -umwandlung und -speicherung in einer Smart-Grid-Umgebung und konzentriert sich auf die Optimierung des dynamischen Betriebs eines Gleichrichters - einer Stromversorgungskomponente für den Elektrolyseur.

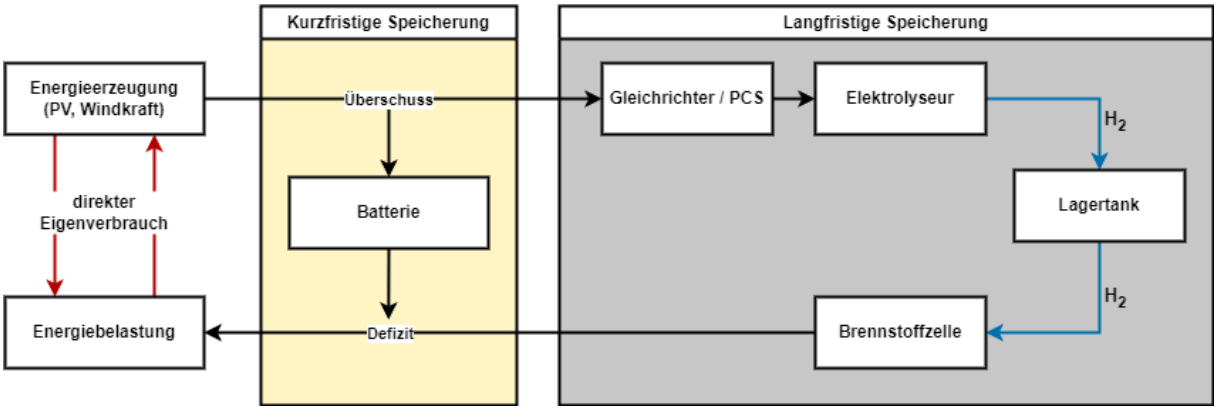


Abbildung 79: Schema eines intelligenten Stromnetzes mit Wasserstoff und Batterien [1]

Der Wasserstoff dient darin als Langzeitspeicher, um saisonale Schwankungen in der Energieerzeugung zu kompensieren. Die Speicherung des Wasserstoffs erfolgt hauptsächlich in Drucktanks bei 200 bar. Batterien mit 90 % Wirkungsgrad dienen als Kurzzeitspeicher und Puffern tägliche Schwankungen.

Die Studie entwickelt mathematische Modelle für die Komponenten des intelligenten Stromnetzes, die für definierte Zeitschritte entscheiden, wie mit dem Stromüberschuss/-defizit umgegangen werden soll, wobei die Energiebilanz aufrechterhalten wird. Im Falle eines Energieüberschusses wird der überschüssige Strom in den Elektrolyseur eingespeist, während der restliche Strom in die Batterie eingespeist wird. Bei einem Defizit speist die Batterie zunächst in das Netz ein und bei sehr niedrigem Ladezustand der Batterie wird der Wasserstoff im Speicher über die Brennstoffzelle in Strom umgewandelt. Die Entscheidungslogik zur Steuerung des Systemaufbaus ist in Abbildung 80 zu sehen, und eine solche Entscheidungslogik wurde in unserem Vorschlag für Simulationen verwendet.

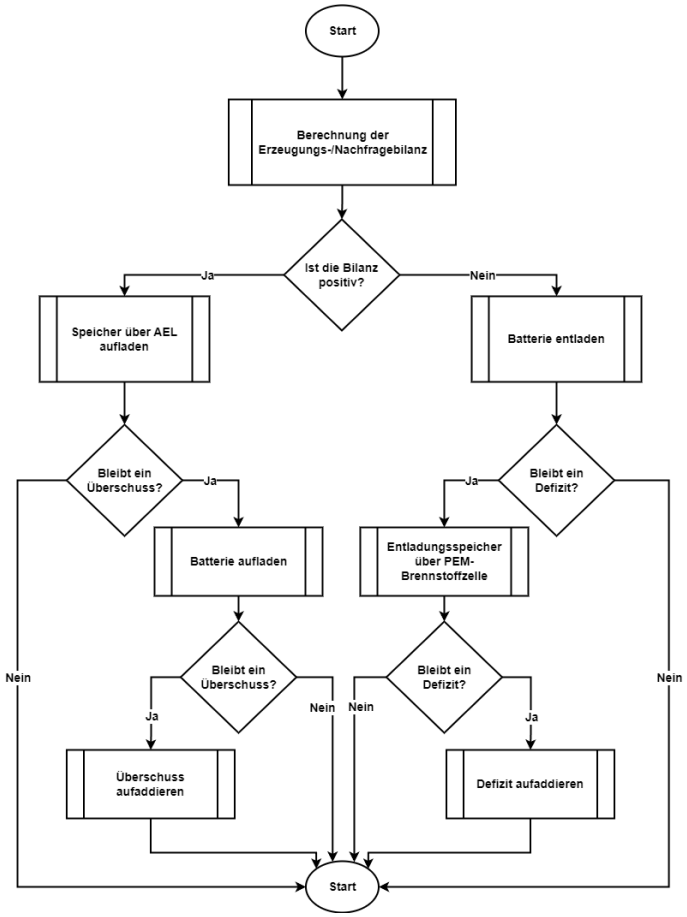


Abbildung 80: Systemsteuerungsvorgang für jeden Simulationsschritt

Die Optimierung des Systems wurde mit einer speziellen Version eines genetischen Algorithmus (GA) durchgeführt, einer Methode zur Lösung von Optimierungsproblemen, die auf einem natürlichen Selektionsprozess basiert. Ziel der Optimierung ist es, den Satz von "Genen" (Systemparameter) zu finden, der die Funktion der Stromentstehungskosten minimiert, wobei die benötigten Gene wie folgt angegeben wurden:

- Daten zur photovoltaischen (PV) Energieversorgung (aus der Datenbank),
- Daten zur Windenergieversorgung (abgeleitet anhand meteorologischer Windgeschwindigkeitsdaten),
- Batterie- und Wasserstoffspeicherkapazitäten,
- Energiekapazitäten und technische Parameter für den Elektrolyseur und die Brennstoffzelle (aus den Datenblättern entnommen).

Die Studie berichtet von einer 30-prozentigen Verringerung der Elektrolyseursauslastung als Ergebnis der genetischen Optimierung und von 37 % geringeren Energiekosten und kommt zu dem Schluss, dass die kosteneffektivste Lösung für ein Smart-Grid-Szenario die Verwendung von Kurzzeitbatteriespeichern zusammen mit kleinen, saisonalen Wasserstoffspeichern in Tanks ist [1]. Der physische Wasserstoffbedarf der Industrien in jeder Untersuchungsregion sollte bei der Optimierung ebenfalls berücksichtigt werden.

In einer ähnlichen Veröffentlichung von Carapellucci et al. [2] wurde ein Simulationswerkzeug auf Basis eines genetischen Algorithmus zur Systemoptimierung entwickelt, um die energetische und wirtschaftliche Leistung kleinerer, regionaler Stromnetze mit erneuerbaren

Energien und Wasserstoffspeichern zu bewerten. Die für die Simulation und Optimierung des Energiesystems erforderlichen Eingabedaten werden wie folgt angegeben:

- Standort der Anlagen zur Energieerzeugung,
- Lastprofile der Nutzer für Strom und Wasserstoff,
- Arten von Technologien für erneuerbare Energien,
- Verfügbare Energiespeichersysteme.

Das entwickelte Simulationstool dient als Referenz zur Entwicklung eines Smart-Grids in Nordhessen (siehe Abbildung 81).

Wie in der ersten Studie wird eine Regelungsstrategie zur Aufrechterhaltung des Energiegleichgewichts in jedem Zeitschritt verwendet, um die temporären Energieflüsse zu bestimmen, die Größe des Wasserstoffspeichers zu minimieren und die Gesamteffizienz des Systems zu maximieren. Das Ziel der Optimierung ist die Minimierung der Kosten pro Energieeinheit unter Einhaltung zahlreicher Randbedingungen. Das gewählte Optimierungsverfahren ist ein GA, der eine Kostenfunktion löst, welche die folgenden Einflussfaktoren enthält und gewichtet:

- Stromgestehungskosten
- Unerfüllter Bedarf
- Überschussenergie
- Unterschiede zwischen End- und Anfangskapazität von kurz- und langfristigen Energiespeichern

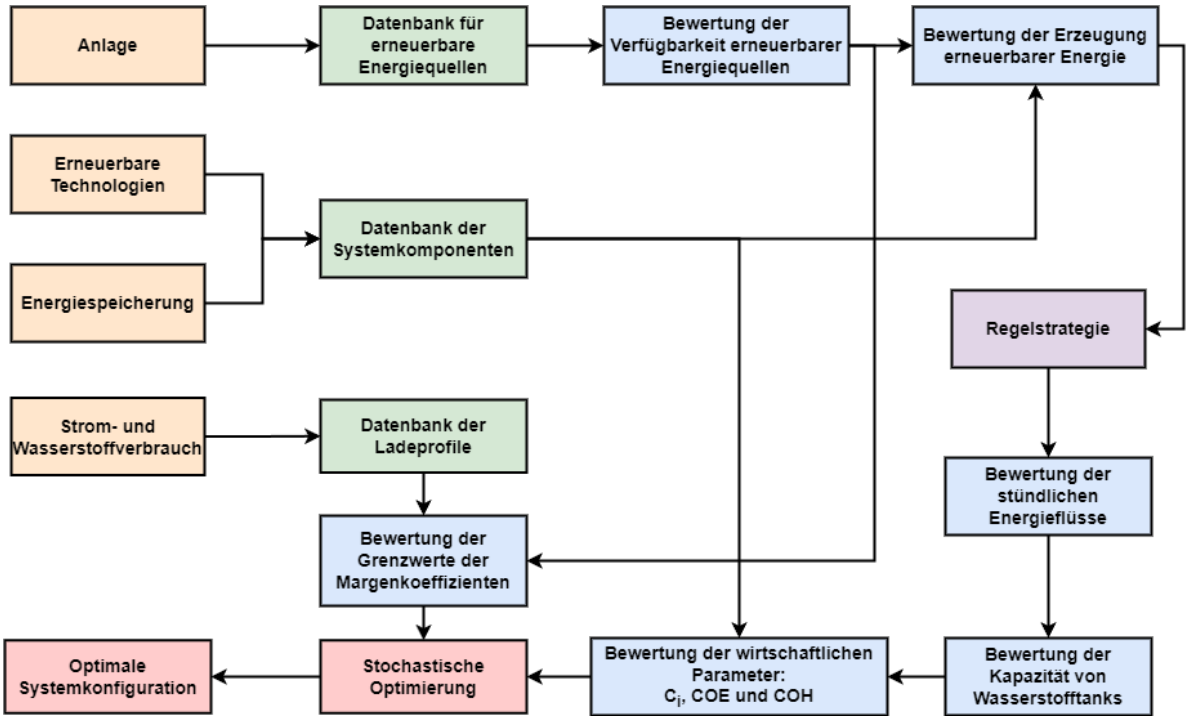


Abbildung 81: Aufbau des Simulationstools. Ci bezeichnet die i-te Systemkomponente, während COE die Kosten für Strom [€/kWh] und COH die Kosten für Wasserstoff [€/Nm3] sind [2].

Je nach Priorität des zu lösenden Problems kann die Gewichtung geändert werden - je höher das Gewicht eines Parameters, desto größer ist sein Einfluss auf die zu minimierende Kostenfunktion [2]. Eine Studie von Bartels et al. [3] diskutiert den Einfluss von Wasserstoff in zukünftigen regionalen Smart-Grids, sogenannten Microgrids, und die Auswirkungen von Wasserstoff auf Investitionen in das Stromnetz. Es wird ein mathematisches Modell eines solchen Netzes als mixed integer linear programming (MILP) entwickelt, was eine sehr nützliche Methode zur Definition von intelligenten Netzproblemen darstellt.

Die von der Studie vorgeschlagenen Mikronetze bestehen aus vernetzten Lasten, verteilten Energiequellen und Energiespeichersystemen und können als Miniaturversion des größeren Versorgungsnetzes betrachtet werden, das Energie mit dem allgemeinen Stromnetz austauschen kann und die Vorteile einer verbesserten Zuverlässigkeit, Stromqualität und reduzierten Verteilungsverluste bietet [3]. Die Arbeit berücksichtigt auch den Beitrag von batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV) und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen (FCEV) zur Energieverteilung, indem sie ihre Batterien/Wasserstoffspeicher während eines Energiemangels entlädt und während eines Energieüberschusses Elektrizität oder Wasserstoff speichert. Basierend auf diesem Konzept schlägt die Studie eine Systemübersicht vor, die als Grundlage für unsere vorgeschlagene Systemübersicht diente.

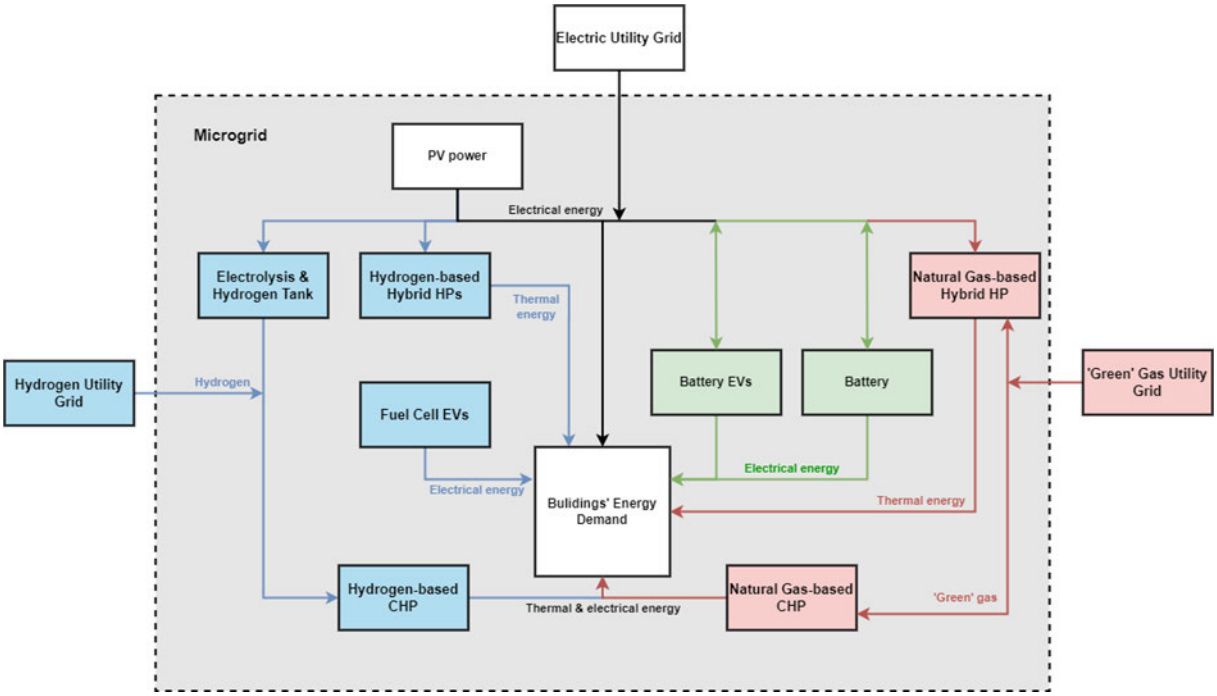


Abbildung 82: Systemskizze für ein Microgrid [3].

Die Hauptbeiträge dieser Studie sind die Konstruktion einer realistischen zukünftigen wasserstoffbasierten Smart-Grid-Infrastruktur für Haushalte (basierend auf der Erwartung einer hohen Wasserstoffdurchdringung im niederländischen Energienetz für das Jahr 2050) und die Verringerung der Spitzenstromübertragungen mit dem Hauptnetz durch die Einführung von Wasserstoff.

Demand Response (DR) ist ein wichtiger Punkt für ein Smart-Grid und bedeutet die Änderung der Nachfrage anstelle des Angebots, um das Energiegleichgewicht im Netz durch bestimmte Maßnahmen wie direkte Laststeuerung aufrechtzuerhalten. Der Einsatz von DR-Programmen durch die freiwillige Teilnahme der Netznutzer hat sich als flexibler in einem Microgrid erwiesen [3].

Wie in Abbildung 82 zu sehen ist, ist das Microgrid mit externen Hauptnetzen verbunden, um Defizite auszugleichen, die nicht durch das Microgrid gedeckt werden können, d. h. das Netz kann zu bestimmten Zeiten Strom aus dem Hauptnetz importieren, was mit Kosten verbunden ist. Dies geschieht mit Hilfe einer SPS-Steuerung auf niedriger Ebene, während auf einer höheren Ebene die Systemoptimierung mit Hilfe einer neuartigen Regelungsstrategie erfolgt, die als "Model Predictive Control" (MPC) bezeichnet wird. Dabei handelt es sich um einen Ansatz zur Minimierung einer bestimmten Zielfunktion durch die Vorhersage bestimmter Parameter und die iterative Anwendung geeigneter Gewichte auf diese Parameter für einen bestimmten Vorhersagehorizont. Damit diese Methode funktioniert, ist jedoch eine gewisse Vorhersagefähigkeit für bestimmte Parameter erforderlich. In diesem Stadium bietet uns die Studie die Möglichkeit, künstliche neuronale Netze (KNN) zu verwenden. Die Vorteile des Einsatzes von KNN für die Langzeitprognose liegen in ihrer Selbstlernfähigkeit, ihrer einfachen Implementierung, ihren kurzen Berechnungszeiten und ihrer Fähigkeit, komplexe nichtlineare Beziehungen zwischen Inputs und Outputs zu erkennen, während der Nachteil in der erheblichen Datenmenge liegt, die für ihr Training erforderlich ist.

Die Zielfunktion, die in dieser Studie optimiert werden soll, besteht aus den folgenden Leistungsindizes:

- Minimale Importkosten (d. h. Minimierung der Stromkosten für den Import von Energie aus dem Hauptnetz),
- Minimierung der Zeitspanne, in der Endverbraucher während der Teilnahme am DR-Programm Anlagen in ihrem Haus wie Waschmaschinen abschalten oder ihre Autobatterien/Brennstoffzellen zur Stromversorgung des Netzes nutzen (Vehicle-To-Grid, oder V2G), da diese Geräte in diesen Phasen vom Endverbraucher nicht genutzt werden können)
- Haltbarkeit von Batterien/Brennstoffzellen in EVs maximieren
- Minimierung des Energieaustauschs zwischen Microgrid und Hauptnetz

Unter Berücksichtigung der genannten Studien sowie zahlreicher anderer Arbeiten und Faktoren wird die folgende Systemskizze für ein intelligentes Netzkonzept mit Vor-Ort-Wasserstoffproduktion und -speicherung für bestimmte regionale Microgrids vorgeschlagen, die sowohl isoliert als auch in Verbindung mit dem Hauptstromnetz betrieben werden können. Die Systemskizze ist in Abbildung 83 dargestellt.

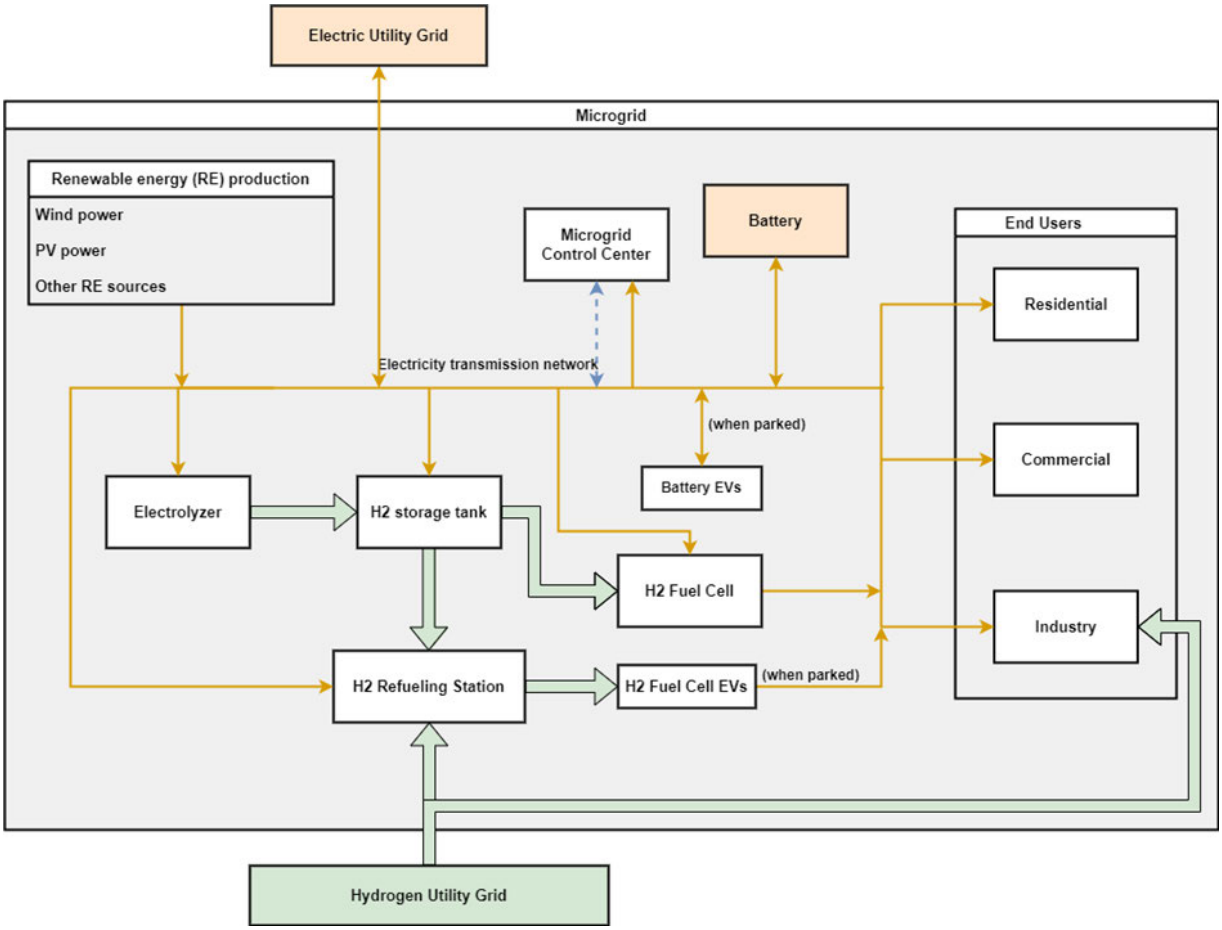


Abbildung 83: Vorgeschlagenes Konzept für ein wasserstoffbasiertes intelligentes Stromnetz. Die gelben Pfeile zeigen den Stromfluss, die grünen Pfeile den Wasserstofffluss und der gestrichelte blaue Pfeil den Informationsfluss an

Das System ist wie folgt aufgebaut:

- Die Grundidee ist, dass in Zeiten, in denen das Energieangebot die Energienachfrage übersteigt, der überschüssige Strom zur Erzeugung von Wasserstoff genutzt wird und dieser Wasserstoff in regionalen Hochdruckspeichern mit Smart-Metern, die den Wasserstoffstand messen, gespeichert wird.
- Wenn die Nachfrage im Mikronetz das Angebot übersteigt, wird der gespeicherte Wasserstoff mit Hilfe von Brennstoffzellen in Elektrizität umgewandelt, die dann zum Ausgleich der bestehenden Nachfrage über Tanklastwagen oder unter Nutzung der bestehenden Erdgastransportinfrastruktur verwendet wird, was mit zunehmender Wasserstoffdurchdringung in den Netzen ein wichtiger Faktor zur Kostensenkung sein wird.
- Der gespeicherte Wasserstoff wird auch von bestimmten Industrien in Zeiten des Bedarfs genutzt werden.
- Da die Wasserstofferzeugung durch Elektrolyse Zeit erfordert, werden zum Ausgleich sehr kurzfristiger Schwankungen Batteriespeicher verwendet, um überschüssigen Strom aus dem Netz zu speichern, der dann bei übermäßiger Nachfrage der Endverbraucher entladen wird.
- Während der Zeiten, in denen sowohl batteriebetriebene Elektrofahrzeuge (BEVs) als auch Wasserstoff-Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge (FCEVs) geparkt sind, geben sie bei Bedarf ihre Energie an das Netz ab, indem sie Informationen über den aktuellen Status von Netzangebot und -nachfrage einholen.

- Das Microgrid wird von einem regionalen Kontrollzentrum aus gesteuert, das mit allen Netzkomponenten über bidirektionale Langstreckenkommunikation verbunden ist, Informationen empfängt und Steuersignale zur Aufrechterhaltung des Energiegleichgewichts ausgibt. Das Kontrollzentrum enthält die Datenbanken für Langzeitprognosen und Vorhersagealgorithmen (wie in [2] beschrieben), Fernüberwachungs- und -steuerungsfunktionen für alle Komponenten, aus denen das Mikronetz besteht, über IoT-Geräte, Smart-Meter usw. Die Untersuchung der digitalen Infrastruktur, die für die Entwicklung eines solchen Netzkonzepts erforderlich ist, wird unter AP 6.3 im Detail dargestellt.
- Die Nebenprodukte des Elektrolyseprozesses, vor allem Wärme und Sauerstoff, werden auch für den Wärmebedarf der Endverbraucher bzw. für andere spezielle Anwendungen genutzt.

Die Dimensionierung eines solchen Microgrids, das aus allen genannten Systemkomponenten besteht, erfordert eine gründliche Analyse zahlreicher Parameter. In dem Simulationstool von [3] wird die energetische und wirtschaftliche Leistung von Microgrids aus erneuerbaren Energien bewertet, und es werden die folgenden drei Kategorien von Daten aufgeführt, die für ein solches Simulationstool erforderlich sind:

- Erneuerbare Energiequellen und Erzeugungskapazität in einer bestimmten Region,
- Technische Parameter wie Erzeugungs- und Speicherkapazität für die verwendeten Systeme (z. B. Windturbinen, Elektrolyseure, Tanks, Batteriepacks usw.
- Elektrische und Wasserstoff-Lastprofile für die Endverbraucher in der jeweiligen Region [3].

Um die Auswirkung von Schlüsselparametern auf ein solches intelligentes Netzkonzept zu demonstrieren, wurde anhand des Beispiels einer Wasserstofftankstelle ein Simulationstool zur Optimierung der Steuerung der Wasserstoffproduktion entwickelt. Die eingehenden Parameter sind die Day-Ahead-Strompreise bzw. die verfügbare Windenergie sowie der Füllstand eines lokalen Wasserstofftanks. Das Hauptziel der Simulation bestand darin, die Menge des produzierten Wasserstoffs in Zeiten eines Überschusses an erneuerbarer Energie (entspricht niedrigen Strompreisen) zu optimieren und sie in Zeiten geringer Verfügbarkeit erneuerbarer Energie (hoher Day-Ahead-Strompreis) zu minimieren, um so die Gesamtkosten zu senken und gleichzeitig sicherzustellen, dass der Tank zu jedem Zeitpunkt über genügend Kraftstoff verfügt, um die Nachfrage zu bedienen. Die angenommenen Wasserstoffbedarfsdaten für die Busse wurden von Evety zur Verfügung gestellt, deren wöchentliches Wasserstoffbedarfsprofil in Abbildung 84 zu sehen ist. Es wird davon ausgegangen, dass das Bedarfsprofil das ganze Jahr über auf einem Niveau bleibt. Für eine reale Anwendung ist es jedoch ratsam, Bedarfsdaten zu sammeln und langfristige Prognosen zu verwenden, die eine genauere Steuerung der Wasserstoffproduktion im Hinblick auf den erwarteten Bedarf ermöglichen würden.

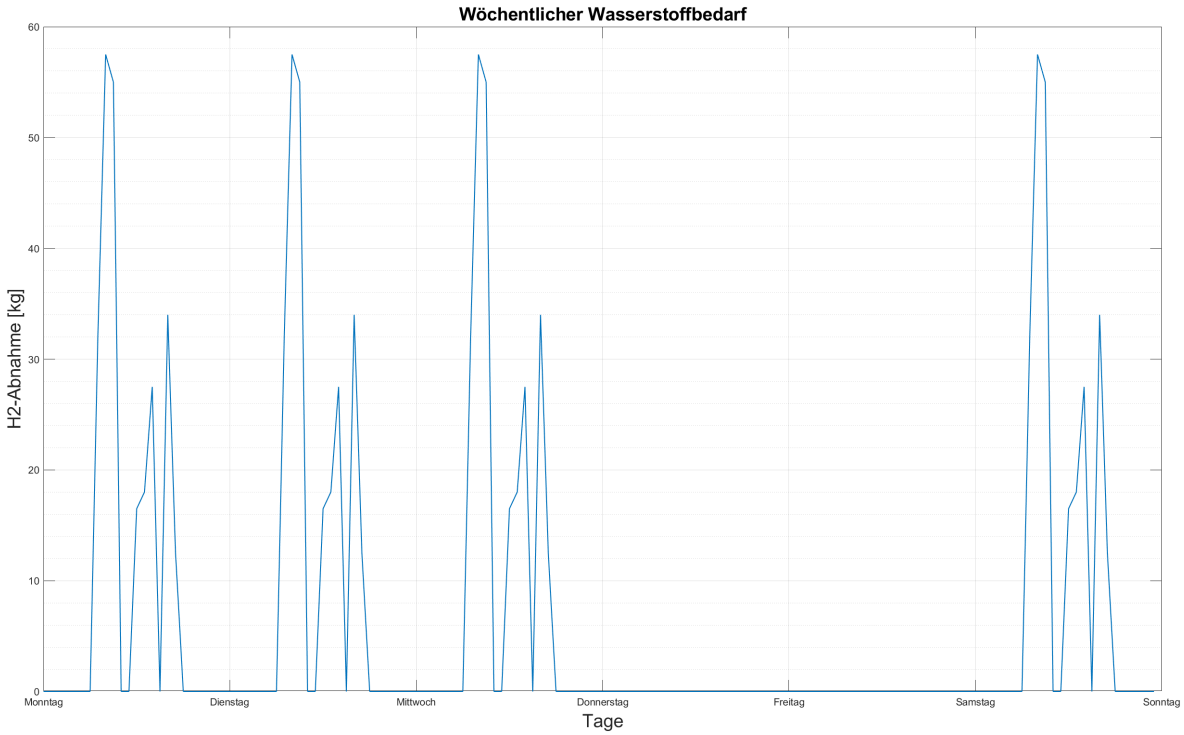


Abbildung 84: Konzeptionelle Daten zum periodischen Wasserstoffbedarf an einer Tankstelle

Für das mathematische Modell des Elektrolyseurs wurden die Erkenntnisse aus mehreren Arbeiten von Serna et al. [5-8] verwendet, und es wurde ein alkalischer Elektrolyseur mit einer Nennleistung von 300 kW und einer Nettowasserstoffproduktionsrate von etwa 650 - 1000 kg/Tag gewählt, basierend auf dem Datenblatt des Elektrolyseurs. Der Elektrolyseur kann mit unterschiedlichen Kapazitäten arbeiten, wenn er eingeschaltet ist, und diese Kapazität wird in Prozenten als "Betriebspunkt" bezeichnet.

Die Simulation wurde in MATLAB unter Verwendung eines Kontrollschemas durchgeführt, dessen Grundzüge in Abbildung 85 dargestellt sind.

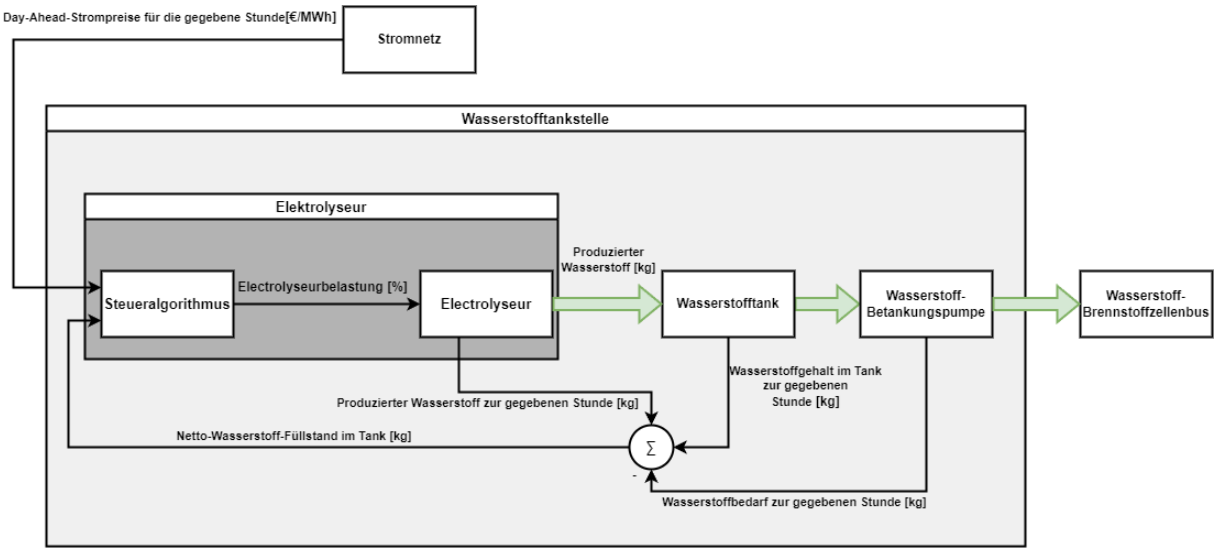


Abbildung 85: Schematische Darstellung des Simulationsablaufs

Für die Simulation wurde der Day-Ahead-Strompreis in Deutschland für das Jahr 2020 verwendet. Es wurde angenommen, dass der Preis während einer Woche konstant bleibt. Die Preisdaten wurden der SMARD-Datenplattform der Bundesnetzagentur entnommen, und das jährliche Preisdiagramm ist in Abbildung 86 zu sehen. Für den Jahresdatensatz beträgt der minimale Preis (P_{min}) 11,19 €/MWh, der maximale Preis (P_{max}) 54,90 €/MWh und der durchschnittliche Jahrespreis (P_d) wird mit 30,44 €/MWh berechnet [10].

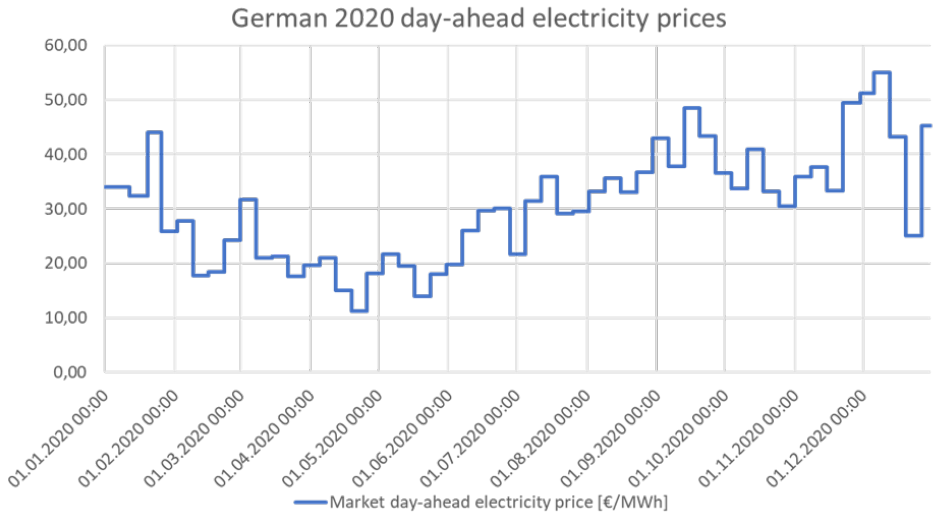


Abbildung 86: Deutsche Jahresmarktdaten für Day-Ahead-Strompreise für 2020

Für die verfügbaren Daten zu erneuerbaren Energien, die in der zweiten Simulation verwendet wurden, wurde der jährliche Datensatz zur Energieerzeugung für eine einzelne Windturbine in Yalova, Türkei, aus dem Jahr 2018 verwendet [4].

Für den Regelungsalgorithmus wurde eine auf einem Hystereseband basierende Regelungsstrategie gewählt, da sie einfach anzuwenden und anpassungsfähig ist. Im Rahmen dieser Strategie wurde eine Entscheidungsmatrix verwendet, um zwei Eingangsvariablen (Strompreis und Tankfüllstand) aufeinander und auf die Steuergröße, d. h. den Tankfüllstand, abzubilden.

Für die erste Simulation wurden als Eingangsvariablen der stündliche Day-Ahead-Strompreis und der aktuelle Wasserstoffstand im Speicher gewählt, und als Steuerungsvariable wurde der Betriebspunkt des Elektrolyseurs, d. h. seine Arbeitskapazität für die jeweilige Stunde, gewählt.

Ausgehend von den Minimal-, Durchschnitts- und Maximalpreisen in den Preisdaten wurden 3 Preiskategorien (Preis: niedrig, mittel, teuer) gebildet. Auf der Grundlage des maximalen stündlichen Bedarfs und der maximalen Speicherkapazität des Tanks wurden 4 Tankfüllstandskategorien (niedrig, mittel, hoch, sehr hoch) gebildet, und alle Kategorien wurden aufeinander abgebildet, um die entsprechenden Ausgangswerte für die Steuerungsvariable, d. h. den Betriebspunkt des Elektrolyseurs, zu erhalten, dessen Werte auf der Grundlage seiner gemeldeten Nettowasserstoffproduktionsrate bestimmt wurden. Die entsprechende Entscheidungsmatrix ist in Tabelle 41 zu sehen.

Tabelle 41: Entscheidungsmatrix für die auf Strompreis und Tanklevel basierende Simulation

Operating Point			
	Preis: niedrig	**Preis: mittel**	**Preis: teuer**
Level: niedrig	100%	100%	80%
Level: mittel	80%	20%	10%
Level: hoch	60%	10%	0%
Level: sehr hoch	0%	0%	0%

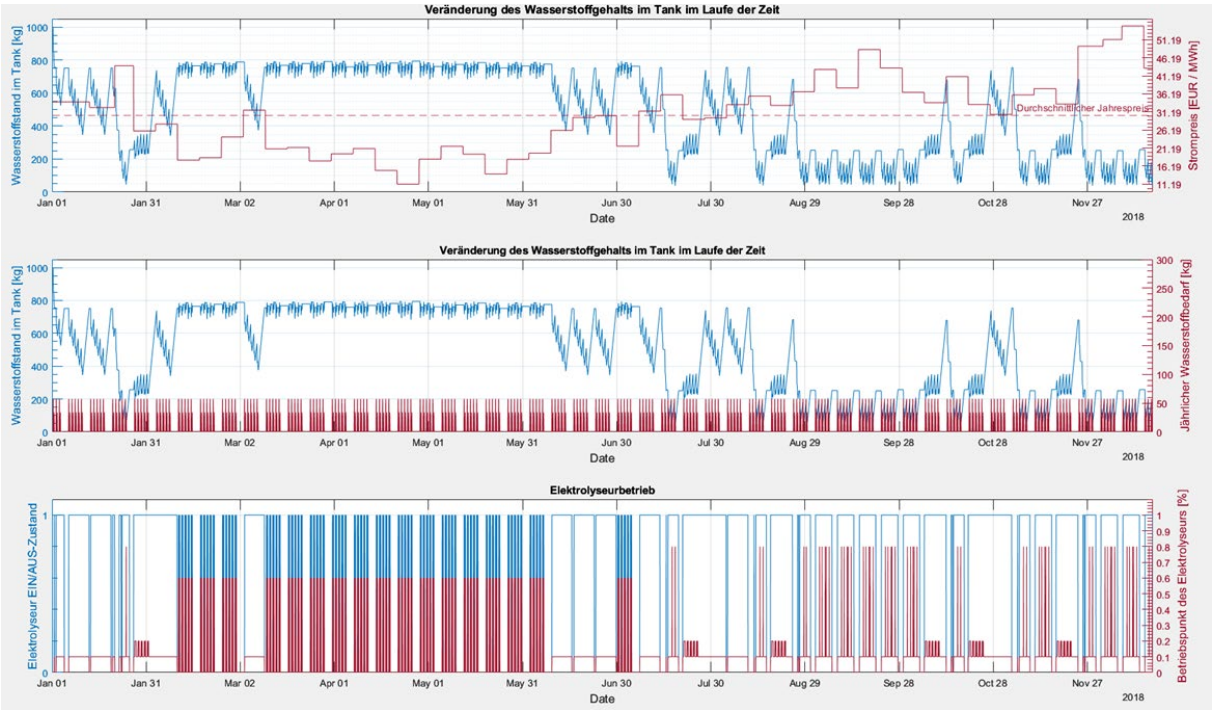


Abbildung 87: Simulationsergebnisse für die Steuerung der Wasserstoffproduktion in Abhängigkeit von den Strompreisen und Wasserstoffnachfrage

Der oberste Chart in Abbildung 87 zeigt den aktuellen Wasserstoffstand im Speichertank (blau) im Vergleich zu den Day-Ahead-Strompreisen (rot). Das mittlere Diagramm zeigt den aktuellen Wasserstoffstand im Speicher (blau) im Vergleich zum wöchentlichen Wasserstoffbedarf (rot) der 7 Busse. Das untere Diagramm zeigt den Betriebszustand des Elektrolyseurs im Laufe des Jahres, mit seinen EIN-AUS-Zuständen (blau, 1 = EIN, 0 = AUS) im Vergleich zur Betriebskapazität (rot), während der der Elektrolyseur arbeitet, d. h. EIN ist (z.B. bedeutet 0,6, dass der Elektrolyseur mit 60% Kapazität arbeitet).

Während dieser Ansatz zeigen kann, dass er die Wasserstoffspeicherung angesichts sinkender Preise optimieren kann, ist ein zu beachtender Aspekt die hohe Anzahl von EIN/AUS-Schaltungen, was zur Lebensdauerreduzierung des Elektrolyseus führt. Für eine bessere Steuerung werden fortschrittlichere Steuerungsstrategien wie MPC oder GA mit mehr Eingabedaten empfohlen.

Für die zweite Simulation wurde wieder derselbe Entscheidungsmatrix-Ansatz (Tabelle 42) verwendet, wobei als Eingangsvariablen die jährliche Energieerzeugung einer einzelnen Windturbine und der Wasserstoffstand im Tank gewählt wurden und als Steuerungsvariable wieder der Betriebspunkt des Elektrolyseurs gewählt wurde.

Auf der Grundlage der minimalen, durchschnittlichen und maximalen Energieerzeugung pro Stunde wurden 5 Energieerzeugungs-Stufen (N/A, Niedrig, Mittel, Hoch, Sehr Hoch) erstellt, wobei die N/A-Kategorie auf der Grundlage des minimalen Energiebedarfs für den Elektrolyseur bei beliebiger Kapazität bestimmt wurde. Auf der Grundlage des maximalen stündlichen Bedarfs und der maximalen Speicherkapazität des Tanks wurden wiederum 4 Tankfüllstandskategorien (niedrig, mittel, hoch, sehr hoch) gewählt.

Tabelle 42: Entscheidungsmatrix für die auf Windenergie und Tanklevel basierende Simulation

	Elektrolyseurleistung [%]				
	Energie-erzeugung N/A	**Energie-erzeugung niedrig**	**Energie-erzeugung mittel**	**Energie-erzeugung hoch**	**Energie-erzeugung Sehr hoch**
Level: niedrig	0%	40%	60%	80%	100%
Level: mittel	0%	20%	40%	60%	80%
Level: hoch	0%	0%	20%	40%	60%
Level: sehr hoch	0%	0%	0%	20%	40%

Es wurde davon ausgegangen, dass der Elektrolyseur die Last mit der höchsten Priorität für die Windturbine ist, was bedeutet, dass er die erste Last ist, die von der Turbine versorgt wird, und dass jede Energiezufuhr von der Turbine, die unter dem maximalen Energieverbrauch des Elektrolyseurs liegt, direkt in den Elektrolyseur eingespeist wird, und dass bei höheren Werten die Energiezufuhr der Turbine erst an andere Endverbraucher geliefert wird, nachdem sie zuerst in den Elektrolyseur eingespeist wurde.

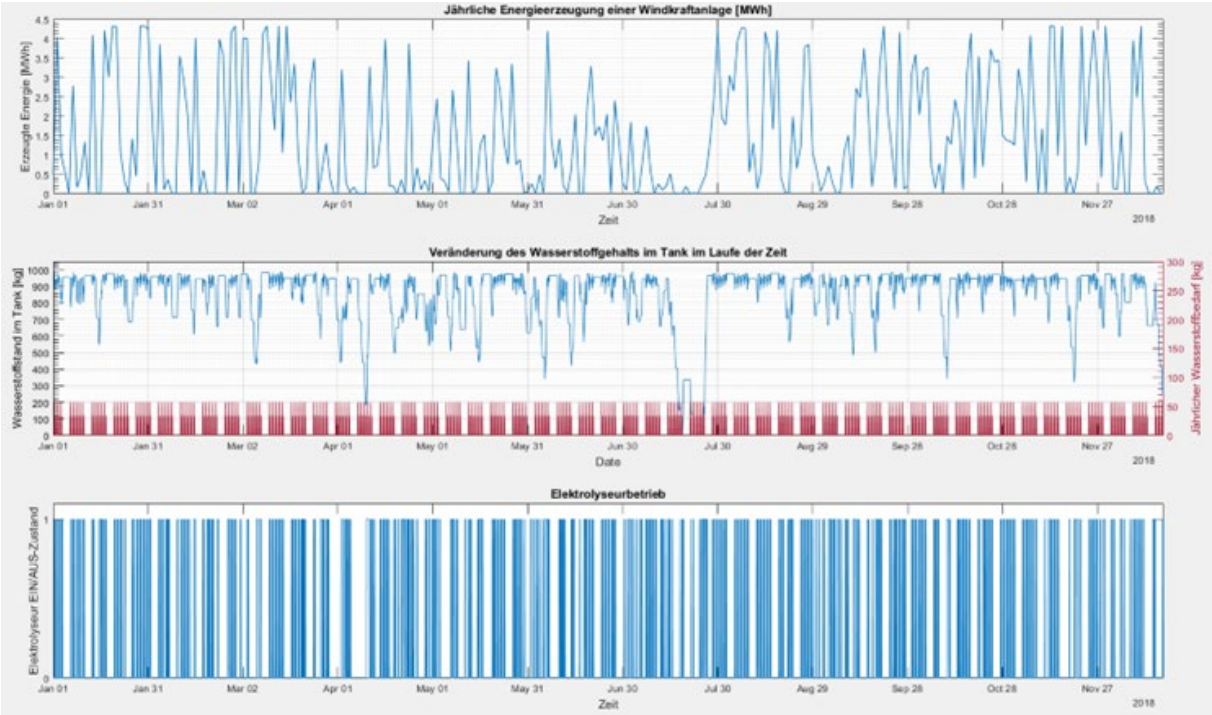


Abbildung 88: Simulationsergebnisse für die Steuerung des Wasserstoffgehalts unter Berücksichtigung der Verfügbarkeit von Windenergie

Das obere Diagramm zeigt das jährliche Windenergieproduktionsprofil einer einzelnen Windturbine in der Türkei aus dem Jahr 2018, auf dem die Simulation basierte. Das mittlere Diagramm zeigt den aktuellen Wasserstoffstand im Speichertank (blau) im Vergleich zum wöchentlichen Wasserstoffbedarf (rot) der Busse. Das untere Diagramm zeigt den Betriebszustand des Elektrolyseurs über das ganze Jahr hinweg, mit seinen EIN-AUS-Zuständen (blau, 1 = EIN, 0 = AUS).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass ein solcher Steuerungsalgorithmus zur Optimierung der erzeugten Energiemenge und zur Senkung der Gesamtproduktionskosten eingesetzt werden kann, wenn der Füllstand des Wasserstofftanks regelmäßig über intelligente Zähler und die erneuerbare Energiezufuhr pro Zeitschritt über geeignete Datenerfassungs- und -verarbeitungsarchitekturen wie SCADA gemessen werden kann.

3.9.1.2 Einsatz von 5G zur Datenerfassung von Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen (FCEVs)

Das Sammeln und Analysieren von Daten aus Wasserstoff-Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen (FCEVs) ist eine weitere vielversprechende Möglichkeit im Rahmen einer intelligenteren Energieerzeugung und -verwaltung. Auch wenn FCEVs oder batteriebetriebene Elektrofahrzeuge (BEVs) keine direkten Emissionen erzeugen, produzieren sie dennoch indirekte Emissionen, die mit dem Anteil der verfügbaren erneuerbaren Energie im Stromnetz zusammenhängen, die entweder für die Elektrolyse zur Herstellung von Wasserstoffkraftstoff oder zum direkten Aufladen von BEVs verwendet wird. Die Erfassung von Daten über die typischen Lademuster solcher Fahrzeuge kann uns daher helfen zu verstehen, wie sie die indirekten Emissionen beeinflussen und wie dieser Prozess optimiert werden kann [5].

Kolarova et al. [5] beschreiben die beiden wichtigsten Methoden zur Erfassung von Daten aus Elektrofahrzeugen. Die erste Methode besteht darin, die Fahrzeuge mit einem Datenerfassungsgerät mit bidirektionaler Kommunikationsfähigkeit zwischen einem Controller Area Network und den Mobilfunknetzen wie 5G. auszustatten, während die zweite Methode darin besteht, Fahrzeugdaten zu erfassen und mithilfe einer SIM-Karte direkt an den Fahrzeughersteller zu senden. Die gesammelten Daten können die Zeit und Dauer der Fahr- und Ladevorgänge, die Häufigkeit der Fahrten und Ladevorgänge, die Anzahl und Entfernung der Fahrten pro Tag und die Anzahl der gefahrenen Kilometer umfassen, die dann zur detaillierten Analyse der Fahrmuster des Fahrzeugs verwendet werden können.

Die Datenerfassung kann auch die Entwicklung von Simulationsmodellen ermöglichen. Ahn et al. [6] stellen ein Energieverbrauchsmodell für ein einfaches Wasserstoff-FCEV vor, das mit hoher Genauigkeit den momentanen Energieverbrauch des FCEV berechnet, wobei die momentane Fahrzeuggeschwindigkeit, die Beschleunigung und die Fahrbahnneigung als Eingangsparameter verwendet werden, die von eigenständigen GPS-Loggern oder verschiedenen mit dem Fahrzeug verbundenen Smartphone-Anwendungen stammen.

Im Hinblick auf die Sammlung, Übertragung und Analyse von Daten innerhalb eines digitalen Smart-Grid-Netzes (ausführlicher untersucht in AP 6.3) geben Lu et al. [7] einen umfassenden Überblick über die Vehicle-to-Everything (V2X)-Dienste, die Mobilfunknetze wie 5G nutzen. Fahrzeuge können Daten miteinander austauschen, wenn sie sich in der Nähe befinden.

Darüber hinaus können Fahrzeuge Informationen wie gesammelte Verkehrsdaten mit straßenseitigen Einheiten austauschen und gemeinsam nutzen, wenn sie sich in deren Funkreichweite befinden (Fahrzeug-zu-Infrastruktur, oder V2I), um den Verkehr zu überwachen, untereinander zur Kollisionsvermeidung und allgemeinen Verkehrssicherheit (Fahrzeug-zu-Fahrzeug, oder V2V) oder Positions-, Geschwindigkeits- und Richtungsinformationen mit Fußgängern zur Vermeidung von Kollisionen mit Personen (Fahrzeug-zu-Person, oder V2P). Ein allgemeinerer Datenaustausch kann mit dem allgemeinen Netz für eine langfristige und umfassendere Mustererkennung in Bezug auf Tankstellen und -zeiten, Fahrmuster usw. erfolgen. Es wird auch über bestimmte Vorteile von Ansätzen berichtet, die die Blockchain-Technologie mit 5G-Netzen nutzen [8], da diese Technologien in der Lage sind, die Herausforderung der Erfassung und Verarbeitung der massiven Datenmengen zu bewältigen, die aus den Szenarien entstehen.

Zusammenfassung

In AP 6.1 wurde eine umfassende Literaturrecherche durchgeführt, bei der zahlreiche akademische Arbeiten über die Konzeption, die Entwicklung und den optimalen Betrieb eines wasserstoffbasierten intelligenten Stromnetzes untersucht wurden. Die Hauptgedanken eines solchen Systems sind die folgenden:

- Wasserstoff kann als Langzeit-Energiespeicher genutzt werden, der in Zeiten des Energieüberflusses durch Elektrolyse hergestellt und in Hochdruckspeichern gelagert werden kann und in Zeiten des Energiemangels zur Energieerzeugung mittels Brennstoffzellen genutzt werden kann. Batterien können auch zum Ausgleich von kurzfristigen Energiebilanzdiskrepanzen eingesetzt werden.
- Der optimale Betrieb eines solchen Systems kann durch mathematische Modellierung des Systems und die Entwicklung bestimmter Optimierungsmethoden wie genetische Algorithmen, gemischt-ganzzahlige lineare Programmierung, künstliche neuronale Netze usw. erfolgen. Die Steuerung der Nachfrageseite der Energiebilanz ist auch durch bestimmte Methoden wie freiwillige Demand-Response-Programme möglich.

- Um solche Optimierungsmethoden anwenden zu können, müssen Daten über bestimmte wichtige Systemparameter wie Lastprofile der Nutzer, Arten und Erzeugungskapazitäten regionaler Anlagen für erneuerbare Energien, Wasserstoffspeicherkapazitäten usw. gesammelt und in Datenbanken gespeichert werden. Es wurden bestimmte Modelle vorgestellt, wie diese Parameter und Algorithmen miteinander interagieren.
- Auf der Grundlage der Ergebnisse wurde ein regionales intelligentes Netzkonzept, ein sogenanntes Microgrid, vorgeschlagen, das die wichtigsten Systemkomponenten wie Elektrolyseure, Brennstoffzellen, Speichertanks, E-Fahrzeuge, Erzeuger erneuerbarer Energien, Kontrollzentren usw. und ihre Wechselwirkungen miteinander umfasst.
- Um die Auswirkungen von Schlüsselparametern auf den Gesamtbetrieb des Mikronetzes zu demonstrieren, wurde ein ausgewählter Teilbereich des vorgeschlagenen Mikronetzsystems unter Verwendung bestimmter Annahmen und Daten modelliert und simuliert, um zu zeigen, wie die Wasserstoffproduktion auf der Grundlage von Parametern wie der Verfügbarkeit erneuerbarer Energien und der Day-Ahead-Strompreise gesteuert werden kann.
- Die wichtigsten Methoden zur Erfassung und Analyse von Daten aus Wasserstoff-FCEVs wurden ebenfalls untersucht.

3.9.2 Aufzeigen von Möglichkeiten von smarter Mess- und Überwachungselektronik zur Überwachung von Füllständen und möglicher kritischer Zustände und Ereignisse

Die Entwicklung von Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien in Bereichen wie der stationären Stromversorgung, der tragbaren Energieversorgung und dem Verkehrswesen hängt stark von der Wasserstoffspeicherung ab [1]. Obwohl Wasserstoff von allen Brennstoffen die höchste Energiedichte pro Masse aufweist, hat er aufgrund seiner geringen Dichte bei Umgebungstemperatur die niedrigste Energiedichte pro Volumeneinheit, was die Entwicklung fortschrittlicher Speichertechnologien mit der Möglichkeit einer höheren Energiedichte erforderlich macht.

Zwei etablierte Wasserstoffspeichertechnologien sind die Speicherung von Wasserstoff in flüssiger und gasförmiger Form [2]. Die kryogene Speicherung von Wasserstoff in flüssiger Form erfordert eine Abkühlung des Wasserstoffs auf -253 °C und isolierte Lagertanks, um diese niedrige Temperatur aufrechtzuerhalten und die Verdampfung zu minimieren. Diese komplexe und kostspielige Speichertechnologie hat die Verwendung von flüssigem Wasserstoff eingeschränkt. Üblicherweise wird Wasserstoff komprimiert und in gasförmiger Form unter hohem Druck gelagert, was Lagertanks erfordert, die einem Druck von 350-700 bar standhalten. Bei der Komprimierung von Wasserstoff von 1 auf 350 oder 700 bar werden heute etwa 9 bis 12 % der in Form von Wasserstoffgas bereitgestellten Endenergie verbraucht. Der Energiebedarf für die Verflüssigung (Kühlung) liegt dagegen mit etwa 30 % deutlich höher.

Vor der Markteinführung war es in der Industrie üblich, Wasserstoff in Masseneinheiten, insbesondere in Kilogramm (kg), anzugeben [3]. Da Wasserstoff in komprimierter, gasförmiger Form geliefert wird, wäre eine Volumenmessung aufgrund der Abhängigkeit von Druck und Temperatur des Gases nicht geeignet. Um die Genauigkeit der gelieferten Wasserstoffmenge zu gewährleisten, wurden Masseeinheiten bevorzugt.

Wenn ein Wasserstofftank mit 700 bar gefüllt wird, befindet sich nicht doppelt so viel Wasserstoff im Tank wie bei 350 bar, sondern nur etwa 67 % mehr. Dies liegt daran, dass sich Wasserstoff bei hohen Drücken nicht wie ein ideales Gas verhält und die Beziehung zwischen

Dichte und Druck ρ/p nicht linear verläuft. Wasserstoff verhält sich bei einem Druck unter 10 bar nahezu ideal. Bei einer Temperatur von 15 °C und einem Druck von 350 bar beträgt die Dichte von Wasserstoff ca. 24 kg/m³. Erhöht man den Druck auf 700 bar, so steigt die Dichte auf ca. 40 kg/m³. Bei einer Verdoppelung des Drucks (von 350 auf 700 bar) fasst ein Wasserstofftank also etwa 67 % mehr Wasserstoff. Oder anders ausgedrückt: Bei 350 bar fasst der Tank etwa 60 % so viel Wasserstoff wie bei 700 bar. Ein ideales Gas hingegen würde bei einem Druck von 700 bar eine theoretische Dichte von ca. 57 kg/m³ erreichen.

Die Masse des gasförmigen Wasserstoffs kann berechnet werden, wenn der Druck und die Temperatur des Gases sowie das Volumen des Speichertanks bekannt sind. Druck und Temperatur bestimmen die Dichte des Gases, und die Masse des Gases kann durch Multiplikation seines Volumens mit seiner Dichte ermittelt werden. Die Masse des flüssigen Wasserstoffs kann anhand des Flüssigkeitsstands, des Drucks, der Temperatur und des Volumens des Tanks bestimmt werden. Die Masse des flüssigen Wasserstoffs kann anhand des Flüssigkeitsstands, des Drucks, der Temperatur und des Volumens des Tanks bestimmt werden. Der Begriff "smart" wurde ursprünglich als Abkürzung für Self-Monitoring Analysis and Reporting Technology [4] verwendet. Intelligente" Technologien beziehen sich im Wesentlichen auf verschiedene Geräte, Systeme und Anwendungen, die künstliche Intelligenz, Internetverbindungen und andere fortschrittliche Technologien nutzen, um verschiedene Aufgaben zu verbessern und zu automatisieren. Die Integration intelligenter Technologien in die Wasserstoffindustrie könnte die Attraktivität der Wasserstoffindustrie erhöhen und ihr eine breite Nutzung ermöglichen.

Die Einführung digitaler Hilfsmittel, mit denen sich die Lagerbestände von Wasserstofftanks leicht aus der Ferne überwachen lassen, kann die Wasserstofftechnologie voranbringen. Drahtgebundene Sensoren sowie drahtlose, batteriebetriebene Druck- und Temperatursensoren können verwendet werden, um den Füllstand des Tanks in Echtzeit zu messen, und die IoT-Technologie (Internet der Dinge), um den Füllstand des Tanks über ein Online-Portal aus der Ferne einzusehen und zu verwalten [5]. Drahtlose Sensoren machen eine Verkabelung vor Ort überflüssig und ermöglichen einen einfachen Austausch sowie eine Nachrüstung bestehender Systeme. Die Geräte werden über eine austauschbare Batterie mit einer Lebensdauer von fünf bis acht Jahren betrieben. Diese Lösung kann auch so programmiert werden, dass sie die Versorger alarmiert, wenn der Füllstand der Tanks unter oder über einem bestimmten Schwellenwert liegt, was zur frühzeitigen Erkennung von Tanks beiträgt, die befüllt werden müssen. Die Wasserstofflieferanten sind außerdem in der Lage, die Tankfüllstände im Laufe der Zeit zu überwachen und den Bedarf entsprechend vorherzusagen, so dass eine zuverlässige Produktverfügbarkeit gewährleistet ist. Was die Verwendung von Wasserstoff als Kraftstoff im Verkehrswesen betrifft, so könnte den potenziellen Käufern von Wasserstoffkraftstoff (Besitzern von wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen) ein Online-Portal mit Informationen zur Verfügung gestellt werden, die es ihnen ermöglichen, sich über die Standorte von Tankstellen zu informieren, die über genügend Wasserstoff für ihren Bedarf verfügen, so dass unnötige Fahrten zu leeren Tankstellen vermieden werden. Zu den verfügbaren Technologien zur Überwachung der Füllstände von gasförmigen Produkten in Tanks gehören der Smart Tank Service von TotalEnergies, der Enbase Tank Level Sensor (TLS) von Detechtion sowie SatSCADA von Bentek Systems [6, 7]. Die Wasserstofftechnologie hat das Potenzial, den Transportsektor zu revolutionieren, da sie emissionsfrei ist. Bei der Betankung von Brennstoffzellenfahrzeugen müssen Druck und Temperatur des Wasserstoffgases genau überwacht werden. Das Überfüllen eines Drucktanks bei niedrigen Temperaturen führt zu unzulässig hohen Tankdrücken mit möglicherweise fatalen Folgen durch die anschließende Erwärmung auf Umgebungstemperatur. Wasserstoff wird als Druckgas abgegeben, und die Zahlen (H70, H35) beziehen sich auf den Druck in MPa, bei dem der Wasserstoff abgegeben wird. Die heutigen

Brennstoffzellen-Elektroautos verfügen meist über H70-Betankungssysteme und können mit beiden Zapfpistolen, H70 oder H35, betankt werden, wobei der Unterschied darin besteht, dass H35 aufgrund des niedrigeren Drucks zu einer Teilbefüllung führt. Fahrzeuge, die mit H35-Kraftstoffsystemen gebaut wurden (meist ältere Fahrzeuge), können nur die H35-Zapfpistole verwenden und sind nicht mit H70-Zapfpistolen kompatibel. SAE TIR J2601 legt branchenweite Betankungsprotokolle für die Betankung von gasförmigem Wasserstoff in Straßenfahrzeugen mit einem Nennbetriebsdruck von 35MPa (350 bar) und 70MPa (700 bar) fest [8]. Die Tankstellen sollten Betankungsalgorithmen und -geräte einsetzen, um den Betankungsvorgang innerhalb dieser Richtlinien durchzuführen. Die Norm legt unter anderem die maximale Kraftstofftemperatur an der Zapfpistole, den maximalen Kraftstoffdurchsatz und die maximale Druckanstiegsrate für gasförmige Wasserstoffkraftstoffzapfsäulen fest.

SAE TIR J2601 legt Betankungsrichtlinien für die "Nicht-Kommunikationsbetankung" bei fehlender Fahrzeugkommunikation und Richtlinien für die "Kommunikationsbetankung" fest, wenn bestimmte Informationen vom Fahrzeug übertragen und an der Zapfsäule überprüft werden [8]. Die Betankung ohne Kommunikation wird in der nachstehenden **Abbildung** 89 dargestellt. Die Zapfsäule misst den anfänglichen Tankdruck, das Tankvolumen, die Umgebungstemperatur und die Temperatur der Kraftstoffabgabe, um die Füllmenge und den Enddruck durch unidirektionale Kommunikation zu berechnen. Dieses Verfahren beinhaltet große Sicherheitsmargen und ist daher für Personenkraftwagen kaum ausreichend.

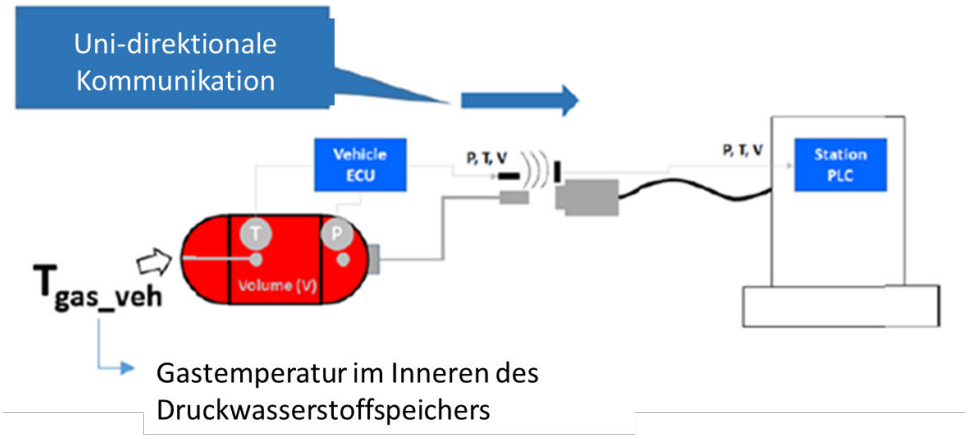


Abbildung 89: Betankung ohne Kommunikation [9]

Die SAE TIR J2799 enthält Einzelheiten zum Datenübertragungsprotokoll unter Verwendung der Infrarot-Datenverbindung (IrDA), wie in **Abbildung** 90 unten dargestellt. Das gesamte Wasserstoffbetankungssystem besteht aus einer Zapfsäule, einem Wasserstoff-Oberflächenfahrzeug (HSV) und einer Wasserstoffbetankungskupplung. Die Zapfpistole und der Behälter koppeln das Wasserstoffbetankungssystem (Zapfsäule) und das HSV mechanisch und ermöglichen den Durchfluss von Wasserstoffgas zwischen ihnen. Die Schnittstelle zwischen beiden wird als Betankungsschnittstelle bezeichnet. Die Daten werden vom IR-Sender am HSV an den IR-Empfänger (Infrarot) an der Zapfsäule übertragen. Die Fahrzeug- bzw. Tankinformationen werden zur Verbesserung der Betankung sowie zur Ermöglichung einer konstanten 95-100%igen Ladezustandsbetankung (SOC) herangezogen. Der Tankfüllungszustand wird als SOC bezeichnet und ist definiert als das Verhältnis der Wasserstoffdichte im Fahrzeugspeicher zur Vollfüllungsdichte, d. h. der Dichte bei Nennbetriebsdruck des Tanks und bei 15 °C [10]. Es gibt auch ein optionales "Fahrzeugabbruchsignal", um die Betankung zu beenden.

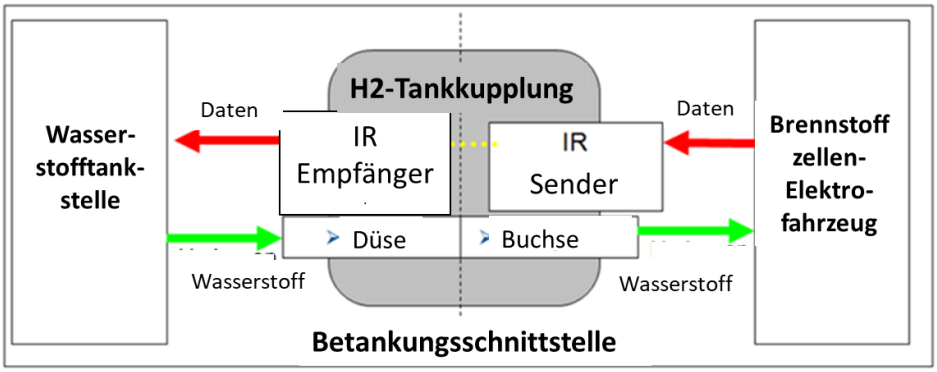


Abbildung 90: Übersicht über SAE J2799 [9]

Die derzeit verfügbaren Normen und Technologien haben einige Nachteile. J2601 weisen große Sicherheitsabstände auf und haben daher niedrige Tankfüllstände [9]. Die "nicht kommunikationsbasierte" Betankung erfordert außerdem eine übermäßige Vorkühlung, was zu einer schlechten Energieeffizienz führt. Die Norm J2799 hingegen kann unzuverlässig und fehleranfällig sein, insbesondere bei Sonnenlicht oder Nebel. Außerdem ist er leicht zu beschädigen und seine Wartung ist kostspielig. Daher besteht ein Bedarf an einer zuverlässigen bidirektionalen drahtlosen Kommunikation zwischen Fahrzeug und Zapfsäule, wie in **Abbildung** 91 unten dargestellt. Anstelle der Infrarottechnologie können auch WiFi- oder 5G-Verbindungen verwendet werden.

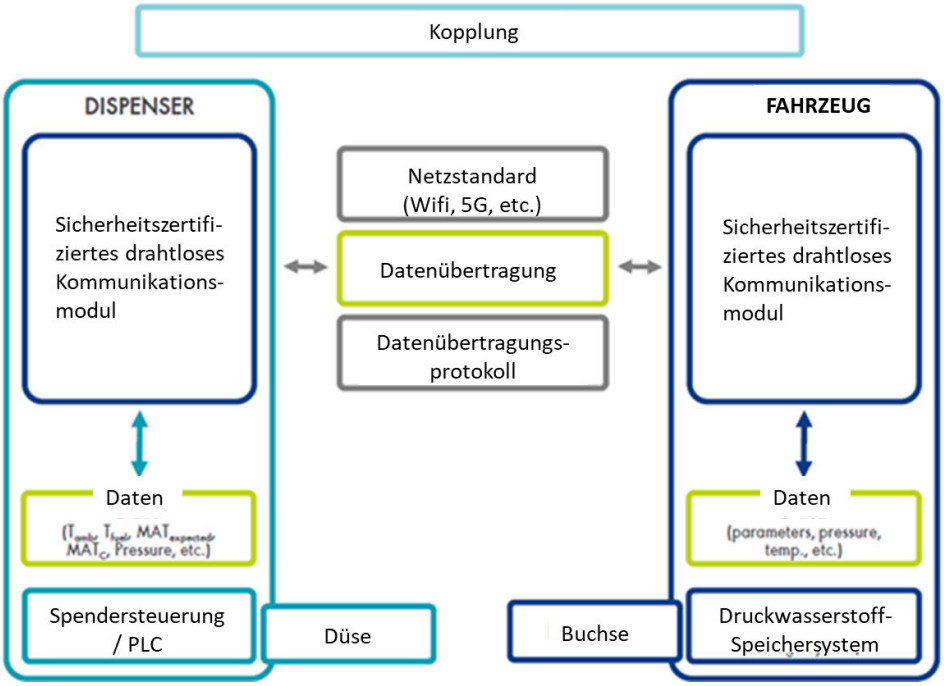


Abbildung 91: Bi-direktionale Kommunikation [9]

Die Vorteile einer zuverlässigen Verbindung sind:

- Betankungsdaten können ausgetauscht werden
- Dem Kunden können zusätzliche Dienstleistungen, wie z.B. Treueprogramme, angeboten werden
- Eine vollautomatische Bezahlung kann durchgeführt werden

- Protokollierung von Betankungsdaten / Betrieb, Fahrzeug-/Tankeigenschaften für zukünftige Analysen / Optimierungen / Sicherheitsverbesserungen möglich

Die Risiken und Sicherheitsmerkmale von Wasserstofftankstellen sind in Tabelle 43 beschrieben.

Tabelle 43: Risiken und Sicherheitsmerkmale von Wasserstofftankstellen [11]

Komponente	Risiko	Messmethode
Kompressor-einheit	Möglichkeit, dass Luft (Sauerstoff) am Einlass angesaugt wird, was zu Verbrennungen oder Explosionen im Inneren und damit zu Materialschäden führen kann	Wasserstoffkompressoren sind speziell so konstruiert, dass sie das Ansaugen von Luft verhindern (in Kombination mit Temperatur- und Drucksensoren)
	Wasserstoffleck	Spezielle Hochdruckdichtungen (aus Metall) werden verwendet
	Hochdruck-Wasserstoffleck in einem geschlossenen Raum → die Strömung und die geringe Dichte des Wasserstoffs werden die Ausbreitung erheblich beeinträchtigen (es kann sich eine Wolke aus brennbarem Gas bilden)	Gaserkennungssysteme in Verbindung mit automatischer Belüftung, die die Aufgabe haben, die Ansammlung von Wasserstoff zu verhindern.
Rohrleitungssystem	Wasserstoffaustritt in die Atmosphäre aus Sicherheitsventilen	Alle Betriebs- und Sicherheitsventile werden in der Regel in die Rohrleitung (Abgaskamin) geführt, die in der Regel mit der Möglichkeit einer möglichen kontrollierten Verbrennung des Gemischs ausgelegt und konstruiert oder zur Vermeidung einer Verbrennung inertisiert ist.
Wasserstoff-tank und Zapfsäule	Wasserstoffleck	Verwendung zertifizierter Komponenten, regelmäßige Inspektionen und Revisionen aller Teile der Station; System zur Erkennung eines plötzlichen Druckabfalls aufgrund einer Leckage in Verbindung mit einer automatischen Abschaltung der Wasserstoffquelle; Konstruktion und Bau der Zapfsäule
	Der Druck im Tank übersteigt das zulässige Niveau (Überfüllung, Brand usw.)	Die Druckentlastungsvorrichtung des Tanks wird aktiviert, um das Wasserstoffgas im Tank auf sichere Weise abzulassen

Zusammenfassung

- Wasserstoff wird üblicherweise als komprimiertes Gas gespeichert.
- Druck- und Temperatursensoren sowie IoT-Technologie können den Füllstand des Tanks in Echtzeit messen, ihn über ein Online-Portal verwalten und den Bedarf abschätzen.
- Die Betankungsvorgänge müssen innerhalb vorgegebener Richtlinien erfolgen, da Druck und Temperatur des Wasserstoffgases genau überwacht werden müssen.
- SAE TIR J2601 legt Betankungsrichtlinien für die "Nicht-Kommunikationsbetankung" und "Kommunikationsbetankung" fest, während die SAE TIR J2799 das Datenübertragungsprotokoll unter Verwendung der Infrarot-Datenverbindung (IrDA) enthält.
- Die Norm J2799 weist einige Nachteile auf, daher besteht Bedarf an einer zuverlässigen bidirektionalen drahtlosen Kommunikation zwischen dem Fahrzeug und der Zapfsäule mit WiFi- oder 5G-Verbindungen.
- Das größte Risiko der Wasserstofftechnologie ist das Wasserstoffleck, das durch Hochdruckdichtungen, Gaserkennungssysteme in Verbindung mit automatischer Belüftung, Betriebs- und Sicherheitsventilen, die Verwendung zertifizierter Bauteile sowie regelmäßige Inspektionen minimiert werden kann.

3.9.3 Ermittlung der erforderlichen Infrastruktur

Für den Übergang von einem herkömmlichen Stromnetz zu einem auf erneuerbaren Energien und Wasserstoff basierenden intelligenten Stromnetz ist die Untersuchung der für diesen Übergang erforderlichen digitalen Infrastruktur von entscheidender Bedeutung, da ein intelligentes Stromnetz nur dann effizient sein kann, wenn es eine bidirektionale Datenübertragung und eine umfassende Datenverarbeitung auf zuverlässige, schnelle, sichere und möglichst kostengünstige Weise ermöglicht. Daher ist die Bewertung bestimmter Kommunikationstechnologien wie 5G, die diese Anforderungen erfüllen und Lösungen bieten, von wesentlicher Bedeutung.

Zu diesem Zweck wurden mehrere wissenschaftliche Arbeiten und Industrieberichte untersucht, die wichtigsten und relevantesten Erkenntnisse wurden zu einer kohärenten und umfassenden Zusammenfassung zusammengefasst, und in diesem Dokument wird ein Vorschlag für einen hochrangigen konzeptionellen Rahmen für eine künftige wasserstoffbasierte Smart-Grid-Architektur sowohl im Bereich der physikalischen Größen als auch im Bereich der Daten/Informationen vorgelegt.

3.9.3.1 Stromnetze von heute vs. intelligente Netze der Zukunft

Als Ausgangspunkt ist es wichtig zu verstehen, wie das herkömmliche Stromnetz heute aufgebaut ist und wie sich die Struktur des künftigen intelligenten Stromnetzes davon unterscheiden wird. Eine gute Zusammenfassung dazu findet sich im 5G IndustryLab-Bericht von Ericsson aus dem Jahr 2020 [1].

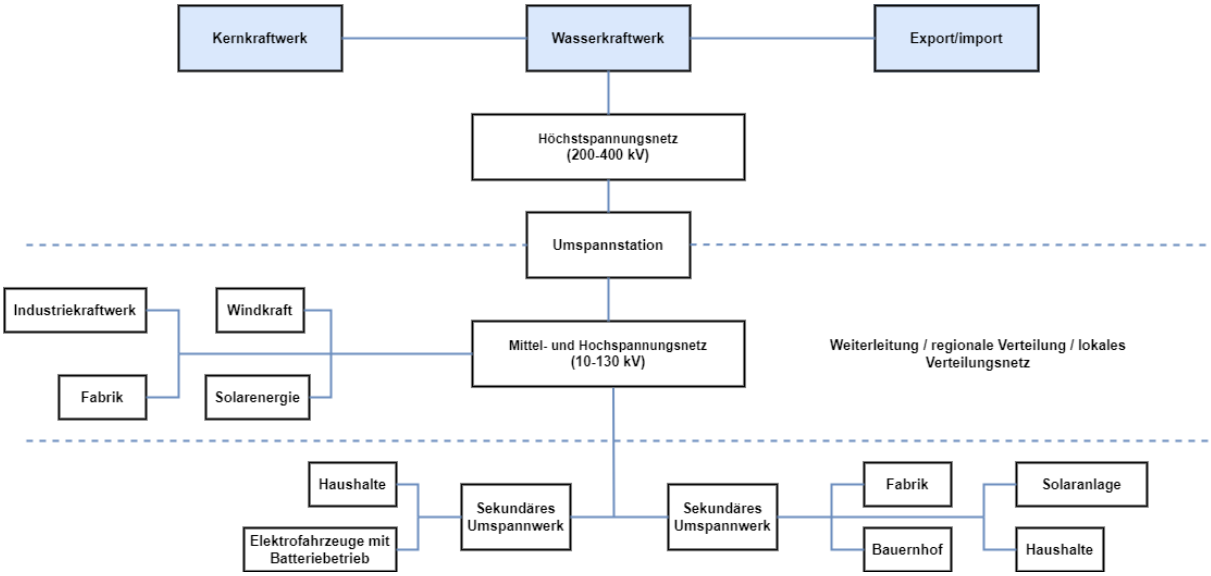


Abbildung 92: Typische Struktur eines heutigen Stromnetzes [1]

Wie in Abbildung 92 zu sehen ist, haben die herkömmlichen Stromnetze heute eine hierarchisch vertikale Struktur:

- Stromerzeugung auf der obersten Ebene, Verbrauch durch die Endverbraucher auf der untersten Ebene.
- Die Stromerzeugung findet meist in einer begrenzten Anzahl von Großanlagen statt,
- Sehr hohe Spannung (200-400 kV) auf der obersten Ebene, die Spannung nimmt nach unten hin ab (in Umspannwerken).
- Schutzmechanismen in Mittel- und Niederspannungsnetzen sind nicht kommunikativ (z. B. Überstromrelais, Distanzrelais usw.).
- Datenkommunikation findet auf der höchsten Spannungsebene statt, intelligente Stromzähler werden auf der Endverbraucherebene eingesetzt.
- Die meisten Stationen/Umspannwerke am Rande des Verteilernetzes sind "blind" (keine Kommunikationsmöglichkeiten), so dass für die Wartung Personal im Standby-Modus benötigt wird, was die Kosten erhöht.
- Das Stromnetz gehört den Übertragungsnetzbetreibern (ÜNB) und den Verteilernetzbetreibern (VNB), die für den Transport und die Verteilung des Stroms an die Endverbraucher verantwortlich sind.
- Verteilernetzbetreiber verwenden heute eine Mischung aus Kommunikationstechnologien wie Hochfrequenz und Ultrahochfrequenz- Funk (VHF- und UHF), Wi-Fi, Glasfasern, 3G, 4G usw.

Mit der zunehmenden Integration erneuerbarer Energien sowie der Koppelung an Wasserstoff-Infrastruktur müssen die Stromnetze der Zukunft dezentraler und stärker digital vernetzt sein, damit sie die Anforderungen erfüllen können:

- Große Anzahl kleinerer, lokaler Stromerzeuger (Windparks, Solarparks usw.),
- Bidirektionale Energieverteilung (einige Verbraucher werden auch Strom anbieten über Solaranlagen in Haushalten, Batterien von Elektroautos usw.) und Datenverkehr,
- Größere Schwankungen bei der Stromerzeugung (da erneuerbare Energien weniger vorhersehbar sind),

- Größere Anzahl von Netzproblemen,
- Erhebliche Zunahme der erzeugten Daten.

In dem Bericht wird ein grundlegender Bezugsrahmen dafür vorgestellt, wie die Entwicklung eines intelligenten Verteilungsnetzes aus einem herkömmlichen Netz aussehen könnte, bestehend aus drei Schritten:

1. Messung durch Konnektivität (Sammeln und Übertragen von Messungen und Informationen über Ausfälle im Stromnetz)
2. Implementierung von Kommunikationsmechanismen (DSOs können Netzkomponenten fernsteuern)
3. Vollständige Automatisierung (vollständig autonomes Stromnetz mit Machine-to-Machine (M2M) Kommunikation)

Der Bericht beleuchtet auch den Aspekt des Netzschutzes, insbesondere den Leitungsdifferenzialschutz für die Übertragungsnetze, und gibt einen Überblick über die neue Kommunikationstopologie, die für ein intelligenteres Netzschutzsystem erforderlich ist (siehe **Abbildung** 93). Nach Schätzungen der schwedischen Netzbetreiber hat die Einführung neuer Informations- und Kommunikationstechnologien das Potenzial, die Dauer von Stromunterbrechungen um 50-75 Prozent zu reduzieren.

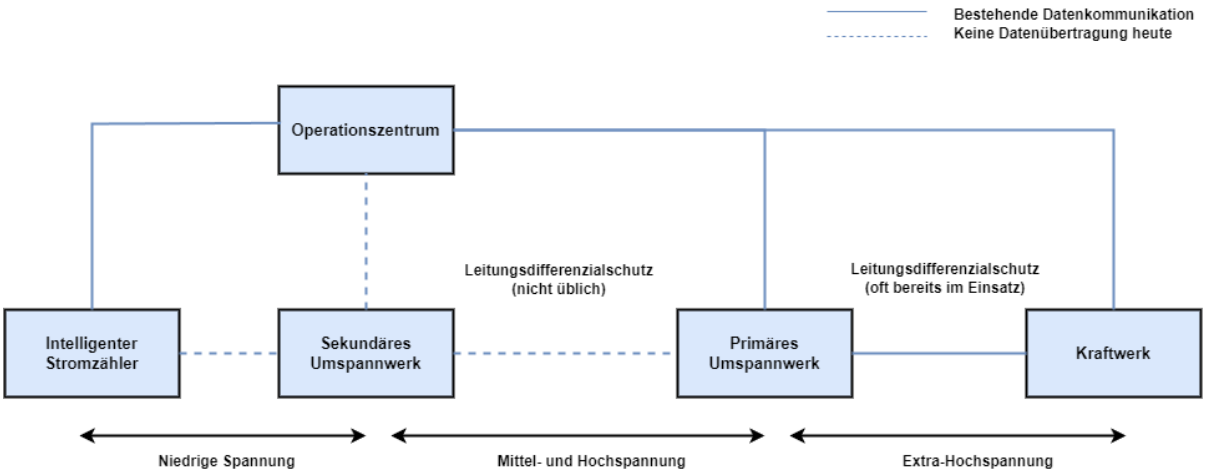


Abbildung 93: Für das intelligente Stromnetz werden neue Kommunikationsmittel benötigt, insbesondere für den Netzschutz. [1]

3.9.3.2 Allgemeiner Überblick über die 5G-Technologie

Da die Integration von 5G in die Smart-Grid-Umgebung untersucht wird, wäre es ein guter Anfang, die grundlegende Architektur von 5G zu verstehen, zusammen mit den wichtigsten Verbesserungen, die es für ein intelligentes Stromnetz bringen soll, und den wichtigsten Herausforderungen, die mit seiner Nutzung verbunden sind.

Normalerweise wird die Architektur eines Mobilfunknetzes in 2 Typen unterteilt:

- Radio Access Network (RAN): Besteht aus Endgeräten (z. B. mobile Geräte, IoT-Geräte, vernetzte Autos usw.) und den Basisstationen. Es ist für die Aspekte Authentifizierung,

Verfügbarkeit, Vertraulichkeit und Integrität der drahtlosen 5G-Infrastruktur verantwortlich. Im Kontext eines intelligenten Netzes ermöglicht das RAN eine sichere Verbindung zu den IoT-Geräten, indem es ein Authentifizierungsprotokoll namens eSIM (enhanced Subscriber Identification Module) [3] verwendet.

- Kernnetz (CN): Ein Kernnetz ist das Herzstück eines Telekommunikationsnetzes, das den Kunden, die über das Zugangsnetz miteinander verbunden sind, zahlreiche Dienste anbietet [2]. Das CN von 5G unterscheidet sich stark von seinen Vorgängern wie 4G durch den Einsatz mehrerer fortschrittlicher IKT-Technologien und die Einführung einer neuen dienstbasierten Architektur (SBA) sowie den Einsatz von Edge-Cloud-Computing-Technologien, bei denen die Basisstationen direkt mit zahlreichen kleineren, lokalen Edge-Clouds verbunden sind, anstatt alle generierten Daten in einer zentralen Cloud zu speichern, wodurch die Ausfallsicherheit des Netzes erhöht wird. Die Verwendung der SBA-Architektur zusammen mit Edge-Computing ermöglicht Multi-Access Edge-Computing (MEC) [3].

Es gibt 2 Arten von 5G-Netzen:

- Non-Standalone Network (NSA): Das 5G-Netz nutzt die bestehende Kernnetzinfrastruktur und -funktionalität mit 5G-Basisstationen.
- Standalone-Netz (SA): 5G-Netz nutzt 5G-Basisstationen mit der SBA-basierten Kernnetzarchitektur. Im Kontext eines intelligenten Stromnetzes ergänzt der SA-Modus die Selbstheilungs- und Automatisierungsanforderungen von intelligenten Stromnetzen [3].

Der Industriebericht "5G Empowers the Future of Electricity" von Deloitte China gibt einen umfassenden Ausblick auf die Anwendungsszenarien von 5G als Kommunikationsinfrastruktur einer Smart-Grid-Umgebung sowie auf die wichtigsten Herausforderungen und Schlüsselmaßnahmen im Zusammenhang mit 5G.

Die wichtigsten von 5G ermöglichten Fähigkeiten und ihre jeweiligen vorteilhaften Eigenschaften sind dreifach [4]:

- Enhanced Mobile Bandwidth (eMBB), was eine extrem hohe Bandbreite ermöglicht,
- Ultra-Reliable Low Latency Communication (uRLLC), die eine extrem niedrige Latenzzeit ermöglicht,
- Massive Machine Type Communication (mMTC), die Konnektivität im großen Maßstab ermöglicht.

Einige der Hauptvorteile, die diese Eigenschaften bieten, sind die hohe Kapazität der IoT-Geräte (bis zu 1 Million Geräte pro Quadratkilometer) [2], der geringere Energieverbrauch durch optimierte Kommunikationsprinzipien und die enorme Datenübertragungskapazität (bis zu 20 Gbit/s). Die verschiedenen Teilsysteme und Komponenten innerhalb eines intelligenten Stromnetzes dienen jedoch unterschiedlichen Zwecken und verwenden unterschiedliche Geräte. Daher sind auch die Anforderungen an Bandbreite, Latenz, Konnektivität, Zuverlässigkeit und Sicherheit unterschiedlich und müssen für jedes Teilsystem/jede Komponente einzeln bewertet werden.

Der Bericht gibt einen Überblick über vier 5G-Anwendungsprogramme Kontrolldienste, Erhebungsdienste, mobile App-Dienste, neue Dienste, auf die im Folgenden näher eingegangen wird:

a. Kontrolldienste:

- 5G wird für die Online-Überwachung dynamischer Echtzeitdaten im Verteilungsnetz (DN) eingesetzt.

- Typische Anwendungsfälle sind präzise Laststeuerung (PLC) und Differentialschutz im DN
- Der Aufbau der PLC-Kommunikation ist in Abbildung 94 dargestellt:
- Das PLC-System besteht aus Service-Terminals, Demand-Response-Terminals, einem Kommunikationsnetzwerk und einem Master-Station-System.
- Das Service-Terminal ist mit dem Demand-Response-Terminal der Anlage über ein lokales Netzwerk verbunden (unter Verwendung von Kurzstrecken-Kommunikationsprotokollen wie RS485, Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee usw.) und dann mit der Master-Station des Demand-Response-Systems über ein zellulares Fernkommunikationsnetzwerk wie 5G.

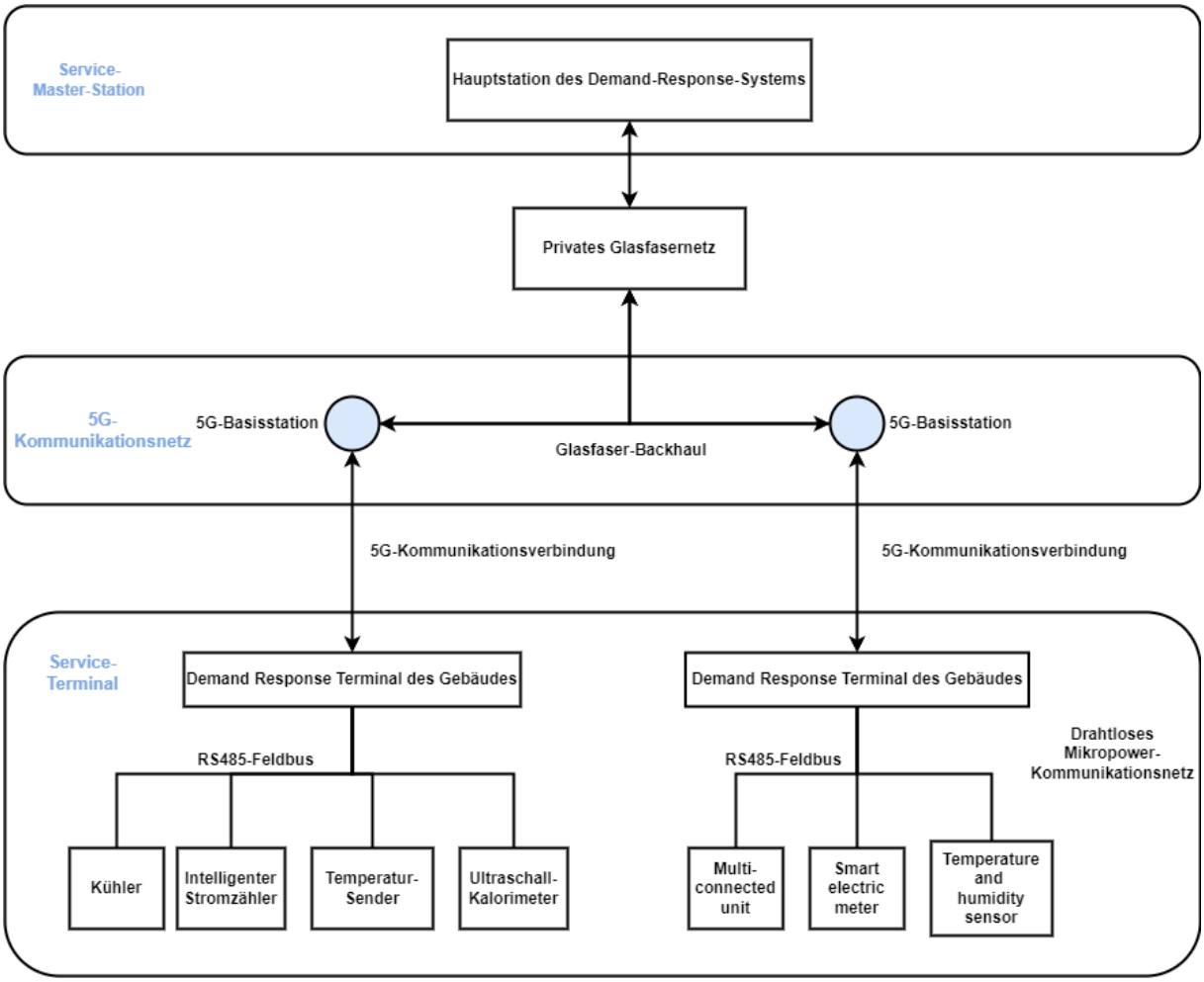


Abbildung 94: Schema eines 5G-basiertes System zur präzisen Laststeuerung [2]

- Das System zur präzisen Laststeuerung erfordert eine schnelle Wiederherstellung des Gleichgewichts zwischen Angebot und Nachfrage (die Latenzzeit von der Master-Station zum Terminal darf 50 ms nicht überschreiten) und erfordert daher die von 5G gebotene uRLLC-Fähigkeit.
- DN vergleicht die Stromwerte von zwei oder mehr verschiedenen Schutzterminals zum gleichen Zeitpunkt.
- Die Stationen müssen zeitsynchronisiert sein (geringe Latenzzeit erforderlich, damit die Zeitgenauigkeit 10 ms nicht überschreitet) [3].

b. Erhebungsdienste

Mit diesen Diensten werden Stromverbrauchsdaten von Endverbrauchern gesammelt. Hier gibt es keine strengen Anforderungen an die Latenzzeit, aber die mMTC-Fähigkeit von 5G wird aufgrund der massiven Menge an Überwachungsgeräten (d. h. intelligenten Zählern) benötigt, die eingesetzt werden.

- Das Dienstsystem besteht aus 3 Schichten: Masterstationsebene, Kommunikationskanalebene, Erfassungsgeräteebene (d. h. intelligente Zähler).
- Die intelligenten Zähler erfassen die Verbrauchsdaten und laden sie auf ein Service-Terminal hoch, das die Daten wiederum über einen vorgeschalteten Kanal an eine Master-Station sendet (die Steuerungsvorgänge werden ebenfalls von dem Service-Terminal verwaltet)
- Die Kommunikationsrate muss größer als 1,05 kbit/s sein, die Übertragungsrate für Laststeuerungsbefehle muss größer als 25 kbit/s sein. [3]

Das physikalische System ist wie folgt aufgebaut:

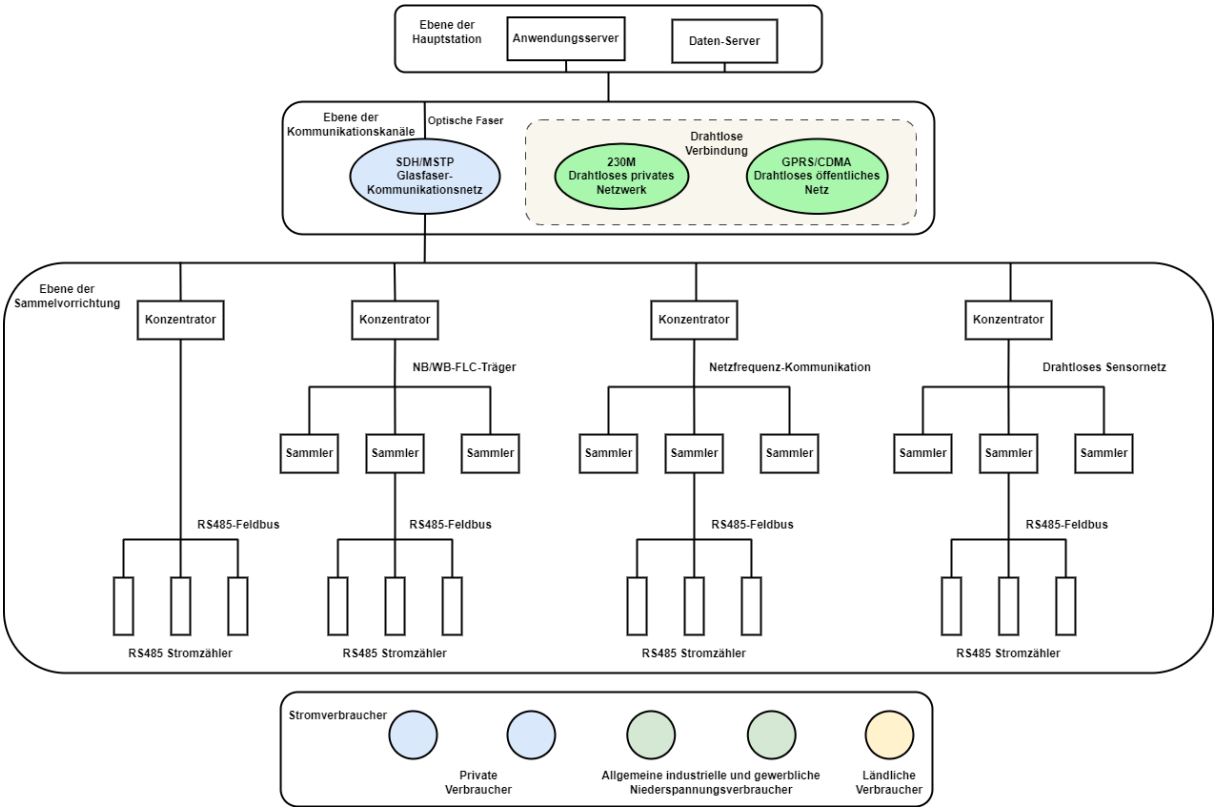


Abbildung 95: Übersicht über die Systemkommunikation für Sammeldienste [3]

c. Mobile App-Dienste

Diese Dienste zeichnen sich durch hohe Bandbreite und Sicherheit aus und dienen der Überwachung und Inspektion der Netzelemente gegen unerwünschte Situationen. Sie erfordern daher eMBB-Fähigkeit (hohe Bandbreite) für Datenströme, die aus Live-Videokameraströmen usw. bestehen können, die 5G bietet.

d. Neue Dienste

Diese neuen Dienstkonzepte betreffen in erster Linie die Entwicklung von Smart-Grids mit Power IoT und Network Edge Computing: Hier werden spezialisierte Daten lokal in Knoten für jede Smart-Grid-Unterkomponente (die in AP 6.1 genannten Komponenten) gespeichert, und die lokalen Algorithmen, die den Betrieb dieser Komponenten steuern, laufen auf den jeweiligen Endgeräten und verwenden Referenzsignale, die sie von den Kontrollzentren erhalten. Diese Dienste ermöglichen:

- Höhere Bandbreite
- Geringe Latenzzeit
- Lokalisierte Dienste mit ihren jeweiligen Latenz- und Bandbreitenanforderungen

3.9.3.3 Herausforderungen von 5G

Eine Herausforderung von 5G in einem Smart-Grid-Szenario besteht darin, dass es sich um eine neu etablierte Technologie handelt, deren Standards derzeit noch nicht ausgereift sind und deren Standardisierungsprozess noch im Gange ist. Die 3GPP-Veröffentlichung 18 legt die ersten 5G-Standards für die Nutzung in intelligenten Netzen fest, die als Referenzpunkt dienen können. Der derzeitige Mangel an klaren Geschäftsmodellen für 5G ist Berichten zufolge ein größeres Problem als der technologische Aspekt [3]. Eine weitere wichtige Herausforderung ist der Kostenaspekt, da erwartet wird, dass 5G im Vergleich zu den heutigen Technologien wie 2/3/4G dreimal teurer und stromintensiver sein wird, zusammen mit den höheren Bau- und Wartungskosten.

In einer Studie von Borgaonkar et al. (2021) werden die Sicherheitsaspekte von 5G aus einer 5G-basierten IoT-Perspektive untersucht und analysiert, indem ein typischer Anwendungsfall von 5G in einem Smart-Grid-Szenario simuliert wird, nämlich die automatische Spannungsregulierung in den kritischen Knotenpunkten eines über ein 5G-Netz verbundenen Smart-Grid. Es wird über den Bedarf an massiven IoT-Geräten und -Kommunikationen berichtet, und der ausgewählte Anwendungsfall dient als Grundlage für die Charakterisierung verschiedener IoT-Geräte und die Identifizierung der wichtigsten Sicherheitsanforderungen, die in einem Smart-Grid-Szenario wichtig sein werden. Aus Sicht der Sicherheit sind IoT-Geräte das schwächste Glied in der Smart-Grid-Kette, da Angreifer versuchen werden, diese Geräte zu kompromittieren, um Zugang zum gesamten Netzwerk zu erhalten [4].

Die Studie gibt einen guten Überblick, wie die Smart-Grid-Kommunikation mit 5G aufgebaut werden kann (siehe Abbildung 96). I_a I_b, I_c und I_d sind die Schnittstellen zwischen den Grid-Elementen. AUSF (Authenticated Server Function), UDM (Unified Data Management), NEF (Network Exposure Function), AMF (Access and Mobility Management Function) und SMF (Session Management Function) sind vom 5G-Kernnetz eingeführte Funktionen, die für die Bereitstellung von sicherheits- und datenschutzbezogenen Funktionen für IoT-Geräte verantwortlich sind. Mobile Edge Computing (eine weitere von 5G ermöglichte Technologie) besteht aus dem lokalen Datenmess- und Steuerelement (den bereits erwähnten Service-Terminals) der Netzelemente, wodurch die Gesamtbandbreite und die Rechenlast des Smart-Grid-Kontrollzentrums reduziert werden. (A) und (B) stellen die IoT-Geräte des Typs A bzw. B dar.

Außerdem wird zwischen zwei Arten von IoT-Geräten unterschieden:

- Typ A: Normale IoT-Geräte (automatische Spannungsregler, digitale Stufenschalter, Umrichtersteuerungen, etc.) → In der Regel mit einem 5G-Funkmodem für das Netzwerk ausgestattet.

- Typ B: Geräte mit eingeschränkten Ressourcen, die an abgelegenen Orten eingesetzt werden (z. B. kleine drahtlose Sensoren/Aktoren zur Temperaturmessung, Neigung von Strommasten und Transformatoren usw.). Für diese Geräte gibt es ein Gateway, das mit einem 5G-Funkmodem ausgestattet ist und für die Datenerfassung zuständig ist.

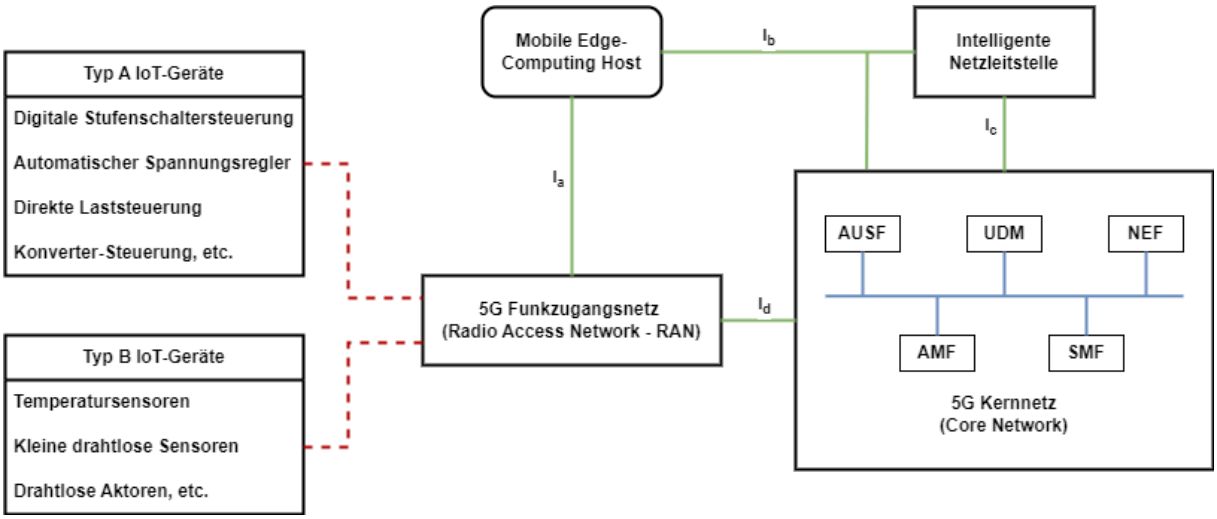


Abbildung 96: Schematische Darstellung eines Smart-Grids mit 5G-Netzwerk und IoT-Geräten [4]

Die Struktur des betrachteten Anwendungsfalls der Spannungsregelung umfasst hauptsächlich die aktive Überwachung und Steuerung von Leistungsschaltern/Trennschaltern, die verschiedene Arten von Energiequellen, die groß und zentral (z. B. Wasserkraft) und/oder kleiner und regional (z. B. erneuerbare Energien, Solar- und Windparks, Anlagen usw.) sein können, im gesamten Übertragungs- und Verteilungsnetz verbinden. Die Überwachung und Steuerung sowohl des Übertragungs- als auch des Verteilungsnetzes erfolgt von Kontrollräumen aus, die den ÜNB bzw. VNB zugewiesen sind. Diese Kontrollräume kommunizieren auch untereinander in Bezug auf Steuersignale (z. B. Ein- und Ausschalten von Leistungsschaltern) und langfristige Daten für künftige intelligente Algorithmen wie die vorausschauende Wartung. Um die erforderlichen Spannungsniveaus aufrechtzuerhalten, suchen die ÜNB nach erneuerbaren Energieressourcen (EE) und dezentralen Energieressourcen (DER) im Verteilernetz, und beide Leitwarten berechnen die optimalen Sollwerte für die Blindleistungsquellen in ihren eigenen Bereichen. [4]

Die in Abbildung 97 dargestellte Systemskizze liefert uns eine gültige Grundlage für die genaue Methodik der Integration von Wasserstoff in ein solches Stromnetzszenario mit verschiedenen Arten von Stromquellen und zeigt gleichzeitig die Verteilung der Komponenten jeder Komponente innerhalb der Spannungsebenen des Stromnetzes.

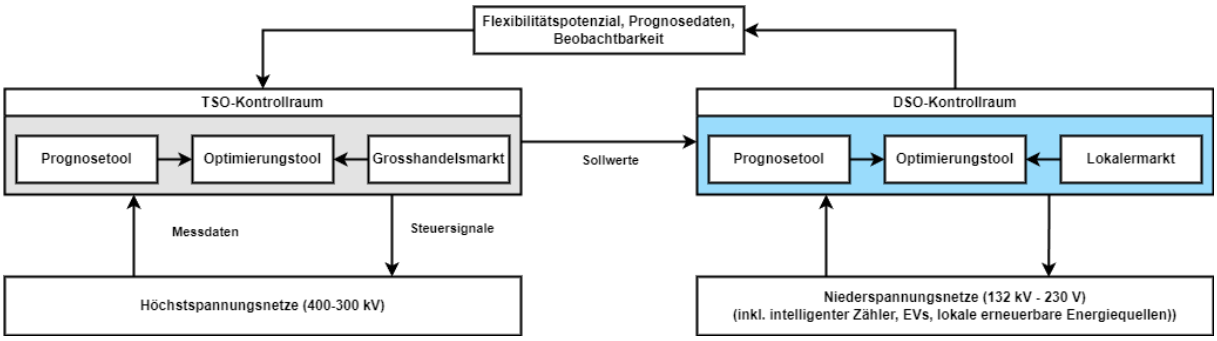


Abbildung 97: Systemskizze für den Anwendungsfall der automatischen Spannungsregelung, einschließlich der Zusammenarbeit zwischen ÜNB und VNB [4].

3.9.3.4 Vorschlag für ein grünes wasserstoffbasiertes Smart-Grid mit 5G-Integration

Auf der Grundlage der Ergebnisse der untersuchten Studien und des Systementwurfs für den physikalischen Bereich aus AP 6.1 wird ein konzeptioneller Systementwurf für die digitale Infrastruktur vorgeschlagen, der in Abbildung 98 dargestellt ist.

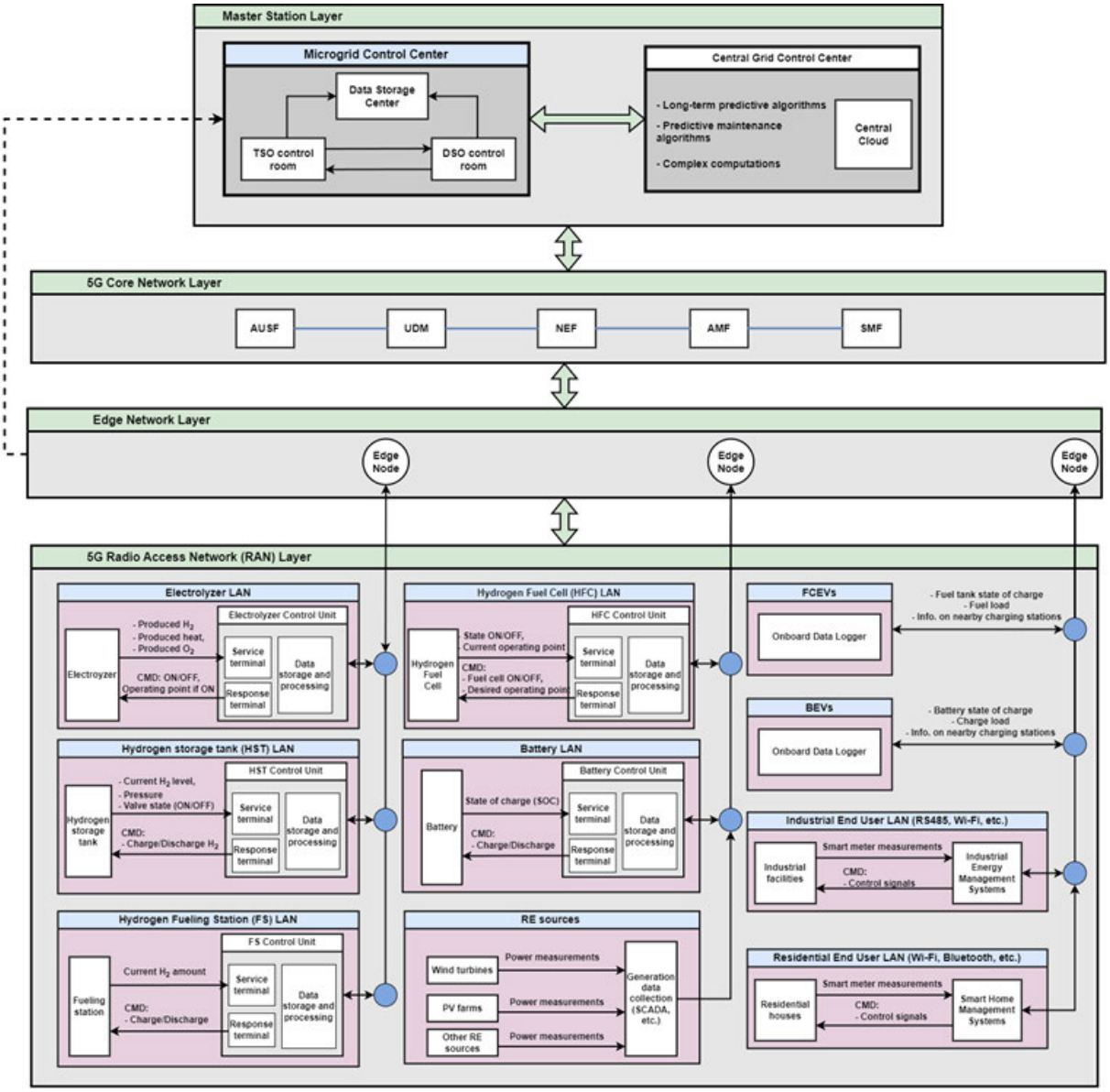


Abbildung 98: Skizze des Signalbereichs des vorgeschlagenen Smart-Grid-Konzepts. Blaue Kreise kennzeichnen die Basisstationen und alle anderen Formen von Kommunikationsknoten, die durch die 5G-Architektur ermöglicht werden. Grüne und schwarze Pfeile zeigen den bidirektionalen Informationsfluss zwischen den einzelnen Schichten bzw. Komponenten an.

Der Grundgedanke hinter diesem Konzept ist, dass jede Komponente innerhalb des Smart-Grid-Systems über ein eigenes lokales Netzwerk (LAN) verfügt, das aus Mainstream-Kommunikationsprotokollen mit kurzer Reichweite wie WiFi, RS485, Bluetooth, Ethernet usw. besteht, über das die für jede Komponente spezifischen Daten über intelligente Zähler gesammelt und an die Edge-Computing-Einheiten übertragen werden.

Jede Komponente in der RAN-Schicht verfügt über eine eigene Steuereinheit, die aktuelle Daten und Zustände von ihrer jeweiligen Komponente über ihre Service-Terminals sammelt,

eine lokale Datenspeicherung und -verarbeitung durchführt und die relevanten Daten über Zugangsknoten wie Basisstationen (blaue Kreise in Abb. 9) an die Randknoten (meist lokale Datenspeicher) der höheren Randnetzschicht sendet, wo die Daten ebenfalls gespeichert und verarbeitet werden. Die relevanten Daten werden dann von der Randnetzebene über die 5G-Kernnetzebene an die Hauptstationsebene gesendet, wo ein regionales Mikronetz für die Steuerung des Betriebs des Mikronetzes verantwortlich ist, indem es die Daten unter Verwendung hochentwickelter Algorithmen wie empfängt und verarbeitet und dann die entsprechenden Befehlssignale an die Steuereinheiten der einzelnen Komponenten sendet, wobei dieselbe Kommunikationsarchitektur verwendet wird. Die für die einzelnen Komponenten der RAN-Schicht spezifischen Steuersignale werden über die Antwortterminals ihrer Steuereinheiten unter Verwendung ihrer LANs gesendet. In der Zwischenzeit können die Daten von den erneuerbaren Energiequellen unter Verwendung bereits bestehender IT-Architekturen wie SCADA gesammelt werden.

Dieser Ansatz der Aufteilung der Datenspeicherung und der Rechenkapazitäten von einer zentralen Cloud, die alle Daten speichert, auf mehrere kleine Edge-Knoten, die sich näher an den Datenquellen befinden, wird als Edge Computing bezeichnet und ermöglicht eine Aufteilung der Daten und eine geringere Arbeitsbelastung für das Smart-Grid-Kontrollzentrum und die zentrale Cloud, was die Effizienz erhöht.

Damit dieser Ansatz funktioniert, müssen Informationen über die Einspeisung erneuerbarer Energien über Systemarchitekturen wie Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) usw. von den Erzeugungselementen und über den Gesamtenergiebedarf der Endverbraucher über intelligente Zähler usw. eingeholt werden.

In Anbetracht der Untersuchungsregion für das NordH2essen-Projekt kann ein Vorschlag für den Bau einer Microgrid-Zentrale mit einem Datenspeicher für jeden der untersuchten Bezirke gemacht werden, jedoch ist eine detaillierte Untersuchung der bereits bestehenden Netzarchitektur und Wissen über den gewünschten Umfang der Wasserstoffintegration erforderlich, um diesen Konzeptvorschlag konkret umzusetzen.

Zusammenfassung

In AP 6.3 wurden die digitale Infrastruktur und die Kommunikationsfähigkeiten untersucht, die für ein intelligentes Stromnetz erforderlich sind, wobei der Schwerpunkt auf der Integration der 5G-Technologie lag. Folgende Themen wurden behandelt:

- Betrachtung der traditionellen Stromnetztopologie und zukünftige Entwicklungen.
- Die Hauptmerkmale von 5G und Betrachtung von Stärken und Schwächen sowie den wichtigsten Beiträgen zum Smart Grid.
- Wie fortschrittliche Kommunikationstechnologien wie 5G in die gegebene Untersuchungsregion integriert werden können und wie die Ergebnisse als Ausgangspunkt für weitergehende Forschung in der Zukunft dienen können.
- Der Vorschlag einer digitalen Kommunikationsinfrastruktur für das wasserstoffbasierte Smart-Grid-Konzept, das in A.P 6.1 vorgeschlagen wurde, sowohl für die untere als auch die obere Systemebene.

3.9.4 Betrachtung Prognosesysteme für Erzeugung und Betankung

Für ein Prognosesystem ist es essenziell, die verschiedenen Parameter des Systems zu kennen und miteinander zu verknüpfen. Die Parameter sind z.B. Verfügbarkeit, Ausfallwahrscheinlichkeit, Fehler- und Degradationserkennung, Produktionskapazität sowie die Auslastung. Im Folgenden wird aufgezeigt, wie diese Parameter über Wirkzusammenhänge und Wahrscheinlichkeiten miteinander verknüpft werden können.

Ein herkömmliches System zur Erzeugung und Betankung von Wasserstoff besteht aus einer Wasserstoffproduktionseinheit, einer Speicher- und Betankungseinheit, Brennstoffzellenfahrzeugen, einem Steuerungs- und Sicherheitssystem, elektrischen Systemen und Hilfsteilen. Für dieses Projekt wird beispielhaft aufgezeigt wie über mögliche Degradationsmechanismen und Möglichkeiten zu deren Abschwächung, wie in 6.5 vorgeschlagen, eine Speichereinheit (s. Abbildung 99) Analysiert werden kann.

Am Beispiel einer Speichereinheit (s. Abbildung 99) wird gezeigt, wie eine Analyse möglicher Degradationsmechanismen und Möglichkeiten zu deren Minderung durchgeführt werden kann.

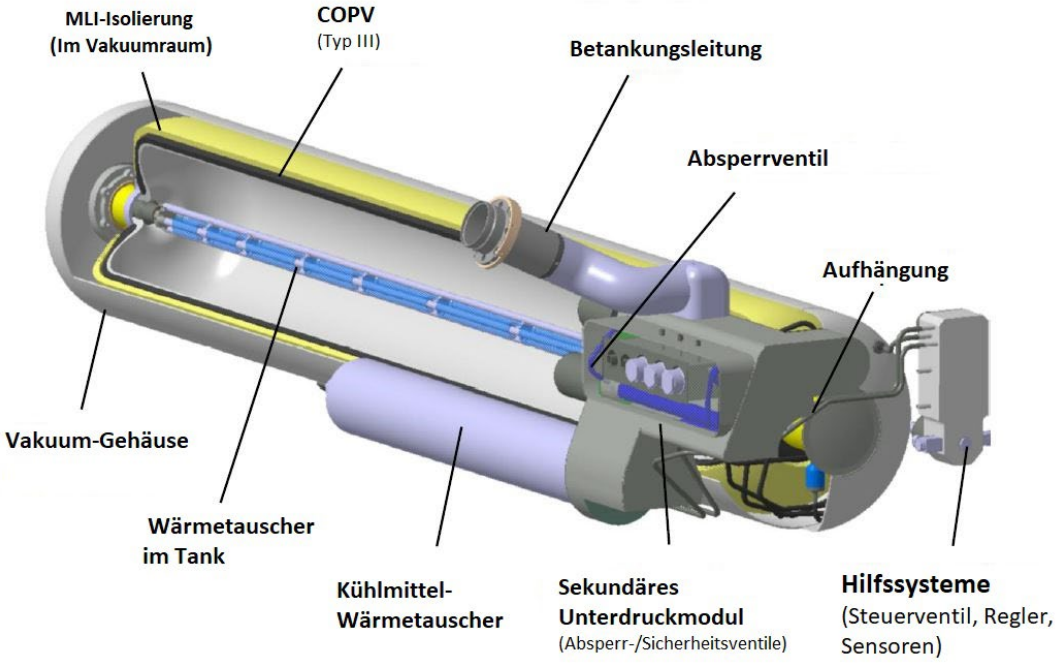


Abbildung 99: Wasserstoffspeicher [1]

Die Mehrschichtisolierung (MLI) ist für die Minimierung der Wärmeübertragung zwischen dem gespeicherten Wasserstoff und der Umgebung von wesentlicher Bedeutung. Dies ist entscheidend für einen sicheren Betrieb innerhalb einer sicheren Temperatur, indem der Wasserstoff bei einer niedrigen Temperatur mit einer höheren Dichte gehalten wird. Der Composite Overwrapped Pressure Vessel (COPV) ist ein leichter, hochfester Behälter, der den hohen Drücken standhält, die für die Maximierung der Dichte des Brennstoffs erforderlich sind. Der Wärmetauscher im Tank ist notwendig, um die Temperatur des gespeicherten Wasserstoffs zu steuern und zu kontrollieren, da der Speicher beim Befüllen und Nachfüllen einer Umgebungstemperatur ausgesetzt sein kann, die die für den Betrieb erforderliche Temperatur beeinflussen kann. Der Kühlmittelwärmetauscher wiederum regelt die Temperatur des Kühlmittels, das zur Kühlung des Hochdruckwasserstoffs im Tank verwendet wird. Das Vakuumgehäuse schafft außerdem eine Niederdruckumgebung um den Tank herum, die dazu beiträgt,

die Wärmeübertragung zu minimieren und die Temperatur des gespeicherten Wasserstoffs zu halten. Das Ventil steuert den Wasserstofffluss in den und aus dem Tank und regelt den Druck des Wasserstoffs, während das Aufhängungssystem dazu beiträgt, den Tank sicher in einem Fahrzeug oder anderen Anwendungen zu befestigen und zu stützen. Die Studie befasst sich mit den Ventilen, den Materialien (MLI und COPV) sowie den Wärmetauschern. Auf der Grundlage von Forschungsarbeiten über die Bedeutung und die Auswirkungen der verschiedenen Teile von Groth und Julian (2020)(3) werden Daten gesammelt, analysiert und gruppiert, um eine fiktive Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) mit wahrscheinlichen Zusammenhängen zwischen den Fehlermöglichkeiten der Komponenten und den beobachteten Auswirkungen auf die gesamte Speichereinheit des H2-Systems durchzuführen. Die FMEA (Abbildung 100) wurde mit der Software APIS IQ-FMEA PRO 7.0 erstellt. Diese Fehleranalyse ist essentiell, um einen effektiven Überblick über die Ausfallraten innerhalb der Komponenten des Systems und eine Möglichkeit für eine potentielle positive Auswirkung während des Betriebs des Wasserstofferzeugungs- und Betankungssystems darzustellen.

Da die Technologie der Wasserstofferzeugung und -betankung nicht ganz neu ist, können zur Verfeinerung des Modells weitere Daten aus bestehenden Systemen und der Literatur herangezogen werden. Im weiteren Verlauf können die Entwickler der Komponenten und Materialien erste Aussagen darüber treffen, wie hoch die Ausfallwahrscheinlichkeiten sind und welche Ursache-Wirkungs-Beziehungen bestehen. Um die generierten Fehlernetzwerke und Fehlerwahrscheinlichkeiten zu validieren und zu verifizieren, müssen während der Umsetzung des Konzepts Komponententests, Integrationstests und Systemtests durchgeführt werden. Aus der Analyse von Groth und Julian (2020) (3) geht hervor, dass die Ventile die Komponenten mit dem höchsten Schweregrad und Risikowahrscheinlichkeit sind. Aufgrund des Mangels an verfügbaren Daten werden Schweregrad, Eintrittswahrscheinlichkeit und Risikoniveau in Klassen eingeteilt. Ihre Untersuchungen lassen darauf schließen, dass das Ventil die Schwereklasse Kritisch* (höchster Schweregrad) und die Eintrittswahrscheinlichkeit H (hoch) mit einem Risikoniveau "H" aufweist, wobei H (hoch) bedeutet. Der Bruch des Tanks stellt ebenfalls eine Gefahr dar, deren Schweregrad als kritisch und die Eintrittswahrscheinlichkeit als M (mittel) eingestuft wird, während der Risikograd mit H (3) angegeben wird. Der Schwerpunkt liegt auf den Auswirkungen des Ventils, und die Ergebnisse werden analysiert, wenn der Sensor eingebaut ist. Die Daten werden zur Verdeutlichung numerisch dargestellt und eine fiktive FMEA wird in dieser Studie präsentiert.

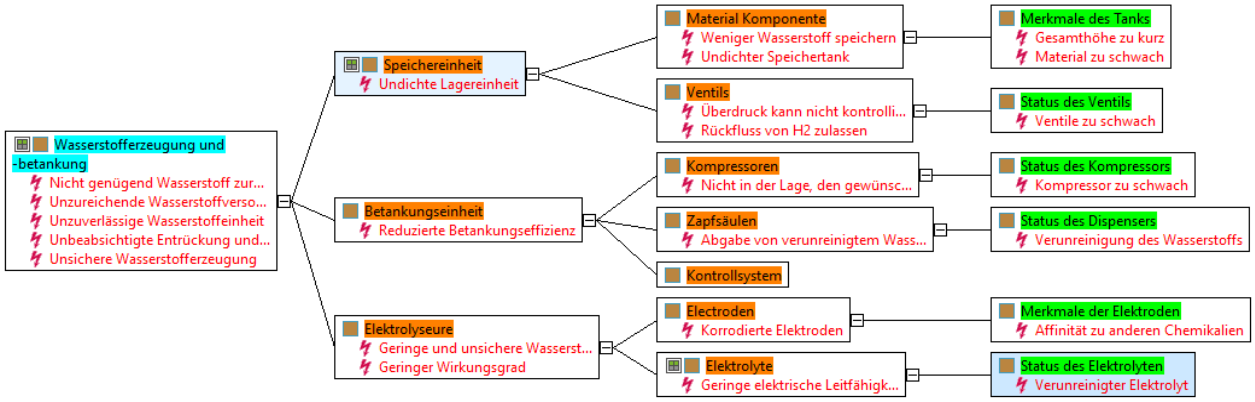


Abbildung 100: FMEA des gesamten Systems.

Die Analyse ohne Sensor zeigt eine hohe Fehlerwahrscheinlichkeit, ihr Auftreten und ihre Erkennung mit einer sehr hohen Wahrscheinlichkeit, die zu einer möglichen Fehlfunktion und Abschaltung des Systems führen könnte. Ein Blick auf Abbildung 101 zeigt, wie ein mäßiger Ausfall des Ventils (zu schwach) zu unfähigem Überdruck und potenziellen Leckagen der Speichereinheit führen könnte, was eine katastrophale und unbeabsichtigte Abschaltung zur Folge hätte. Dies stellt eine Gesamtrisikoprioritätszahl (RPZ) von 720 dar, die sehr hoch (H) und für den Betrieb inakzeptabel ist, so dass besondere Maßnahmen mit einer Aktionspriorität (AP) zu ergreifen sind (Abbildung 102 Abbildung 101).

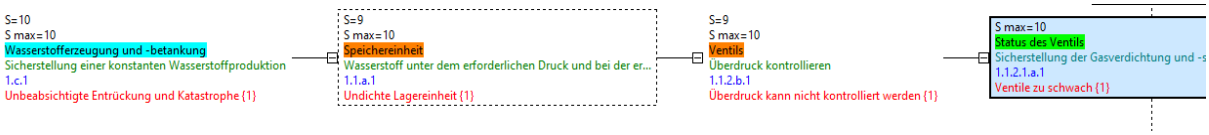


Abbildung 101: FMEA-Analyse der Auswirkungen eines Ventilausfalls.

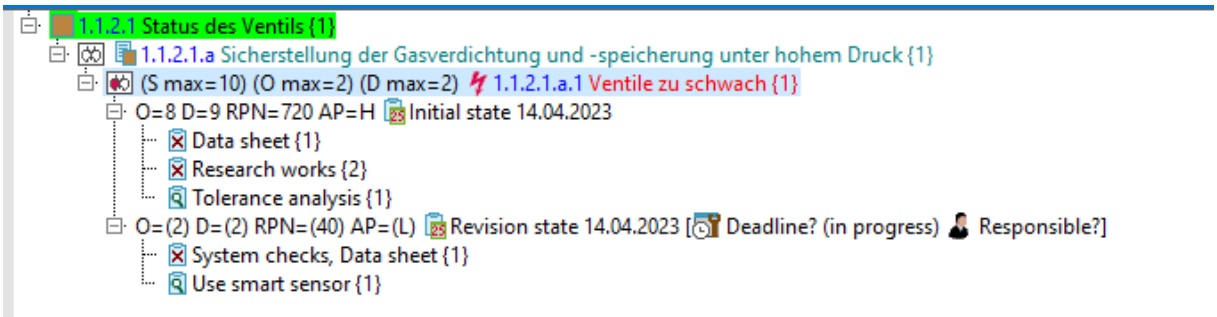


Abbildung 102: Einfluss des Sensors auf die RPZ

Die Verwendung eines intelligenten Sensors hat weniger katastrophale Folgen als die, die in der Analyse ohne den intelligenten Sensor dargestellt werden. Der Sensor senkt die Wahrscheinlichkeit des Auftretens und der Entdeckung so sehr, dass seine RPZ potenziell auf Null sinkt und eine geringere Handlungspriorität (L) hat. Dies dient als "systematischer Unterschied" in Bezug auf die spezifischen funktionalen Auswirkungen, wie z. B. die frühzeitige Erkennung von Fehlern, die Echtzeitanalyse der Auswirkungen auf den Tank und den schwankenden Druck und die Temperatur innerhalb der Speichereinheit. Da die Ausfallwahrscheinlichkeiten stark von den Nutzungs- und Lastprofilen sowie den Umgebungsarten abhängen, in denen die Erzeugung und Betankung stattfindet, müssen diese Parameter für ein genaueres Ergebnis ermittelt und bewertet werden.

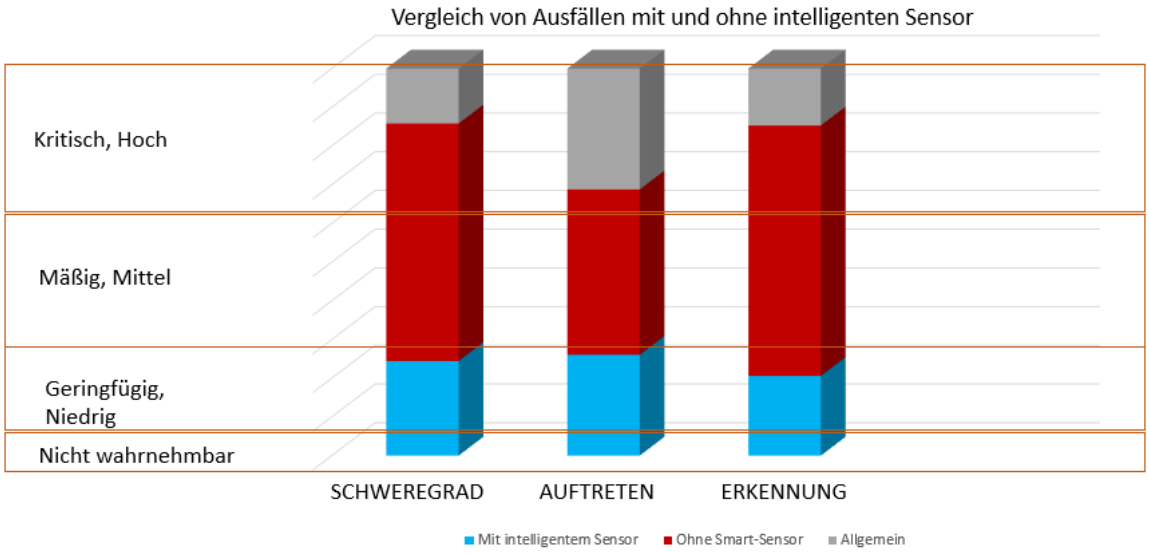


Abbildung 103: Vergleich der Ausfälle mit und ohne Smart Sensor

Sensoren

Im Laufe der Zeit können im System zur Erzeugung und Betankung von Wasserstoff potenzielle Fehler auftreten. Ein wichtiger Aspekt ist der Smart-Sensor, der bei der Datenerfassung in Echtzeit helfen würde. Ein elektrochemischer Sensor ist beispielsweise darauf ausgelegt, Spuren von Verunreinigungen zu erkennen. Bei mäßiger Sensitivität (Beeinträchtigung bspw. Durch CO), ungleichmäßiger Temperatur und ungleichmäßigem Betriebsdruck, Verunreinigungen sowie Feuchtigkeitsschwankungen ist die Lebensdauer des Sensors auf 2 Jahre begrenzt (8 Jahre unter der Zielvorgabe des US-Energieministeriums (DOE)) (4).

Zur Lösung dieses Problems werden Sensoren auf Kohlenstoffbasis im Nanometermaßstab vorgeschlagen. Dabei handelt es sich um fortschrittliche Sensoren mit einer großen Oberfläche im Verhältnis zu ihrem Volumen, hervorragender chemischer und thermischer Stabilität, hoher elektrischer Leitfähigkeit und Wärmeleitfähigkeit sowie hervorragender mechanischer Festigkeit. Wie in einigen Veröffentlichungen beschrieben, wird erwartet, dass diese Sensoren eine hohe Empfindlichkeit, schnellere Reaktionen, einen geringen Stromverbrauch und niedrigere Kosten bieten. Ihre mechanische Beweglichkeit würde auch dazu beitragen, ungünstigen Umgebungsbedingungen zu widerstehen, was ihre stabile Lebensdauer erhöhen würde (5).

Die Methodik dieser Analyse kann auf mehrere hierarchische Ebenen des Wasserstofferzeugungs- und betankungssystems ausgedehnt werden, von der Komponentenebene bis hin zum Gesamtsystem, wie in Abbildung 100 dargestellt. Es ist von wesentlicher Bedeutung, Ursachen und Auswirkungen externer Quellen zu antizipieren. Daher müssen alle Faktoren und Daten sorgfältig berücksichtigt werden, um eine ordnungsgemäße Quantifizierung von Fehlern zu ermöglichen, damit die bestmöglichen Maßnahmen zu ihrer Abschwächung ergriffen werden können.

3.9.5 Condition Monitoring / digitale Instandhaltung

Eine Wasserstoffinfrastruktur umfasst die folgenden Komponenten:

- Tanks, Pipelines und Dichtungen
- Elektrolyseure mit Leistungselektronik, Kompressoren und Kühleinheiten
- Druck-, Temperatur- und Durchflusssensoren
- Sicherheitseinrichtungen wie z. B. ein Druckkontrollsystem
- IT-Systeme und Software
- Infrastrukturgebäude

Für alle diese Komponenten gibt es Systemzustände und Wartungsintervalle. Die Überwachung liegt in der Verantwortung der Betreiber und die Methodik hängt von der Infrastruktur ab.

Es wird empfohlen, bei der Wartung und Instandhaltung risikobasierte Instandhaltung (RbM) zu verwenden, um den Aufwand gezielt zu gestalten. Die risikobasierte Instandhaltung ist eine Instandhaltungsmethodik, die die Grundsätze der Risikobewertung nutzt, um die Instandhaltungsaufgaben und die Zuweisung von Ressourcen zu optimieren. Sie beinhaltet die systematische Ermittlung der Kritikalität, der Ausfallarten und des Ausfallrisikos einer Anlage, um einen Instandhaltungsplan zu erstellen, der das Ausfallrisiko minimiert [1]. Ein wichtiges Werkzeug, das für RBM verwendet werden kann, ist die Methode der Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA). Die FMEA ist eine systematische Methode zur Bewertung und Identifizierung, wo und wie ein Produkt oder ein Prozess versagen könnte [2]. Es handelt sich um einen proaktiven Ansatz zur Bewertung der Auswirkungen potenzieller Ausfälle und zur Ermittlung der Komponenten innerhalb des Prozesses, die am dringendsten geändert werden müssen.

Bei der Zustandsüberwachung handelt es sich um eine vorausschauende Instandhaltungsstrategie, die darauf abzielt, Anlagenausfälle, Stillstandszeiten und unnötige Maßnahmen zu vermeiden, indem der Zustand der Anlage überwacht wird, um festzustellen, welche Wartungsarbeiten wann durchgeführt werden müssen [3]. Traditionell umfasst die Überwachung einer Maschine im Hinblick auf diese Schwellenwerte und Indikatoren nicht-invasive Messungen, visuelle Inspektionen, Leistungsdaten und geplante Tests und wird in voreingestellten oder vorbestimmten Intervallen durchgeführt. Bei der zustandsorientierten Überwachung hingegen werden potenzielle Ausfallarten und deren Indikatoren untersucht und anschließend überwacht. Im Gegensatz zur vorbeugenden Instandhaltungsstrategie, die in vordefinierten Intervallen durchgeführt wird, verlängert die Zustandsüberwachung die Zeit zwischen den Wartungsstillständen, da die Wartung nach Bedarf erfolgt, und hat somit das Potenzial, die Wartungskosten zu senken.

Im Folgenden werden einige Systemkomponenten, die in direktem Kontakt mit Wasserstoff stehen, als Beispiele herausgegriffen und Möglichkeiten der Zustandsüberwachung aufgezeigt:

1. Rotierende Bauteile

Dazu gehören Motoren, Pumpen, Wälzlager, Verdichter und Kühlaggregate. Ein häufiger Schadensfall an diesen Bauteilen sind Schäden an den Lagern der rotierenden Wellen. Der Wälzkontakt führt zu Verschleiß und möglichem Ausfall der Lager. Es gibt etablierte Verfahren zur Überwachung der Lager, die in der Norm DIN ISO 10817-1 aufgezeigt werden. Diese Norm befasst sich mit Schwingungsmesssystemen zur Erfassung der Abrollgeräusche der Lager.

Auf diese Weise können Lagerschäden frühzeitig erkannt werden, insbesondere bei teuren Anlagen, bei denen ein defektes Lager weitere Folgeschäden verursacht.

2. Wasserstoffleckage

Da es sich bei gasförmigem Wasserstoff um ein so kleines Molekül handelt, besteht ein hohes Risiko von Leckagen. In einem ordnungsgemäß ausgelegten System stellen sehr kleine Lecks kein Problem dar, da die winzige Gasmenge nicht ausreicht, um ein entflammbares Gemisch in der Luft zu erzeugen. Eine Ansammlung des Gases birgt jedoch die Gefahr von Flammen, Explosionen oder Erstickungsgefahr.

Gasförmiger Wasserstoff ist farb-, geruch- und geschmacklos und daher schwer zu erkennen. Zu den Methoden der Lecksuche bei gasförmigem Wasserstoff gehören:

- Hören von unter hohem Druck austretendes Gas (lautes Zischgeräusch).
- Verwendung von tragbaren oder fest installierten Wasserstoffdetektoren, die einen lokalen oder anlagenweiten akustischen oder sichtbaren Alarm auslösen können.

Da es sich bei flüssigem Wasserstoff um eine kryogene Flüssigkeit handelt, verhalten sich die Lecks anders und sind möglicherweise leichter zu entdecken. Selbst in trockenen Klimazonen erzeugt ein Flüssigwasserstoffleck eine weiße Wolke aus kondensiertem Wasserdampf, da die kryogene Temperatur die Kondensation und die Feuchtigkeit in der Umgebungsluft beeinflusst. Dieser Niedrigtemperatur-Wasserdampf ist schwerer als Luft, so dass die Wolke lokal begrenzt bleibt und sich horizontal bewegen kann.

In Tabelle 43 wurden bereits die Maßnahmen zur Erkennung und Verhinderung schlimmer Auswirkungen von Wasserstofflecks beschrieben.

3. Metallteile in Kontakt mit Wasserstoff

Wasserstoff kann als kleinstes Atom in die Kristallstruktur eines festen Metalls eindringen, wodurch das Gefüge spröder und versagensanfälliger wird [4]. Dieser Prozess wird als Wasserstoffversprödung bezeichnet und bezeichnet den Verlust der Duktilität eines Metalls und die Verringerung der Tragfähigkeit aufgrund der Aufnahme von Wasserstoffatomen oder -molekülen durch das Metall [5]. Das Ergebnis der Wasserstoffversprödung ist, dass Bauteile bei Spannungen, die unter der Streckgrenze des Metalls liegen, reißen und brechen.

Die nützlichsten und kosteneffizientesten Prüfverfahren zum Nachweis von Rissen, die durch Wasserstoffversprödung verursacht werden, sind die Magnetpulverprüfung (MPT) und die Ultraschallprüfung (UT) [6]. Die MPT ist besonders nützlich für die Identifizierung von Oberflächenrissen. UT-Techniken können auch Risse an der Oberfläche oder unter der Oberfläche des Bauteils genau lokalisieren. Da es sich um teure Komponenten der Wasserstoffinfrastruktur handelt, ist die Demontage der Komponenten zur Risserkennung ein sehr zeitaufwändiger und unpraktischer Prozess. Daher ist die richtige Konstruktion der Bauteile wichtig, ebenso wie die Wahl der richtigen Materialien, da verschiedene Materialien unterschiedlich auf Wasserstoff reagieren.

4. Wasserstoffspeicherbehälter

Leichte Druckbehälter werden zur Speicherung von gasförmigem Wasserstoff im Energiesektor oder in der Automobilindustrie eingesetzt [7]. Diese Behälter werden von einem Glas- oder Kohlefaserverstärkten Kunststoff als tragende Struktur umhüllt. Diese Werkstoffe

eignen sich aufgrund ihrer mechanischen Eigenschaften besonders für die Herstellung von leichten, stabilen und korrosionsbeständigen Bauteilen. Die Innenauskleidung des Tanks besteht aus einem thermoplastischen Liner, der die Gasdichtigkeit gewährleistet (Abbildung 104). Darüber hinaus gibt es Metallelemente an den Enden des Tanks. Einige Probleme wie Wasserstoffversprödung oder Korrosion sind ausgeschlossen, da die Auskleidung nicht aus einem metallischen Werkstoff, sondern aus Kunststoff besteht.

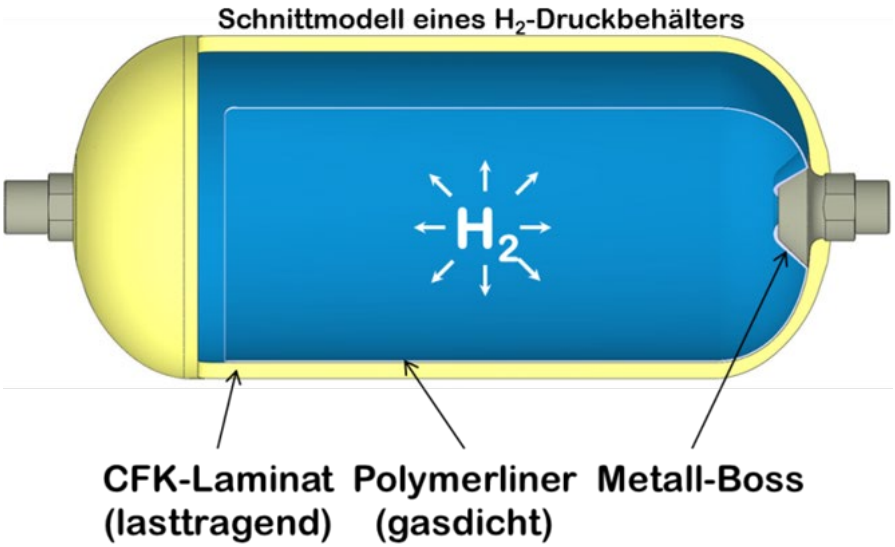


Abbildung 104: Querschnittsmodell eines Wasserstoffdruckbehälters aus faserverstärktem Kunststoff mit nichttragender Kunststoffauskleidung.

Wasserstofftanks [190] müssen nicht nur dicht sein und eine kompakte Bauweise haben, sondern auch eine hohe Ermüdungsfestigkeit aufweisen. Es ist zu erwarten, dass der Tank viele Male befüllt, entleert und wieder befüllt wird. Das Durchlaufen dieser Abfolge wird als Zyklus bezeichnet, der zu Materialermüdung führen kann [8]. Ermüdung ist die fortschreitende Schädigung eines Werkstoffs bei wiederholter zyklischer Belastung [9]. Selbst wenn ein Material weit unterhalb der Elastizitätsgrenze belastet wird, kommt es unter den Bedingungen einer kontinuierlichen zyklischen Belastung zu mikroskopischen Schäden. Diese Mikroschäden akkumulieren sich im gesamten Material und können stetig zu Makrorissen anwachsen, die zum Reißen einzelner Fasern führen, was dann zum Versagen des Materials führt.

Derzeit werden Tanks großzügig dimensioniert, was zu erhöhtem Materialeinsatz, Kosten und Gewicht führt. Die Auslegung von 700 bar Drucktanks basiert auf 11.000 Betankungszyklen unter Berücksichtigung einer Lebensdauer von 15 Jahren, was ca. 3,3 Millionen km bei einer Reichweite von 300 km pro Tankfüllung entspricht. Die Fahrzeuge (Pkws) selbst sind meist nur für 200.000 km ausgelegt.

Derzeit wird die strukturelle Integrität des Wasserstoffspeichers alle zwei Jahre visuell überprüft. Die Beurteilung äußerer Schäden ist subjektiv und lässt keine Rückschlüsse auf den Zustand des dickwandigen Tanks zu. Eine konservative Bewertung der Schäden führt zum Austausch intakter Behälter, während eine Unterschätzung der Schäden zu einem unzulässigen Versagen der Struktur führen kann.

Mit neuen technischen Ansätzen können die Tanks mit dem Verfahren der Acoustic Emission überwacht werden, die die Geräusche registriert, die beim Reißen einzelner Fasern entstehen. Diese Technologie wird im Rahmen des HyMon-Projekts von Fraunhofer untersucht und

weiterentwickelt. Kostengünstige Sensoren (Abbildung 105) werden eingesetzt, um die Sicherheit von Wasserstoffdrucktanks durch On-Board-Monitoring zu erhöhen sowie unnötigen Tankwechsel zu vermeiden und die Qualität zu sichern.

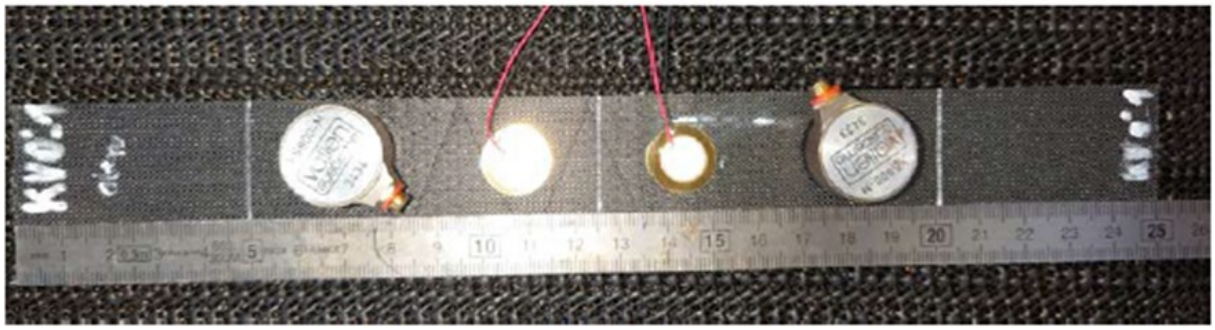


Abbildung 105: Im HyMon-Projekt eingesetzte Sensoren zur Erkennung von Schäden in faserverstärktem Kunststoffmaterial

3.9.6 Möglichkeiten für digitale Konzepte im wasserstoffbetriebenen ÖPNV im urbanen und ländlichen Raum

Das Konzept der digitalen Überwachung und Erreichbarkeit ist ein Vorschlag zur Optimierung des wasserstoffbetriebenen öffentlichen Verkehrs. Bei diesem Konzept werden die Daten auf einer zentralen digitalen Plattform (Digital Transport Public Data Portal – DTPDP, Abbildung 106) zusammengeführt werden. Die Abkürzungen in der Abbildung werden im Folgenden erklärt.

Abbildung 106: Die wichtigsten vorgeschlagenen Komponenten des Digital Transport Public Data Portal für öffentliche Daten des digitalen Verkehrs

3.9.6.1 Einführung eines Portals für öffentliche Daten des digitalen Verkehrs

Das digitale Portal für öffentliche Verkehrsdaten stellt Schlüsselinformationen über Busbetriebsinformationen (BOI), Bushaltestelleninformationen (BSI), Ankunftsinformationen für jede Bushaltestelle (AI), Informationen über das Verkehrsunternehmen (TCI) und das Businformationssystem (BIS) bereit.

GPS-Informationen, UTM-Koordinatensystem (englisch Universal Transverse Mercator TM), Haltestellen-ID usw. dienen als Informationsquelle für Busse, Liniendienste, Busortungsdienste und Haltestellenstandorte.

3.9.6.2 Das Businformationssystem

Hierbei handelt es sich um ein fortschrittliches und innovatives Verkehrssystem, das die Bereitstellung von Informationen über die Betriebsfähigkeit von Bussen in Echtzeit ermöglicht. In einigen Volkswirtschaften wird es bereits für Wasserstofffahrzeuge eingesetzt. Hier werden GPS-Geräte in den Bussen installiert, um Daten zu sammeln, die an Verkehrsinformationszentren gesendet werden. Diese Informationen werden über Smartphone-Apps, elektronische Tafeln und Businformations-Terminals weitergegeben, die wiederum in das öffentliche Datenportal eingespeist werden, um einen Überblick über die Situation der Verkehrssysteme in der Stadt zu geben. (1) Mit diesem Ansatz hätten die Bürger Zugang zu Echtzeit-Informationen aus dem öffentlichen digitalen Verkehrsdatenportal über Spitzenzeiten, die Verfügbarkeit von Bussen usw. Auch die Fahrer hätten über eine spezielle App auf ihren Handys Informationen über die Verfügbarkeit von Tankstellen in der Nähe usw.

3.9.6.3 DTG (Digital Tacho Graph) Offenes Datenportal

Für fortgeschrittene Zwecke wie Forschung und Analyse könnte ein ähnliches Portal wie das DTG (Digital Tacho Graph) Open Data Portal genutzt werden. Die Wasserstoff-Busse würden mit einem Digitalen Fahrtenschreiber (DTG) ausgestattet. Der DTG empfängt und speichert Fahrdaten wie Fahrzeuggeschwindigkeit, Drehzahl, Bremsvorgänge, Standortinformationen, Richtungswinkel, Beschleunigung, Kilometerstand und Verkehrsunfallsituationen vom Fahrzeug über CAN-Kommunikation (Controlled Area Network). Diese Daten sind für die Busüberwachung von wesentlicher Bedeutung und bieten aussagekräftige Einblicke in die Fahrinformationen des Fahrzeugs. Außerdem können die Daten genutzt werden, um Fahrzeugoptimierungen, insbesondere Sicherheitsstandards des Wasserstoffbetankungssystems, zu optimieren.

Die Daten der DTG würden entweder über ein lokales Übertragungssystem an das Fahrtenbuchanalysesystem oder über 5G an ein lokales Cloud-System übertragen.

Die Plattform des offenen DTG-Datenportals könnte wichtige Daten enthalten und ist in Abbildung 107 dargestellt.

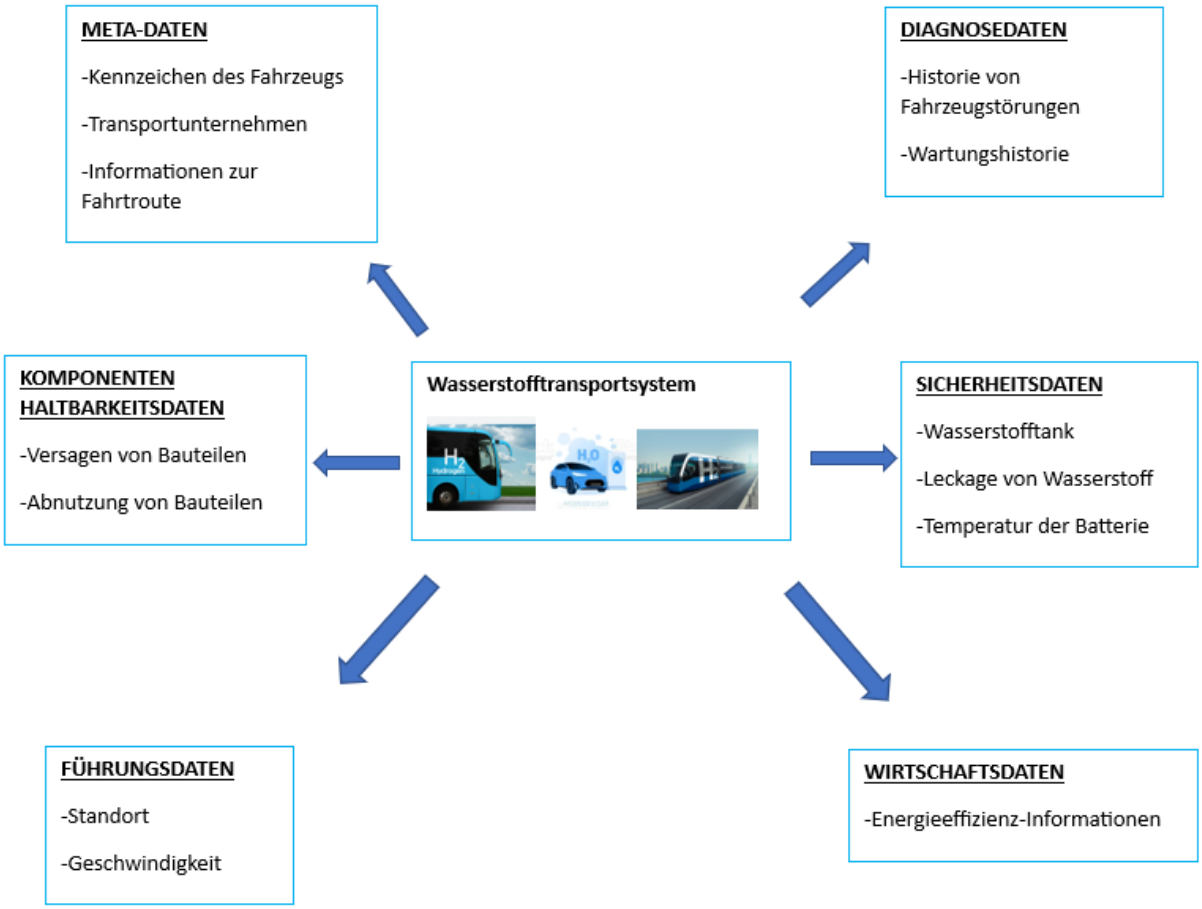


Abbildung 107: Datensammlung zur Analyse

Potenzielle Meilensteine:

- Digitale Überwachung und Optimierung: Die Bereitstellung von Echtzeitdaten würde den Nutzern und Fahrern der verschiedenen Fahrzeuge sowie den Tankstellen helfen, Informationen über die Verfügbarkeit von Fahrzeugen, Tankstellen usw. zu erhalten.
- Verbesserung von Sicherheit und Wartung: Forscher und Analysten könnten das DTG-Datenportal nutzen, um die Sicherheitsprobleme und die allmähliche Verschlechterung eines Systems zu bewerten. Dies würde dazu beitragen, unvorhergesehene Probleme zu entschärfen.
- Intelligentes Verkehrssystem: Echtzeitdaten würden es ermöglichen, das H2-Bus-Konzept über ein intelligentes Verkehrssystem rasch in das herkömmliche Verkehrssystem zu integrieren. Dies würde ein besser koordiniertes Flottenmanagement ermöglichen.
- Es wird eine spezielle Software entwickelt, die direkt mit den Daten verknüpft ist. Diese Software würde als Reiseassistent und zur Verwaltung der Auslastung eingesetzt werden. Weitere Funktionen wären der Kauf von Fahrkarten, die Verwaltung von Fahrplänen, Informationen über Spitzenzeiten usw.

Es bestehen also bereits digitale Systeme, die den wasserstoffbasierten ÖPNV im urbanen und ländlichen Raum unterstützen können und die Zugänglichkeit und Transparenz und damit auch die Akzeptanz und Nutzbarkeit deutlich verbessern können.

4 Unsere Vision für Nordhessen und darüber hinaus

Die Region Nordhessen will sich als Vorreiterregion im Bereich der Transformation des Energiesystems etablieren und daraus entscheidende Innovations-, Wachstums- und Beschäftigungspotenziale für die Zukunft entlang der gesamten Wertschöpfungskette sichern. Ein Zusammenspiel der unterschiedlichen Sektoren ist dafür ein wesentlicher Erfolgsfaktor.

Der hier in dem Bericht dargestellte Systemansatz soll in den nächsten Jahren beginnend ab heute weiter nachverfolgt werden. Das „System Energieversorgung“ im Hinblick auf das Zusammenspiel der Energieträger, Speichertechnologien, Netzinfrastruktur und der angeschlossenen Akteure soll weiterentwickelt werden. In Nordhessen gewonnene Erkenntnisse, Ergebnisse und Umsetzungsstrategien sollen für das gesamte Bundesgebiet zur Verfügung gestellt werden. Dabei muss stets der Blick auf überregionale Zusammenhänge gerichtet bleiben, sodass die entstehende (nord)hessische Wasserstoffwirtschaft auch bei Anschluss an eine überregionale Pipelineinfrastruktur noch wettbewerbsfähig ist.

Die im Rahmen von HyExperts NordH_2essen erhobenen Erzeugungspotenziale und Bedarfe können nur eine Momentaufnahme darstellen. Die Dynamik im Bereich Wasserstoffwirtschaft zeigt sich sehr rege, sowohl in der Industrie als auch in Mobilitätsanwendungen wird der Einsatz von Wasserstoff von immer mehr Akteuren erörtert. Eine heute erhobene Zahl ist am Folgetag schon nicht mehr aktuell. Nun gilt es, diese Dynamik zu nutzen um mit der anfangs betonten doppelten Dividende belohnt zu werden: Klimawandel bremsen und Schöpfung bewahren auf der einen Seite, neue und nachhaltige Geschäftsmodelle, die in die dekarbonisierte Zukunft weisen, auf der anderen.

Neben dem hier im Schwerpunkt betrachteten Mobilitätsektor ergeben sich aus den Potenzialen des chemischen Energieträgers Wasserstoff insbesondere für die Quartiersentwicklung von Wohn- und Gewerbegebieten sowie für die regionale Ausgestaltung der Transformation des Energiesystems große Potenziale, die den Wirtschaftsstandort Nordhessen insgesamt stärken und die Vorreiterrolle im Bereich der Transformation des Energiesystems an praktischen Beispielen erlebbar machen können.

Konkrete Anwendungsfälle sind die kaskadierte Verwendung von batterieelektrischen Speichern und chemischen (Wasserstoff) Speichern in Quartieren, die von regional, dezentral erzeugtem Strom aus erneuerbaren Quellen gespeist werden und nicht mehr nur in Bezug auf die Jahresenergiebilanz ein bilanzielles Plus an Energie erzeugen.

Hierbei greifen Mobilität-, Wärme- und Stromverbrauchsverhalten sektorübergreifend auf die erzeugte Energie zurück und die Wertschöpfungsketten bleiben in der Region. Die technologische Herausforderung ist vor allem der systemische Ansatz, das Zusammenwirken der einzelnen Technologiebausteine. Hier gilt es insbesondere auch die Innovationspotenziale und Fähigkeiten des Handwerks neben den Potenzialen von Industrie, Wissenschaft und Forschung zusammenzubringen.

Diesen Transformationsprozess zu koordinieren, die planerischen, genehmigungsrechtlichen, technischen und strukturellen Voraussetzungen dafür zu schaffen, wird auch Aufgabe des zu etablierenden „H_2 Futureboard Nordhessen“ sein, welches sich im Kern um die beschleunigte Etablierung einer nordhessischen Wasserstoffwirtschaft kümmern wird. Das H_2 Futureboard Nordhessen wird die Fäden der identifizierten Projekte und Lupenräume aufgreifen, die die Akteure weiter aktivieren und zur Umsetzung der Ideen beitragen.

Anhang

5 Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erläuterung
AE	Alkalische Elektrolyse
BEV	batterieelektrisches Fahrzeug (engl.: battery electric vehicle)
FCEV	Brennstoffzellenfahrzeug (engl.: fuel cell electric vehicle)
HO-BEV	rein elektrischer Hybridoberleitungs-Lkw, der abseits der Oberleitung batteriebetrieben fährt
HO-Diesel	Hybridoberleitungs-Lkw, der durch eine Oberleitung mit Strom versorgt werden kann und abseits der Oberleitung mit Diesel fährt
NF	Nutzfahrzeuge
TN	Treibhausgasneutralität

6 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Leistung der installierten Erneuerbare Energieanlagen in Nordhessen 6

Abbildung 2: Übersicht der vorhandenen Energieträger in Nordhessen 6

Abbildung 3: Installierte Windleistung (links) und Windressource in 140 m Höhe in Nordhessen (rechts), nach 7

Abbildung 4: Windenergieanlagen innerhalb von Nordhessen (Inbetriebnahme ab 1990) 9

Abbildung 5: Post-EEG-Windenergieanlagen (ab 2022 bis 2035) 9

Abbildung 6: Globalstrahlung im Jahr 2021 nach [9], eigene Elemente ergänzt 10

Abbildung 7: Min-Fall - Potenzial Freiflächen-PV auf Landwirtschaftsflächen der Klassen <1 12

Abbildung 8: Max-Fall - Potenzial Freiflächen-PV zusätzlich auf Landwirtschaftsflächen der Klassen 1 bis 3 12

Abbildung 9: Flächen entsprechend dem Regionalplan 12

Abbildung 10: Mid-Fall - Potenzial Freiflächen-PV auf nicht zugewiesenen Flächen gemäß Regionalplan 12

Abbildung 11: Volllaststunden Elektrolyseanlage (Ely) in Abhängigkeit Anteil PV- bzw. Windenergie, in Anlehnung an 19

Abbildung 12: Geordnete Jahresganglinien Wind- und PV-Erzeugung mit Elektrolyse 20

Abbildung 13: Theoretisches Wasserstoffpotenzial aus Wind und PV in Nordhessen 21

Abbildung 14: Wasserstoffhochlauf für die Regionen Fulda, Frankfurt und Ostwestfalen-Lippe 22

Abbildung 15: Potenzielle Standorte für H_2-Tankstellen im Landkreis Fulda 23

Abbildung 16: Potenzielles H_2-Tankstellennetz in Ostwestfalen-Lippe 24

Abbildung 17: Potenzielle H_2-Tankstellen im Großraum Frankfurt 24

Abbildung 18: Erzeugungsprofil Wind und Solar kombiniert 25

Abbildung 19: Erzeugungscluster Wind und Solar - Min-Fall 27

Abbildung 20: Erzeugungscluster Wind und Solar - Mid-Fall 27

Abbildung 21: Erzeugungscluster Wind und Solar - Max-Fall 27

Abbildung 22: Anzahl der Unternehmen in Nordhessen nach relevanten Wirtschaftszweigen in 2021 33

Abbildung 23: Energetischer Wasserstoffbedarf in Nordhessen nach Wirtschaftszweig und Jahr 34

Abbildung 24: Energetischer Wasserstoffbedarf in Nordhessen nach Kreis- und Wirtschaftszweig in 2030 35

Abbildung 25: Karte Nordhessens mit Standorten produzierenden Papiergewerbes 37

Abbildung 26: Karte Nordhessens mit den Standorten produzierender Unternehmen des Wirtschaftszweiges "Ernährung und Tabak" 38

Abbildung 27: Karte Nordhessens mit den Standorten produzierender Unternehmen der Gummi- und Kunststoffherstellung 39

Abbildung 28: Karte Nordhessens mit den Standorten produzierender Unternehmen des Fahrzeugbaus 40

Abbildung 29: Karte Nordhessens mit den Standorten produzierender Unternehmen der Feuerfestindustrie 41

Abbildung 30: Fahrzeugbestand im Betrachtungsgebiet Nordhessen im Jahr 2022 43

Abbildung 31: Anteil Wasserstofffahrzeuge am Fahrzeugbestand für das Szenario TN-Strom im Zeitraum 2020-2050 44

Abbildung 32: Anteil Wasserstofffahrzeuge am Fahrzeugbestand für das Szenario TN-H_2 im Zeitraum 2020 - 2050 ... 45
Abbildung 33: Wasserstoffbedarf im gesamten Betrachtungsgebiet (TN-Strom) ... 45
Abbildung 34: Wasserstoffbedarf im Straßenverkehr 2050 nach Gemeinden (TN-Strom) ... 46
Abbildung 35: Wasserstoffbedarf im gesamten Betrachtungsgebiet (TN-H_2) ... 46
Abbildung 36: Wasserstoffbedarf im Straßenverkehr 2050 nach Gemeinden (TN-H_2) ... 47
Abbildung 37: Karte der Autobahnen in Nordhessen (eigene Darstellung) ... 47
Abbildung 38: Messstellen in Nordhessen (Basiskarte mit eingezeichgneten Messpunkten von der BASt, Grenzverlauf Nordhessens nachträglich eingefügt) ... 48
Abbildung 39: Durchschnittlicher konventioneller Schwerlastverkehr 2021 [Fahrzeuge/Tag] ... 51
Abbildung 40: Heatmaps von Fahrtrichtung 1 von Messstellen im Jahr 2021, von unten: 6708 (A4), 6808 (A7), 6866 (A44) ... 52
Abbildung 41: Tagesverlauf für den 07.07.2021 an der Messstelle 6708 Richtung 1(A4) ... 53
Abbildung 42: Tagesverlauf für den 07.07.2021 an der Messstelle 6808 Richtung 1(A7) ... 53
Abbildung 43: Tagesverlauf für den 07.07.2021 an der Messstelle 6866 Richtung 1 (A44) ... 53
Abbildung 44: Durchschnittlicher wasserstoffbasierter Schwerlastverkehr nach Szenario TN-Strom in 2040 [Fahrzeuge/Tag] (Datenbasis: 2021) ... 55
Abbildung 45: Durchschnittlicher wasserstoffbasierter Schwerlastverkehr nach Szenario TN-H_2 in 2050 [Fahrzeuge/Tag] (Datenbasis: 2021) ... 56
Abbildung 46: Durchschnittliche FCEV-Schwerlastfahrzeuge nach Szenario und Jahr auf der A7 auf Basis der Szenarien TN-Strom und TN-H2 und im Vergleich zu den Messdaten von 2021 (Realität) ... 56
Abbildung 47: Allgemeines Blockschaltbild einer Kraftstoffherstellung mittels Fischer-Tropsch-Synthese ... 58
Abbildung 48: Liniennetzplan der Kurhessenbahn ... 61
Abbildung 49: Kartenauszug des Untersuchungsgebiets mit eigener Beschriftung ... 63
Abbildung 50: Basiskonzepte für Wasserstoff Tankstellen: A mit Speicher Befüllung vor Ort B: Trailer temporär integriert in die Tankstelle (LP Niederdruck, MP Mitteldruck, HP Hochdruck) ... 70
Abbildung 51: Booster Konzept für eine Wasserstoff Tankstelle ... 71
Abbildung 52: H2 Dispenser (Foto: LBST) ... 71
Abbildung 53: Wasserstoff Bedarfe in t/ a aus Kapitel 3.1.11.1. TN H2 2050 nach Postleitzahlenbereich, BASt Zählstellen mit durchschnittlichen Aufkommen von Schwerlastverkehr gemittelt je Richtung (hell unterlegte Zahlen) ... 72
Abbildung 54: Potenzielle H2 Erzeugungsmengen, die in Kapitel 3.1.9 ermittelt wurden für den Fall „max“ in t/a dargestellt für die einzelnen Postleitzahlen ... 73
Abbildung 55: Wasserstoff Tankstellen in Deutschland, Pressemeldung 01.02.2023 H2stations.org ... 74
Abbildung 56: Nordhessen mit eingezeichneten H2 Bedarfen und H2 Erzeugungspotentialen nach Postleitzahlen aus Kapitel 3.1.11.1 und 3.1.9 Die rosa unterlegten Zahlen markieren die ermittelten möglichen Standorte für Wasserstoff Tankstellen im Rahmen des NordH2essen Projekts. ... 75
Abbildung 57: Kläranlage Kassel von oben ... 82
Abbildung 58: Entwicklung der Beheizungsstruktur im Neubau ... 84
Abbildung 59: Energiedichte verschiedener Transportformen von Wasserstoff; bei Normalzustand 3 kWh/m3. ... 87

Abbildung 60: Eignung verschiedener Transportoptionen für Import, Transport und Verteilung. 88
Abbildung 61: Schematische Darstellung verschiedener Umwandlungs- und Transportmöglichkeiten von Wasserstoff..... 89
Abbildung 62: Übersichtskarte über den geplanten Ausbau des European Hydrogen Backbone..... 89
Abbildung 63: Karte der geplanten Wasserstoffnetze a) Netzentwicklungsplan Gas 2050 b) Wasserstoffbericht 2032 90
Abbildung 64: Übersichtskarte zu Kavernen und Porenspeichern in Deutschland..... 91
Abbildung 65: Überblick ausgewählter Informationen aus der Online-Umfrage 92
Abbildung 66: Übersicht des Reifegrads sowie der Sektorzuordnung kommunizierter H_2-Aktivitäten in der Region 93
Abbildung 67: Kennzahlen zu den Teilnehmenden an den weiterführenden Experteninterviews 94
Abbildung 68: Auswahl der im Rahmen des Projektes erfassten Wasserstoffprojekte in Nordhessen..... 94
Abbildung 69: Geografische Verortung interessierter Akteure aus der Industrie (basierend auf den Ergebnissen der Online-Umfrage & Experteninterviews) 95
Abbildung 70: Gegenüberstellung studienbasierter sowie im Dialog identifizierter H_2-Bedarfe aus der Industrie für das Jahr 2030 96
Abbildung 71: Geografische Übersicht der interviewten Akteure aus dem Mobilitätsbereich (Ergebnisse aus Online Umfrage & Experteninterviews) 97
Abbildung 72: Gegenüberstellung studienbasierter sowie im Dialog identifizierter H_2-Bedarfe aus der Mobilität für das Jahr 2040 98
Abbildung 73: Geplanter Trassenverlauf und benachbarte Projekte und Anknüpfungspunkte des Projektes FLOW..... 100
Abbildung 74 Fernwärmenetz und Kläranlage Kassel 103
Abbildung 75 Systembild KasselWasser 104
Abbildung 76 Systembild Lupenraum Wabern 106
Abbildung 77 Systembild Lupenraum Knallhütte..... 107
Abbildung 78 Systembild Lupenraum Volkmarsen..... 109
Abbildung 79: Schema eines intelligenten Stromnetzes mit Wasserstoff und Batterien 112
Abbildung 80: Systemsteuerungsvorgang für jeden Simulationsschritt 113
Abbildung 81: Aufbau des Simulationstools. Ci bezeichnet die i-te Systemkomponente, während COE die Kosten für Strom [€/kWh] und COH die Kosten für Wasserstoff [€/Nm3] sind 114
Abbildung 82: Systemskizze für ein Microgrid..... 115
Abbildung 83: Vorgeschlagenes Konzept für ein wasserstoffbasiertes intelligentes Stromnetz. Die gelben Pfeile zeigen den Stromfluss, die grünen Pfeile den Wasserstofffluss und der gestrichelte blaue Pfeil den Informationsfluss an 117
Abbildung 84: Konzeptionelle Daten zum periodischen Wasserstoffbedarf an einer Tankstelle..... 119
Abbildung 85: Schematische Darstellung des Simulationsablaufs 119
Abbildung 86: Deutsche Jahresmarktdaten für Day-Ahead-Strompreise für 2020 120
Abbildung 87: Simulationsergebnisse für die Steuerung der Wasserstoffproduktion in Abhängigkeit von den Strompreisen und Wasserstoffnachfrage 121
Abbildung 88: Simulationsergebnisse für die Steuerung des Wasserstoffgehalts unter Berücksichtigung der Verfügbarkeit von Windenergie..... 123
Abbildung 89: Betankung ohne Kommunikation 127

Abbildung 90: Übersicht über SAE J2799 128
Abbildung 91: Bi-direktionale Kommunikation 128
Abbildung 92: Typische Struktur eines heutigen Stromnetzes 131
Abbildung 93: Für das intelligente Stromnetz werden neue Kommunikationsmittel benötigt, insbesondere für den Netzschutz. 132
Abbildung 94: Schema eines 5G-basiertes System zur präzisen Laststeuerung 134
Abbildung 95: Übersicht über die Systemkommunikation für Sammeldienste 135
Abbildung 96: Schematische Darstellung eines Smart-Grids mit 5G-Netzwerk und IoT-Geräten 137
Abbildung 97: Systemskizze für den Anwendungsfall der automatischen Spannungsregelung, einschließlich der Zusammenarbeit zwischen ÜNB und VNB 137
Abbildung 98: Skizze des Signalbereichs des vorgeschlagenen Smart-Grid-Konzepts. Blaue Kreise kennzeichnen die Basisstationen und alle anderen Formen von Kommunikationsknoten, die durch die 5G-Architektur ermöglicht werden. Grüne und schwarze Pfeile zeigen den bidirektionalen Informationsfluss zwischen den einzelnen Schichten bzw. Komponenten an. 138
Abbildung 99: Wasserstoffspeicher 140
Abbildung 100: FMEA des gesamten Systems. 141
Abbildung 101: FMEA-Analyse der Auswirkungen eines Ventilausfalls. 142
Abbildung 102: Einfluss des Sensors auf die RPZ 142
Abbildung 103: Vergleich der Ausfälle mit und ohne Smart Sensor 143
Abbildung 104: Querschnittsmodell eines Wasserstoffdruckbehälters aus faserverstärktem Kunststoff mit nichttragender Kunststoffauskleidung. 146
Abbildung 105: Im HyMon-Projekt eingesetzte Sensoren zur Erkennung von Schäden in faserverstärktem Kunststoffmaterial 147
Abbildung 106: Die wichtigsten vorgeschlagenen Komponenten des Portals für öffentliche Daten des digitalen Verkehrs 147
Abbildung 107: Datensammlung zur Analyse 149
Abbildung 107: Erzeugungscluster Wind und Solar - Min-Fall 169
Abbildung 108: Erzeugungscluster Wind und Solar - Mid-Fall 170
Abbildung 109: Erzeugungscluster Wind und Solar - Max-Fall 170

7 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Windvorranggebiete (WVRG) in Nordhessen 7

Tabelle 2: Anzahl und Leistung möglicher Windenergieanlagen in Nordhessen auf freien Vorrangflächen 8

Tabelle 3: Nutzbare Feldkapazität landwirtschaftliche Nutzflächen 11

Tabelle 4: Theoretisches Flächenpotenzial Freiflächen-PV 13

Tabelle 5: Theoretische Leistung Freiflächen-PV in Nordhessen 13

Tabelle 6: Theoretisches Flächenpotenzial Dach-PV 14

Tabelle 7: Biomasse aus Biotonne und biologisch abbaubare Garten und Parkabfälle in Nordhessen 16

Tabelle 8: Anzahl Kläranlagen und anfallende Klärschlammmengen in Nordhessen 18

Tabelle 9: Elektrische Leistung potenzieller Anlagen Wind und PV zur Wasserstofferzeugung 20

Tabelle 10: Leistung Windenergie und H_2-Potenzial in den Clustern 28

Tabelle 11: Bewertungsmatrix der drei Betrachtungsfälle 30

Tabelle 12: Wasserbedarf der Elektrolyse in den Betrachtungsfällen 31

Tabelle 13: Auszug der Zusammenfassung der NACE-Branchen zu den betrachteten Wirtschaftszweigen - Beispiel Ernährung und Tabak (Auszug) 33

Tabelle 14: Prognostizierter Wasserstoffbedarf für die Region Nordhessen und ihre einzelnen Kreise 35

Tabelle 15 Wasserstoffbedarfsabschätzung für ausgewählte nordhessische Unternehmen aus dem Wirtschaftszweig "Papiergewerbe" 37

Tabelle 16: Wasserstoffbedarfsabschätzung für ausgewählte nordhessische Unternehmen aus dem Wirtschaftszweig "Ernährung und Tabak" 39

Tabelle 17: Wasserstoffbedarfsabschätzung für ausgewählte nordhessische Unternehmen aus dem Wirtschaftszweig "Fahrzeugbau" 41

Tabelle 18: Übersicht vielversprechender nordhessischer Unternehmen für eine potenzielle Wasserstoffabnahme 42

Tabelle 19: Kraftstoffbedarf und Jahresfahrleistung der Fahrzeuggruppen 44

Tabelle 20: Übersicht Messstellen auf Autobahnen in Nordhessen 49

Tabelle 21: Flottenzusammensetzung nach Szenarien und Jahr mit Anteil der Brennstoffzellenfahrzeuge 50

Tabelle 22: Vergleich des durchschnittlichen täglichen Schwerlastverkehrsaufkommens je Messstelle in den Jahren 2021 und 2018 54

Tabelle 23: Flugbewegungen der Jahre 2017 und 2018 aufgeschlüsselt nach Passagieren und transportierter Fracht; Öffentliche Daten des Kassel Airport 57

Tabelle 24: Flugziele vom Kassel Airport 57

Tabelle 25: Zuteilung der Kohlenwasserstoffkettenlängen zu den Fraktionen 59

Tabelle 26: Wasserstoffbedarf für die verschiedenen Szenarien 59

Tabelle 27: Linien der Kurhessenbahn 60

Tabelle 28: Ausschreibungen und Ausbaupläne für die Linien der Kurhessenbahn 62

Tabelle 29: Übersicht über die einzelnen nicht-elektrifizierten Strecken und der maximalen Distanz über nicht elektrifizierte Strecken für die Linien der Kurhessenbahn nach dem Ausbau 62

Tabelle 30: Übersicht der Ergebnisse für den Wasserstoffbedarf nach dem Ausbau für die Linien RB 4, RE/RB 97 und RB 94 64
Tabelle 31: Übersicht PKW mit Brennstoffzelle 65
Tabelle 32: Übersicht Transporter mit Brennstoffzelle 65
Tabelle 33: Übersicht LKW mit Brennstoffzelle 66
Tabelle 34: Übersicht Busse mit Brennstoffzelle 66
Tabelle 35: Übersicht Züge mit Brennstoffzelle 67
Tabelle 36: Übersicht zu Förderprogrammen 67
Tabelle 37: Einteilung der Tankstellen nach Abgabekapazität (nach H2Mobility) LNFZ =leichte Nutzfahrzeuge, MNFZ = Mittelschwerenutzfahrzeuge, SNFZ = schwere Nutzfahrzeuge 69
Tabelle 38: potenzielle Wasserstoff Tankstellen Standorte 76
Tabelle 39: Gegenüberstellung der einzelnen potenziellen Wasserstoff Tankstellen Standorte nach verschiedenen Kriterien: Grün = positiv, gelb= weniger positiv, orange= negativ bewertet (TS = Tankstelle, KP = Knotenpunkt) 80
Tabelle 40: Sauerstoffbedarfe für Klärwerke in Kassel und ganz Nordhessen sowie potenzieller Bedarf an medizinischem Sauerstoff im Vergleich zur Sauerstoffproduktion eines 57 MW-Elektrolyseurs 83
Tabelle 41: Entscheidungsmatrix für die auf Strompreis und Tanklevel basierende Simulation 121
Tabelle 42: Entscheidungsmatrix für die auf Windenergie und Tanklevel basierende Simulation 122
Tabelle 43: Risiken und Sicherheitsmerkmale von Wasserstofftankstellen 129
Tabelle 44: Theoretisches Wasserstoffpotenzial aus Wind und PV in Nordhessen 169
Tabelle 45: Anzahl Lkw zur Versorgung mit Wasserstoff aus Wind und PV in Nordhessen 169

8 Literaturverzeichnis

[1] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), 26 07 2023. [Online]. Available: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/fortschreibung-nationale-wasserstoffstrategie.html. [Zugriff am 01 08 2023].

[2] „wirtschaftsdienst," [Online]. Available: https://www.wirtschaftsdienst.eu/inhalt/jahr/2021/heft/1/beitrag/potenzial-gruener-wasserstoff-langer-weg-der-entwicklung-kurze-zeit-bis-zur-umsetzung.html#:~:text=Bereits%20heute%20werden%20rund%2055,et%20al.%2C%202020).. [Zugriff am 13 06 2023].

[3] BMWi, „Die Nationale Wasserstoffstrategie," Berlin, 2020.

[4] F. Merten, A. Scholz, C. Krüger, S. Heck, Y. Girard, M. Mecke und M. Goerge, „Bewertung der Vor- und Nachteile von Wasserstoffimporten im Vergleich zur heimischen Erzeugung - Update," Wuppertal, 2021.

[5] „BMBF," [Online]. Available: https://www.bmbf.de/bmbf/shareddocs/kurzmeldungen/de/woher-soll-der-gruene-wasserstoff-kommen.html. [Zugriff am 13 06 2023].

[6] „Projekte," cdw-Stiftung, [Online]. Available: https://www.cdw-stiftung.de/projekte/dokumentation-energiewende-nordhessen. [Zugriff am 1 Dezember 2022].

[7] [Online]. Available: https://www.marktstammdatenregister.de. [Zugriff am 1 Dezember 2022].

[8] [Online]. Available: https://www.energieland.hessen.de/windpotenzialkarten. [Zugriff am 2 Januar 2023].

[9] [Online]. Available: https://rp-kassel.hessen.de/sites/rp-kassel.hessen.de/files/2022-06/anhang-steckbriefe_kleiner.pdf. [Zugriff am 2 Januar 2023].

[10] [Online]. Available: https://windrosen.hessen.de/mapapps/resources/apps/windrosen/index.html?lang=de. [Zugriff am 2 Januar 2023].

[11] I. Lütkehus, H. Salecker und K. Adlunger, „Potenzial der Windenergie an Land," Umweltbundesamt, Juni 2013. [Online]. Available: https://bit.ly/2R5SKky.

[12] ABO Wind AG, Wiesbaden.

[13] Deutscher Wetterdienst, [Online]. Available: https://www.dwd.de/DE/leistungen/solarenergie/strahlungskarten_sum.html?nn=16102. [Zugriff am 2 Januar 2023].

[14] K. Pothoff, „Bürgerforum Energiewende Hessen," 19 Juli 2022. [Online]. Available: https://www.buergerforum-energiewende-hessen.de/PV-Nordhessen. [Zugriff am 2 Januar 2023].

[15] [Online]. Available: https://www.hlnug.de/static/medien/boden/fisbo/bs/methoden/m49.html. [Zugriff am 2 Januar 2023].

[16] [Online]. Available: https://www.hlnug.de/static/medien/boden/fisbo/bs/methoden/m182.html. [Zugriff am 2 Januar 2023].

[17] [Online]. Available: https://landesplanung.hessen.de/geodaten/regionalplaene. [Zugriff am 2 Januar 2023].

[18] [Online]. Available: https://rp-kassel.hessen.de/sites/rp-kassel.hessen.de/files/2022-06/regionalplan_nordhessen_2009_0.pdf. [Zugriff am 2 Januar 2023].

[19] [Online]. Available: https://www.pv-magazine.de/2018/12/04/hessen-gibt-ebenfalls-ackerflaechen-fuer-photovoltaik-ausschreibungen-frei. [Zugriff am 2 Januar 2023].

[20] [Online]. Available: https://www.sfv.de/artikel/mehr_flaechen_fuer_den_ausbau_der_photovoltaik. [Zugriff am 2

Januar 2023].

[21] [Online]. Available: https://www.gpm-webgis-12.de/geoapp/frames/index_ext2.php?gui_id=hessen_sod_03. [Zugriff am 2 Januar 2023].

[22] Hessisches Statisches Landesamt, Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie, „Abfallmengenbilanz des Landes Hessen für das Jahr 2021," Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, ISBN 978-3-89274-442-9, 2022.

[23] Biopower Nordwestschweiz AG, Informationsblatt, [Online]. Available: https://www.bio-power.ch/files/4GQ89DX/biogasertrag_und_co2_anteil.pdf. [Zugriff am 2 Januar 2023].

[24] Dögnitz, N. et. al., „Wasserstoff aus Biomasse," DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnütziges GmbH, 2022.

[25] [Online]. Available: http://www.iwr.de/bio/biogas/Checkliste-Biogas-Anlage.html, . [Zugriff am 2 Januar 2023].

[26] Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie, „Beseitigung von kommunalen Abwässern in Hessen," Lagebericht 2020, Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, 2020.

[27] Machbarkeitsstudie Klärschlammverwertung und Phosphorrecycling für die Region Nord-Ost-Hessen (RePhoNOH), Endbericht, Kasselwasser, Eigenbetrieb der Stadt Kassel, 2021.

[28] HyAllgäu-wirtschaftliche und regionale Gewinnung von grünem Wasserstoff, Abschlussbericht, 21 Juli 2022. [Online]. Available: https://www.hy.land/wp-content/uploads/2021/12/HyAllgäu_HyExpert-Machbarkeitsstudie_210722.pdf.

[29] EnergieAgentur.NRW GmbH, „Wasserstoff - Schlüssel zur Energiewende, Beispiele aus Nordrhein-Westfalen von der Herstellung bis zur Nutzung," 2018.

[30] H. Koenig, „Scalping up the hydrogen economy: Opportunities for renewables," Aurora Energy Reserch, Aurora Renewables Summit Berlin, 2022.

[31] [Online]. Available: https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/ZulassungsbezirkeGemeinden/zulassungsbezirke_node.html. [Zugriff am 02 Januar 2023].

[32] HYWEELS - Wasserstoffbasierter Wirtschaftsverkehr in Osthessen zur Einspeisung von Emissionen in der Logistik und im Straßenverkehr, Abschlussbericht, 30 September 2021. [Online]. Available: https://www.hy.land/wp-content/uploads/2022/03/Abschlussbericht_HyExperts_Fulda_2021-3.pdf.

[33] MH2Regio - Aus Müll wird Mobilität, Abschlussbericht, Förderkennzeichen: 03B510008, Projektkoordination Mainova AG, 2021.

[34] Pressemitteilung ABO Wind AG, [Online]. Available: https://www.abo-wind.com/de/info-center/presse/2023/2023-01-17_pm_wasserstofftankstelle.html. [Zugriff am 17 Januar 2023].

[35] Behrens, J., et al.: Wasserstoffinfrastruktur für die Region Kreis Lippe, Kreis Minden-Lübecke und Stadt Bielefeld, Feinkonzept, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, ISE, 2021.

[36] [Online]. Available: https://statistik.hessen.de/unsere-zahlen/umwelt. [Zugriff am 2 Januar 2023].

[37] Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI) und Consentec GmbH, „Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland," 2021.

[38] „Auszug aus dem Handelsregister der IHK Kassel-Marburg".

[39] eurostat, „NACE Rev. 2 – Statistische Systematik der Wirtschaftszweige in der Europäischen Gemeinschaft," 2008.

[40] Frisch, S. et al., „Prozesswärme im Marktanreizprogramm – Zwischenbericht zu Perspektivische Weiterentwicklung des Marktanreizprogramms," 2010.

[41] Franke, S. A., „Produktionsbasierte Energiemodellierung lebensmittelprozesstechnischer Anlagen," TU München, 2015.

[42] Fleiter, T. et al., „Baseline scenario of the heating and cooling demand in buildings and industry

in the 14 MSs until 2050," 2017.

[43] Smurfit Kappa, „Smurfit Kappa Wrexen Paper & Board," 2022. [Online]. Available: https://www.smurfitkappa.com/de/locations/germany/smurfit-kappa-wrexen-paper-and-board. [Zugriff am 12 09 2022].

[44] Sprick GmbH & Co., „Produkte," [Online]. Available: https://papier-sprick.de/produkte/. [Zugriff am 12 September 2022].

[45] DS Smith Paper Deutschland GmbH, „Werk Witzenhausen," 2022. [Online].

[46] Essity Operations, „Essity in Witzenhausen – Factsheet '22," 2022.

[47] N. e. al., „The future potential hydrogen demand in energy-intensive industries – a site-specific approach applied to Germany," 2022.

[48] Viehmeier GmbH & Co. KG, „Handwerk & Tradition," 2022. [Online]. Available: https://www.schwaelmer-brotladen.de/wir/handwerk-und-tradition. [Zugriff am 12 September 2022].

[49] Plukon Food Group, „Willkommen bei Plukon," 2022. [Online]. Available: https://www.plukon.de/. [Zugriff am 7 9 2022].

[50] WER-ZU-WEM, „Fleischwerk Hessengut," 2022. [Online]. Available: https://www.wer-zu-wem.de/firma/fleischwerkhessengut.html. [Zugriff am 12 September 2022].

[51] Südzucker AG, „Werk Wabern," 2022. [Online]. Available: https://www.suedzuckergroup.com/de/unternehmen/standorte/zuckerfabriken-deutschland/wabern. [Zugriff am 12 September 2022].

[52] Henkelmann GmbH & Co. KG, „Kurzprofil," 2022. [Online]. Available: https://henkelmann.de/ueber-uns/kurzprofil/. [Zugriff am 12 September 2022].

[53] U. B. GmbH, „Unsere Upländer Bauernmolkerei," 2022. [Online]. Available: https://www.bauernmolkerei.de/wir-ueber-uns/unsere-uplaender- bauernmolkerei.html. [Zugriff am 12 September 2022].

[54] M. Jochimsen, „Von Hütt bis Heimatliebe: Die vielfältige Bierlandschaft der Region," 2022. [Online]. Available: https://www.hna.de/kassel/biere-aus-region-hier-werden-nicht-nur- pils-und-weizen-gebraut-9506003.html. [Zugriff am 12 September 2022].

[55] B. Schmitt, C. Lauterbach und K. Vajen, „Branchenkonzept Solare Prozesswärme für Brauereien," 2012.

[56] W. Figge, „Upländer Bauernmolkerei plant Inbetriebnahme des Neubaus für Ende November," 2021. [Online]. Available: https://www.hna.de/lokales/frankenberg/uplaender- bauernmolkerei-in-willingen-plant-inbetriebnahme-des-neubaus-fuer-ende-november-91036036.html. [Zugriff am 7 September 2022].

[57] Continental Reifen Deutschland GmbH, „Das Continental-Werk in Korbach im Überblick," 2016. [Online]. Available: https://www.continental-reifen.de/autoreifen/ueber- continental/media-services/archiv/archiv-2016/20160608-hptc/20160608-continental-werk-in-korbach-im-ueberblick. [Zugriff am 12 September 2022].

[58] Daimler Truck AG, „Über das Mercedes-Benz Werk Kassel," 2022. [Online]. Available: https://www.daimlertruck.com/karriere/standorte/standort-detailseite-366977.html. [Zugriff am 12 September 2022].

[59] Volkswagen, „Volkswagenwerk Kassel," 2022. [Online]. Available: https://www.volkswagen-newsroom.com/de/volkswagenwerk-kassel-8026. [Zugriff am 12 September 2022].

[60] B. Haas, „Analyse der Wasserstoffsenken in Kassel und Umgebung," 2022.

[61] Daimler AG, „Aktualisierte Umwelterklärung 2020 Daimler AG Standort Kassel," 2020.

[62] Daimler AG, „Aktualisierte Umwelterklärung 2021 Daimler AG Standort Kassel," 2021.

[63] Mercedes-Benz Group AG, „Nächster Meilenstein Ambition 2039: Die globale Mercedes-Benz Lieferkette wird CO2-neutral," 2020. [Online]. Available: https://group-media.mercedes-benz.com/marsMediaSite/de/instance/ko/Naechster-Meilenstein-Ambition-2039-Die-globale-

Mercedes-Benz-Lieferkette-wird-CO2- neutral.xhtml?oid=48369319. [Zugriff am 10 Oktober 2022].

[64] Volkswagen AG, „Umwelterklärung 2019 – Standort Kassel," 2022.

[65] Atlantic Schmelztiegel GmbH, 2023. [Online]. Available: http://www.atlantic-gmbh.com/de/. [Zugriff am 14 März 2023].

[66] Aug. Grundlach KG, 2023. [Online]. Available: https://aug-gundlach.de/. [Zugriff am 14 März 2023].

[67] CONRAD LIPHARD & SÖHNE GmbH, [Online]. Available: http://www.colisit.de/. [Zugriff am 14 März 2023].

[68] VESUVIUS GmbH, 2023. [Online]. Available: https://www.vesuvius.com/en/index.html. [Zugriff am 14 März 2023].

[69] VGT-DYKO GmbH, 2023. [Online]. Available: https://vgt-dyko.com/. [Zugriff am 14 März 2023].

[70] Köhler Kalk GmbH, 2023. [Online]. Available: https://koehlerkalk.de/. [Zugriff am 14 März 2023].

[71] R. Telle, „Keramik," in *Feuerfeste Werkstoffe*, Springer, 2007.

[72] Deutsche Feuerfest Industrie e.V. (DFFI), 2023. [Online]. Available: https://www.dffi.de/feuerfest/ueberblick. [Zugriff am 14 März 2023].

[73] „KBA," 2022. [Online]. Available: https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/ZulassungsbezirkeGemeinden/zulassungsbezirke_node.html?yearFilter=2022. [Zugriff am 13 06 2023].

[74] Bundesanstalt für Straßenwesen, „Automatische Dauerzählstellen auf Autobahnen und Bundesstraßen," 2022. [Online]. Available: https://www.bast.de/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/v2-verkehrszaehlung/Verkehrszaehlung.html?nn=1817946. [Zugriff am 18 Januar 2023].

[75] Bundesanstalt für Straßenwesen, „Automatische Zählstellen 2021," 2022. [Online]. Available: https://www.bast.de/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/v2-verkehrszaehlung/Aktuell/zaehl_aktuell_node.html;jsessionid=413A611ACD7D6C72080A79F2702FF160.live21322.. [Zugriff am 18 Januar 2023].

[76] Bundesanstalt für Straßenwesen, „Automatische Zählstellen 2018," 2022. [Online]. Available: https://www.bast.de/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/v2-verkehrszaehlung/Daten/2018_1/Jawe2018.html;jsessionid=413A611ACD7D6C72080A79F2702FF160.live21322?nn=1817946. [Zugriff am 18 Januar 2023].

[77] Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, „Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland: Modul Verkehr.ch Gemeinden," 2021. [Online]. Available: https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/ZulassungsbezirkeGemeinden/zulassungsbezirke_node.html.

[78] Flughafen GmbH Kassel, „Zahlen, Daten und Fakten," 2022. [Online]. Available: https://www.kassel-airport.de/unternehmen/zahlen-daten-und-fakten/. [Zugriff am 26 September 2022].

[79] Fraport AG, „Zahlen, Daten, Fakten," 2022. [Online]. Available: https://www.fraport.com/de/konzern/ueber-uns/zahlen--daten-und-fakten1.html. [Zugriff am 27 September 2022].

[80] Janz, Markus, 2017. [Online]. Available: https://www.hna.de/lokales/hofgeismar/calden-ort74694/fotos-video-zahlen-ist-sundair-airbus-fuer-flughafen-kassel-8723733.html. [Zugriff am 26 September 2022].

[81] Haas, Michael, „Dornier Do 328-300 Jet," 2016. [Online]. Available: http://www.airplanepics.ch/Flugzeugtypen/Dornier%20Do%20328%20Jet.html. [Zugriff am 22 September 2022].

[82] Hessischer Rundflug, „Urlaubsairline Sundair bringt zweites Flugzeug nach Calden," 2022. [Online]. Available: https://www.hessenschau.de/wirtschaft/kassel-airport-urlaubsairline-

sundair-bringt-zweites-flugzeug-nach-calden,sundair-flughafen-kassel-calden-100.html. [Zugriff am 26 September 2022].

[83] D. Neu, „Kassel Airport in Calden ist noch in der Entwicklung," [Online]. Available: https://www.hna.de/lokales/hofgeismar/calden-ort74694/airport-calden-ist- noch-in-der-entwicklung-flughafen-chef-reagiert-auf-ideen-des-ihk-praesidenten-91767056.html. [Zugriff am 26 September 2022].

[84] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMUB) et al., „PtL-Roadmap: nachhaltige Strombasierte Kraftstoffe für den Luftverkehr in Deutschland," 2021.

[85] Airucate, „Warum werden Flugzeuge nie voll getankt?," [Online]. Available: https://airucate.com/warum-werden-flugzeuge-nie-voll-getankt/#:~:text=Wer%20%C3%B6fter%20mit%20seinem%20Auto,F%C3%A4llen%20ist%20der%20Tank%20voll. [Zugriff am 27 September 2022].

[86] Y. Zhou, S. Searle und N. Pavlenko, „Current and future cost of e-kerosene in the United States and Europe," 2022.

[87] A. Kollmuss und J. Lane, „Carbon Offsetting & Air Travel – Part 1: CO2-Emissions Calculations," 2008.

[88] Flughafen GmbH Kassel, „Sylt," [Online]. Available: https://www.kassel-airport.de/fluege-urlaubsangebote/sylt/. [Zugriff am 26 September 2022].

[89] Flughafen GmbH Kassel, „Usedom," [Online]. Available: https://www.kassel-airport.de/fluege-urlaubsangebote/usedom/. [Zugriff am 26 September 2022].

[90] Total Deutschland GmbH, „Produktdatenblatt JET A-1," 2016.

[91] VerticalScope Inc., „Fuel consumption table," 2022. [Online]. Available: https://www.airliners.net/forum/viewtopic.php?t=1355819. [Zugriff am 22 September 2022].

[92] FlightAware, „JetBlue 1124 – 16.09.2022," 2022. [Online]. Available: https://de.flightaware.com/live/flight/JBU1124/history/20220916/2232Z/KLAX/KJFK. [Zugriff am 22 September 2022].

[93] FlightAware, „JetBlue 1124 – 18.09.2022," 2022. [Online]. Available: https://de.flightaware.com/live/flight/JBU1124/history/20220916/2232Z/KLAX/KJFK. [Zugriff am 22 September 2022].

[94] FlightAware, „JetBlue 1124 – 19.09.2022," 2022. [Online]. Available: https://de.flightaware.com/live/flight/JBU1124/history/20220919/2232Z/KLAX/KJFK. [Zugriff am 22 September 2022].

[95] FlightAware, „JetBlue 1124 – 20.09.2022," 2022. [Online]. Available: https://de.flightaware.com/live/flight/JBU1124/history/20220920/2232Z/KLAX/KJFK. [Zugriff am 22 September 2022].

[96] D. H. König, „Techno-economic study of the storage of fluctuating renewable energy in liquid hydrocarbons. Dissertation. Universität Stuttgart," 2015.

[97] König, Baucks et al., Simulation and evaluation of a process concept for the generation of synthetic fuel from CO2 and H2. Energy (91), 2015.

[98] Deutsche Welle, „Weltweit erste Anlage für synthetisches Kerosin," 2022. [Online]. Available: https://www.dw.com/de/weltweit-erste-anlage-f%C3%BCr-synthetisches-kerosin/a-59400164. [Zugriff am 22 September 2022].

[99] DB Netze, „Infrastrukturregister," 2022. [Online]. Available: https://geovdbn.deutschebahn.com/isr. [Zugriff am 11 Juli 2022].

[100] M. Bose und A. Zörner, „Mission Hydrogen Webinar: Hydrogen for Trains," 2022.

[101] Hessisches Ministerium des Innern und für Sport, „Gesetzliche Feiertage: Feiertage in Hessen 2022," 2022. [Online]. Available: ttps://innen.hessen.de/buerger-staat/feiertage. [Zugriff am 5 Juli 2022].

[102] NVV, „Fahrplan der RB 4," 2021. [Online]. Available: https://www.kurhessenbahn.de/fahrplan/r4-

korbach-kassel. [Zugriff am 11 Juli 2022].

[103] NVV, „Fahrplan der RB/RE 97," 2021. [Online]. Available: ttps://www.kurhessenbahn.de/fahrplan/r42-marburg-brilon. [Zugriff am 11 Juli 2022].

[104] RMV, „Fahrplan der RB 94," 2021. [Online]. Available: https://www.kurhessenbahn.de/fahrplan/rb94-obere-lahntalbahn. [Zugriff am 11 Juli 2022].

[105] „Übersicht des SPNV-Wettbewerbs," [Online]. Available: https://wettbewerb.spnv-deutschland.de/. [Zugriff am 11 Juli 2022].

[106] DB RegioNetz Kurhessenbahn, „Streckennetz," 2022. [Online]. Available: https://www.kurhessenbahn.de/wir/streckennetz. [Zugriff am 11 Juli 2022].

[107] NVV, „NVV will mit Unterstützung des Landes über 100 Mio. Euro in den Eisenbahnverkehr investieren: RegioTram-System für die Zukunft sichern - Strecke Kassel – Wolfhagen elektrifizieren," 2018. [Online]. Available: https://www.nvv.de/der-nvv/aktuelles/pressemitteilung/nvv-will-mit-unterstuetzung-des-landes- ueber-100-mio-euro-in-den-eisenbahnverkehr-investieren-regiotram-system-fuer-die-zukunft-sichern-strecke-kassel-wolfhagen-elektrifizieren. [Zugriff am 5 Juli 2022].

[108] Toyota, „Mirai Modellbroschüre," 2021. [Online]. Available: https://www.toyota.de/content/dam/toyota/nmsc/germany/downloads/mirai/TOYOTA_MIRAI_MODELLBROSCHUERE_04_2021-M20500_tcm-17-2245999.pdf. [Zugriff am 14 März 2023].

[109] F. Hoberg, „Es gurgelt und summt: ADAC Test des neuen Toyota Mirai," [Online]. Available: https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/marken-modelle/toyota/toyota-mirai/. [Zugriff am 14 März 2023].

[110] Hyundai, „Preise und technische Daten," 2022. [Online]. Available: https://www.hyundai.de/hyundai.de/files/8f/8fa77d98-9f09-4920-903b-75fea4c3aeab.pdf. [Zugriff am 14 März 2023].

[111] Mercedes Benz, „Mercedes-Benz GLC F-Cell," 2023. [Online]. Available: https://www.mercedes-benz.de/passengercars/mercedes-benz-cars/models/glc/glc-f-cell/der-neue-glc-f-cell.html. [Zugriff am 14 März 2023].

[112] W. Rudschies, „Mercedes GLC F-Cell: So kam das aus für die Wasserstoff-Brennstoffzelle," 2021. [Online]. Available: https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/marken-modelle/mercedes-benz/mercedes-glc-fuel-cell/. [Zugriff am 14 März 2023].

[113] F. Greis, „BMW startet Testflotte mit Wasserstoffautos - Golem," 2023. [Online]. Available: https://www.golem.de/news/bmw-ix5-hydrogen-bmw-startet-testflotte-mit-wasserstoffautos-2302-172220.html. [Zugriff am 14 März 2023].

[114] J. Dralle, „Wie gut fährt BMWs Wasserstoff-SUV," 2023. [Online]. Available: https://www.auto-motor-und-sport.de/fahrbericht/bmw-ix5-hydrogen-test-fahrt/. [Zugriff am 14 März 2023].

[115] B. Conrad, „DHL tankt Wasserstoff," 2019. [Online]. Available: https://www.auto-motor-und-sport.de/tech-zukunft/streetscooter-h2-panel-van-brennstoffzelle/. [Zugriff am 14 März 2023].

[116] Opel, „Neuer Opel Vivaro-e HYDROGEN," 2021. [Online]. Available: https://www.opel.de/fleet/news/fuer-emissionsfreie-transporte-neuer-opel-vivaro-e-hydrogen.html. [Zugriff am 14 März 2023].

[117] Klimafreundliche Nutzfahrzeuge, „Peugeot E-Expert Hydrogen - Klimafreundliche Nutzfahrzeuge," 2023. [Online]. Available: https://www.klimafreundliche-nutzfahrzeuge.de/praxis/fahrzeugdatenbank/peugeot-e-expert-hydrogen/. [Zugriff am 14 März 2023].

[118] H2.LIVE, „PEUGEOT e-Expert Hydrogen - H2.LIVE," 2022. [Online]. Available: https://h2.live/wasserstoffautos/peugeot-e-expert-hydrogen/. [Zugriff am 14 März 2023].

[119] „Machbarkeitsstudie: HyExperts - Lastverkehr mit grünem Wasserstoff -Future Mobility," 2022. [Online]. Available: https://www.hy.land/wp-content/uploads/2022/03/abschlussbericht_hyexperts_osterholz.pdf. [Zugriff am 20 März 2023].

[120] H2energy, „Hyundai XCIENT Fuel Cell ist auf dem Weg nach Europa zur kommerziellen Nutzung

- Lieferung von Seoul nach Antwerpen - Hyundai Hydrogen Mobility," 2020. [Online]. Available: https://hyundai-hm.com/2020/07/08/worlds-first-fuel-cell-heavy-duty-truck-hyundai-xcient-fuel-cell-heads-to-europe-for-commercial-use/. [Zugriff am 14 März 2023].

[121] T. Seibt, „Mercedes GenH2 Truck Brennstoffzellen-Lkw," 2020. [Online]. Available: https://www.auto-motor-und-sport.de/neuheiten/brennstoffzellen-lkw-mercedes-benz-genh2-truck/. [Zugriff am 14 März 2023].

[122] Nikola Motor, „TRE FCEV - Pushing the Boundaries of Possibility," 2023. [Online]. Available: https://nikolamotor.com/tre-fcev/. [Zugriff am 14 März 2023].

[123] B. Conrad, U. Baumann und T. Harloff, „Nikola Tre BEV mit EU-Start," 2019. [Online]. Available: https://www.auto-motor-und-sport.de/elektroauto/nikola-tre-bev-iveco-cnh-industrial-joint-venture-elektro-lkw/. [Zugriff am 14 März 2023].

[124] Hyzon Motors, „ Hyzon HyMax Series | Zero Emission, Hydrogen-Powered Vehicle," 2023. [Online]. Available: https://www.hyzonmotors.com/vehicles/hyzon-hymax-series. [Zugriff am 14 März 2023].

[125] Klimafreundliche Nutzfahrzeuge, „HYZON HyMax-250/450," 2023. [Online]. Available: https://www.klimafreundliche-nutzfahrzeuge.de/praxis/fahrzeugdatenbank/hyzon-hymax-250-450/. [Zugriff am 14 März 14].

[126] eBusTOOL, „Brennstoffzellenbusse | Bustool," 2021. [Online]. Available: https://www.ebustool.de/antriebsformen/brennstoffzellenbusse/. [Zugriff am 20 März 2023].

[127] Caetanobus, „H2.City Gold," 2019. [Online]. Available: https://caetanobus.pt/en/buses/h2-city-gold/. [Zugriff am 14 März 2023].

[128] Solaris, „Hydrogen," 2019. [Online]. Available: https://www.solarisbus.com/de/fahrzeuge/zero-emissions/hydrogen. [Zugriff am 14 März 2023].

[129] ARTHUR BUS, 2023. [Online]. Available: https://www.arthurbus.com/. [Zugriff am 14 März 2023].

[130] A. Donath, „Arthur Bus: Brennstoffzellenbus mit 450 km Reichweite kommt noch 2022," 2022. [Online]. Available: https://www.golem.de/news/arthur-bus-brennstoffzellenbus-mit-450-km-reichweite-kommt-noch-2022-2204-164992.html. [Zugriff am 14 März 2023].

[131] wsw, „WSW_Aktuelles-Wasserstoffbus_A330_Datenblatt," [Online]. Available: https://www.wsw-online.de/fileadmin/Mobil/Dokumente/Service/WSW_Aktuelles-Wasserstoffbus_A330_Datenblatt.pdf. [Zugriff am 14 März 2023].

[132] S. Schaal, „Wuppertal erhält ersten Brennstoffzellen-Bus," 2019. [Online]. Available: https://www.electrive.net/2019/12/20/wuppertal-erhaelt-ersten-brennstoffzellen-bus/. [Zugriff am 14 März 2023].

[133] M. Jendrischik, „Verkehrswende: Wasserstoffzug von Alstom ersetzt Diesel," [Online]. Available: https://www.cleanthinking.de/alstom-h2-statt-diesel-verkehrswende-wasserstoffzug-coradia-ilint/. [Zugriff am 14 März 2023].

[134] Siemens Mobility Global, „Mireo Plus H - umweltfreundlich fahren mit Wasserstoff," 2023. [Online]. Available: https://www.mobility.siemens.com/global/de/portfolio/schiene/storys/der-mireo-plus-h-umweltfreundlich-fahren-ohne-emissionen.html. [Zugriff am 14 März 2023].

[135] Bundesministerium für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle, 2023. [Online]. Available: https://www.bafa.de/DE/Energie/Energieeffizienz/Elektromobilitaet/Neuen_Antrag_stellen/neuen_antrag_stellen_node.html. [Zugriff am 5 Mai 2023].

[136] KfW, „Investitionskredit Nachhaltige Mobilität (268/269)," 2023. [Online]. Available: https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/%C3%96ffentliche-Einrichtungen/Kommunale-Unternehmen/Energie-und-Umwelt/Nachhaltige-Mobilit%C3%A4t-(268-269)/. [Zugriff am 15 März 2023].

[137] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, „Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP) Phase II 2016 – 2026 (Marktaktivierung)," 2023. [Online]. Available: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Wasserstoff/Foerderung-National/004a-brennstoffzellen.html. [Zugriff am 15 März 2023].

[138] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, Referat Öffentlichkeitsarbeit, „Förderprogramme - Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie Phase II (NIP) – Maßnahmen der Marktaktivierung – Schwerpunkt Nachhaltige Mobilität," 2023. [Online]. Available: https://www.foerderdatenbank.de/FDB/Content/DE/Foerderprogramm/Bund/BMVI/nip-ii-nachhaltige-mobilitaet.html. [Zugriff am 15 März 2023].

[139] NOW GmbH, „Förderfinder - NOW GmbH," 2023. [Online]. Available: https://www.now-gmbh.de/foerderung/foerderfinder/?_sfm_status_fa=open&_sft_foerderprogramm=nip. [Zugriff am 16 März 2023].

[140] NOW GmbH, „Machbarkeitsstudie für Busse mit emissionsfreien Antrieben (12/2022)," 2022. [Online]. Available: https://www.now-gmbh.de/foerderung/foerderfinder/machbarkeitsstudie-fuer-busse-mit-emissionsfreien-antrieben-12-2022/. [Zugriff am 15 März 2023].

[141] PtJ, „Förderung alternativer Antriebe von Bussen im Personenverkehr - Machbarkeitsstudien," 2023. [Online]. Available: https://www.ptj.de/busfoerderung/studien. [Zugriff am 15 März 2023].

[142] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, „Richtlinie über die Förderung von leichten und schweren Nutzfahrzeugen mit alternativen, klimaschoneneden Antrieben und dazugehöriger Tank- und Ladeinfrastruktur," [Online]. Available: https://www.klimafreundliche-nutzfahrzeuge.de/wp-content/uploads/2021/08/Foerderrichtlinie.pdf. [Zugriff am 15 05 2023].

[143] *Änderung der Bekanntmachung der Richtlinie über die Förderung von leichten und schweren Nutzfahrzeugen mit alternativen, klimaschonenenden Antrieben und dazugehöriger Tank- und Ladeinfrastruktur für elektrische betriebene Nutzfahrzeuge,* 2022.

[144] Klimafreundliche Nutzfahrzeuge, „Förderung," 2023. [Online]. Available: https://www.klimafreundliche-nutzfahrzeuge.de/foerderung/. [Zugriff am 15 03 2023].

[145] Innovationsförderung Hessen, 2023. [Online]. Available: https://www.innovationsfoerderung-hessen.de/elektrobusse. [Zugriff am 16 März 2023].

[146] H2 Mobility, „Overview Hydrogen Refuelling For Heavy Duty Vehicles," 2021.

[147] Wirtschaftsregion Helmstedt GmbH, „Mitteilungen HyExpert Helmsted".

[148] Region Fulda Wirtschaftsförderungsgesellschaft mbH, „Mitteilungen HyWheels".

[149] „Mitteilungen HyExpert Wartburgkreis".

[150] DIVI Intensiv Register, „Tagesbericht vom 28.07.2022," 2022.

[151] G. Hasselmann, „Corona-Station Neustadt: "Da fließt sehr viel Geld, was am Bett nicht ankommt"," [Online]. Available: https://www.mdr.de/nachrichten/thueringen/nord-thueringen/nordhausen/lungenarzt-buerokratie-krankenhaus-covid-100.html.

[152] OECD , „Health at a Glance 2019," 2020.

[153] KASSELWASSER, „Virtuelle Klärwerksführung," 2022. [Online]. Available: https://kasselwasser.de/abwasser/klaerwerk/virtuelle-klaerwerksfuehrung. [Zugriff am 9 August 2022].

[154] HNA, „Corona im Kreis Kassel: Im Abwasser lassen sich Viren früher nachweisen," 2020. [Online]. Available: https://www.hna.de/lokales/kreis-kassel/klaeranlagen-als-alarmsystem-90002987.html. [Zugriff am 8 August 2022].

[155] K.-U. Rudolph und M. Bombeck, „Reinsauerstoffbelüftung auf kleinen Industrieklärlanlagen – Energieeinsparpotentiale und Kapazitätssteigerungen am Beispiel der Kläranlage der Fa. Emsland Frischgeflügel GmbH," 2012.

[156] S. Büttner, M. Jentsch und B. Hubner, „Sektorenkopplung im Rahmen der Energiewende – Einsatz von Elektrolysesauerstoff auf kommunalen Kläranlagen," 2018.

[157] KASSELWASSER, „Technische Daten Kläranlage Kassel," 2018. [Online]. Available: https://www.kasselwasser.de/magic/show_image.php?id=398528&download=1. [Zugriff am 29 Juli 2022].

[158] KVV, „Im Überblick 2020," 2020. [Online]. Available:

https://www.kvvks.de/fileadmin/kvvks/Dokumente/Geschaeftsberichte/2020/KVV_GB_2020_Im_UEberblick_A5.pdf. [Zugriff am 29 Juli 2022].

[159] Umweltbundesamt , „Energieeffizienz kommunaler Kläranlage," 2009.

[160] statista, „Strompreise für Gewerbe- und Industriekunden in Deutschland in den Jahren 2011 bis 2021," 2022. [Online]. Available: https://de.statista.com/statistik/daten/studie/154902/umfrage/strompreise-fuer-industrie-und-gewerbe-seit-2006/#:~:text=Ohne%20auferlegte%20Steuern%20betrug%20der,sich%20aus%20verschiedenen%20Posten%20zusammen. [Zugriff am 8 August 2022].

[161] BG BAU, „Biochemischer Sauerstoffbedarf nach 5 Tagen (BSB5)," 2022. [Online]. Available: https://www.bgbau.de/themen/sicherheit-und-gesundheit/gefahrstoffe/sicherheitsdatenblatt/biochemischer-sauerstoffbedarf-nach-5-tagen-bsb5#:~:text=Der%20biochemische%20Sauerstoffbedarf%20nach%205,aerob%20abzubauen%20(biochemische%20Oxidation). [Zugriff am 9 August 2022].

[162] enargus, „Einwohnerwert," 2022. [Online]. Available: https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/d2814-2/*/*/Einwohnerwert.html?op=Wiki.getwiki#:~:text=Der%20Einwohnerwert%20(EW)%20ist%20eine,Abw%C3%A4sser%20aus%20Privathaushalten%20und%20Gewerbe. [Zugriff am 9 August 2022].

[163] Bundesverband der Energie und Wasserwirtschaft e.V., „Die Energieversorgung," 2022.

[164] Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen, „BMWK," 19 04 2023. [Online]. Available: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2023/04/20230419-bundeskabinett-beschliesst-novelle-des-gebaeudeenergiegesetzes.html. [Zugriff am 03 05 2023].

[165] Kreditanstalt für Wiederaufbau, „Förderreport KfW Bankengruppe," 2017.

[166] Kreditanstalt für Wiederaufbau, „Förderreport KFW Bankengruppe," 2018.

[167] Kreditanstalt für Wiederaufbau, „Förderreport KfW Bankengruppe," 2019.

[168] Kreditanstalt für Wiederaufbau, „Förderreport KfW Bankengruppe," 2020.

[169] Kreditanstalt für Wiederaufbau, „Förderreport KfW Bankengruppe," 2021.

[170] Kreditanstalt für Wiederaufbau, „Förderreport KfW Bankengruppe," 2022.

[171] Wissenschaftliche Dienste des Deutschen Bundestages, „Wasserstofftoleranz der Erdgasinfrastruktur," 2022.

[172] M. J. David Bothe, „Die Rolle von Wasserstoff im Wärmemarkt," frontier economics, 2021.

[173] „Neue Weststadt," [Online]. Available: https://neue-weststadt.de/. [Zugriff am 03 05 2023].

[174] E.ON, „SmartQuart," [Online]. Available: https://smartquart.energy/. [Zugriff am 03 05 2023].

[175] Agora Energiewende, Agora Industrie, „12 Thesen zu Wasserstoff," 2022.

[176] U. Weichenhain, „Hydrogen transportation - The key to unlocking the clean hydrogen economy," Roland Berger GmbH, 2021.

[177] R. D. F. ,. W. E. Ortiz Cebolla, „Assessment of Hydrogen Delivery Options," Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2022.

[178] M. E. Reuß, „Techno-ökonomische Analyse alternativer Wasserstoffinfrastruktur," *Schriften des Forschungszentrums Jülich - Energie & Umwelt ,* Bd. 467, 2019.

[179] Nationaler Wasserstoffrat, „Wasserstofftransport," 2021.

[180] K. Ohlig, „The latest developments and outlook for hydrogen," *Advances in Cryogenic Engineering,* Bd. 1573, pp. 1311-1317, 2014.

[181] S. S. A. e. al., „A Review of The Methanol Economy: The Fuel Cell Route," *energies,* Nr. 13, p. 596, 2020.

[182] Hydrogen Council, „Path to hydrogen competitiveness - A cost perspective," 2022.

[183] B. N. A. K. S. L. S. B. T. B. E. H. M. I. R. S. S. P. M. S. V. Milella, „Potenzialbeschreibung - Wasserstofftransport über das Schienennetz," 2020.

[184] J. J. G. L. G. A. W. L. K. M. O. Rik van Rossum, „European Hydrogen Backbone - A european hydrogen infrastructure vision covering 28 countries," 2022.

[185] F. Gas, „Wasserstoffnetz 2050: Für ein klimaneutrales Deutschland," [Online]. Available: https://fnb-gas.de/wasserstoffnetz/h2-netz-2050/. [Zugriff am 05 05 2023].

[186] F. Gas, „Wasserstoffbericht," 2022.

[187] „Leitfaden Planung, Genehmigung und Betrieb von Wasserstoff-Kavernenspeichern," 2022.

[188] GASCADE Gastransport GmbH, „Flow Hydrogen," 2023. [Online]. Available: https://www.flow-hydrogen.com/. [Zugriff am 04 2023].

[189] Ferngas Netzgesellschaft mbH, „TH2ECO," [Online]. Available: https://www.th2eco.de/. [Zugriff am 04 2023].

[190] Beispiel.

[191] Mustermann, „Beispielpublikation," *Beispieljournal,* 2022.

[192] M. Reuß, „Seasonal storage and alternative carrieres: A flexible hydrogen supply chain model," *Applied Energy,* Bd. 200, pp. 290 - 302, 2017.

[193] (DFFI), Deutsche Feuerfest Industrie e.V., 2023. [Online]. Available: https://www.dffi.de/feuerfest/ueberblick. [Zugriff am 14 03 2023].

[194] „Einzelantrag stellen," 2023. [Online]. Available: https://www.bafa.de/DE/Energie/Energieeffizienz/Elektromobilitaet/Neuen_Antrag_stellen/neuen_antrag_stellen_node.html. [Zugriff am 15 März 2023].

[195] „Innovationsförderung Hessen," 2023. [Online]. Available: https://www.innovationsfoerderung-hessen.de/elektrobusse. [Zugriff am 16 März 2023].

[196] „Richtlinie über die Förderung von leichten und schweren Nutzfahrzeugen mit alternativen klimaschonenden Antrieben und dazugehöriger Tank- und Ladeinfrastruktur für elektrisch betriebene Nutzfahrzeuge (...)," 2021. [Online]. Available: https://www.klimafreundliche-nutzfahrzeuge.de/wp-content/uploads/2021/08/Foerderrichtlinie.pdf. [Zugriff am 15 März 2023].

[197] KfW, „Investitionskredit Nachhaltige Mobilität (268/269)," 2023. [Online]. Available: https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/%C3%96ffentliche-Einrichtungen/Kommunale-Unternehmen/Energie-und-Umwelt/Nachhaltige-Mobilit%C3%A4t-(268-269)/. [Zugriff am 15 März 2023].

[198] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, „Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP) Phase II 2016 – 2026 (Marktaktivierung)," 2023. [Online]. Available: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Wasserstoff/Foerderung-National/004a-brennstoffzellen.html. [Zugriff am 15 März 2023].

[199] F.-W. Speckmann, M. Weeber und K. P. Birke, „Techno-Economic Assessment of Hydrogen Usage in a Smart Grid, Employing a Staggered Optimization Algorithm," *2020 2nd International Conference on Power, Energy and Electrical Engineering (PEEE 2020),* 2020.

[200] W. J. Buttner, M. B. Post, R. Burgess und C. Rivkin, „An overview of hydrogen safety sensors and requirements," *International Journal of Hydrogen Energy,* Bd. 36, pp. 2462-2470, 2011.

[201] J. Vereš, T. Ochodek und J. Koloničný, „Safety Aspects of Hydrogen Fuelling Stations," *Chemical Engineering Transactions,* Bd. 91, pp. 49-54, 2022.

[202] R. O. Cebolla, B. Acosta, N. d. Miguel und P. Moretto, „Effect of precooled inlet gas temperature and mass flow rate on final state of charge during hydrogen vehicle refueling," *International Journal of Hydrogen Energy,* Bd. 40, p. 4698–4706, 2015.

[203] ABO-Wind, [Online]. Available: https://www.abo-wind.com/de/info-center/flaechenbesitzer-innen.html. [Zugriff am 13 Oktober 2022].

[204] Adolf, J., et al.: Shell Pkw-Szenarien bis 2040, Fakten, Trends und perspektiven für Auto-Mobilität, Shell Deutschland Oil GmbH, Hamburg, 2014.

9 Anhang

9.1 Ergänzende Tabellen und Abbildungen zu Wasserstoffpotenzialen

Tabelle 44: Theoretisches Wasserstoffpotenzial aus Wind und PV in Nordhessen

Landkreis	Wind [t/a]	PV Freiflächen			PV Dach-flächen [t/a]
		min. [t/a]	mid. [t/a]	max. [t/a]	
Hersfeld-Rotenburg	1.092	642	1.515	72.911	2.090
Kassel (Kreis)	1.638	1.553	2.167	31.597	3.629
Schwalm-Eder-Kreis	1.092	352	4.700	59.926	1.752
Waldeck-Frankenberg	1.502	552	2.806	80.229	553
Werra-Meißner-Kreis	410	789	1.072	48.245	755
Kassel	0	581	180	1.077	647
Gesamt	*5.734*	*4.468*	*12.441*	*293.985*	*9.425*

Tabelle 45: Anzahl Lkw zur Versorgung mit Wasserstoff aus Wind und PV in Nordhessen

Landkreis	Wind	PV Freiflächen			PV Dachfl.	Bestand
		min.	mid.	max.		
Hersfeld-Rotenburg	146	86	202	9.721	279	5.487
Kassel (Kreis)	218	207	289	4.213	484	9.038
Schwalm-Eder-Kreis	146	47	627	7.990	234	6.627
Waldeck-Frankenberg	200	74	374	10.697	74	6.842
Werra-Meißner-Kreis	55	105	143	6.433	101	3.809
Kassel	0	78	24	144	86	7.148
Gesamt	*765*	*596*	*1.659*	*39.198*	*1.257*	*38.951*

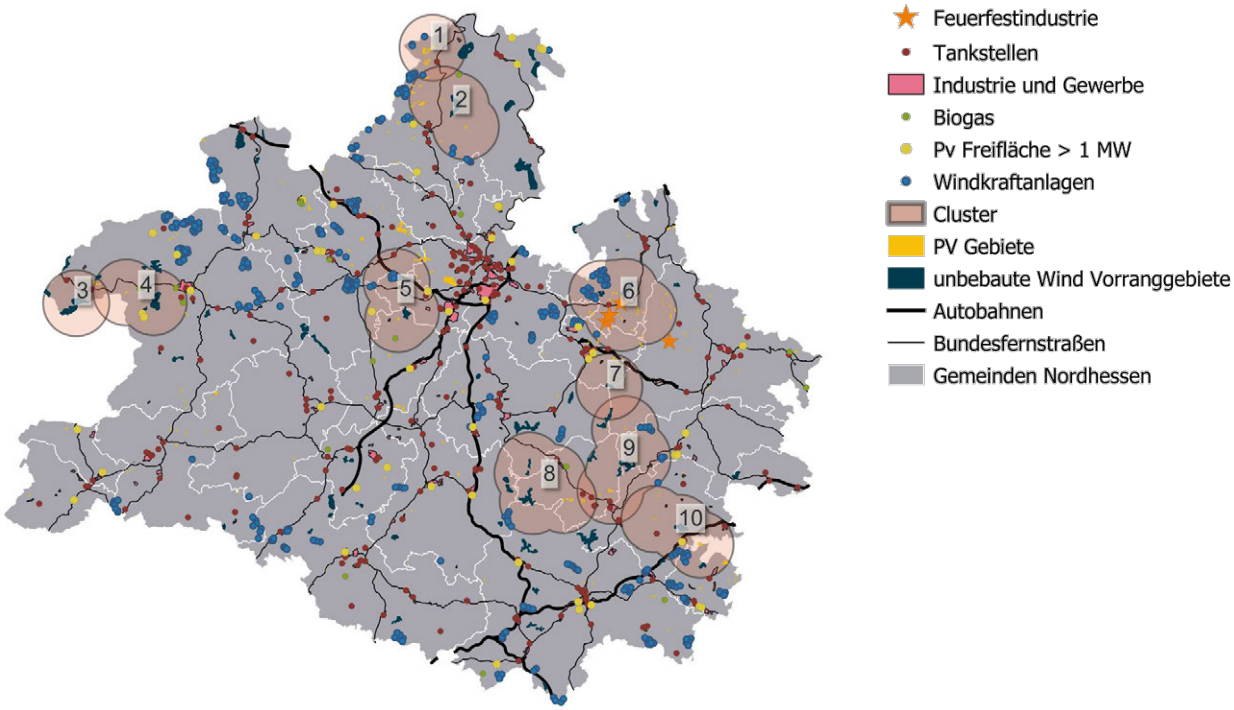


Abbildung 108: Erzeugungscluster Wind und Solar - Min-Fall

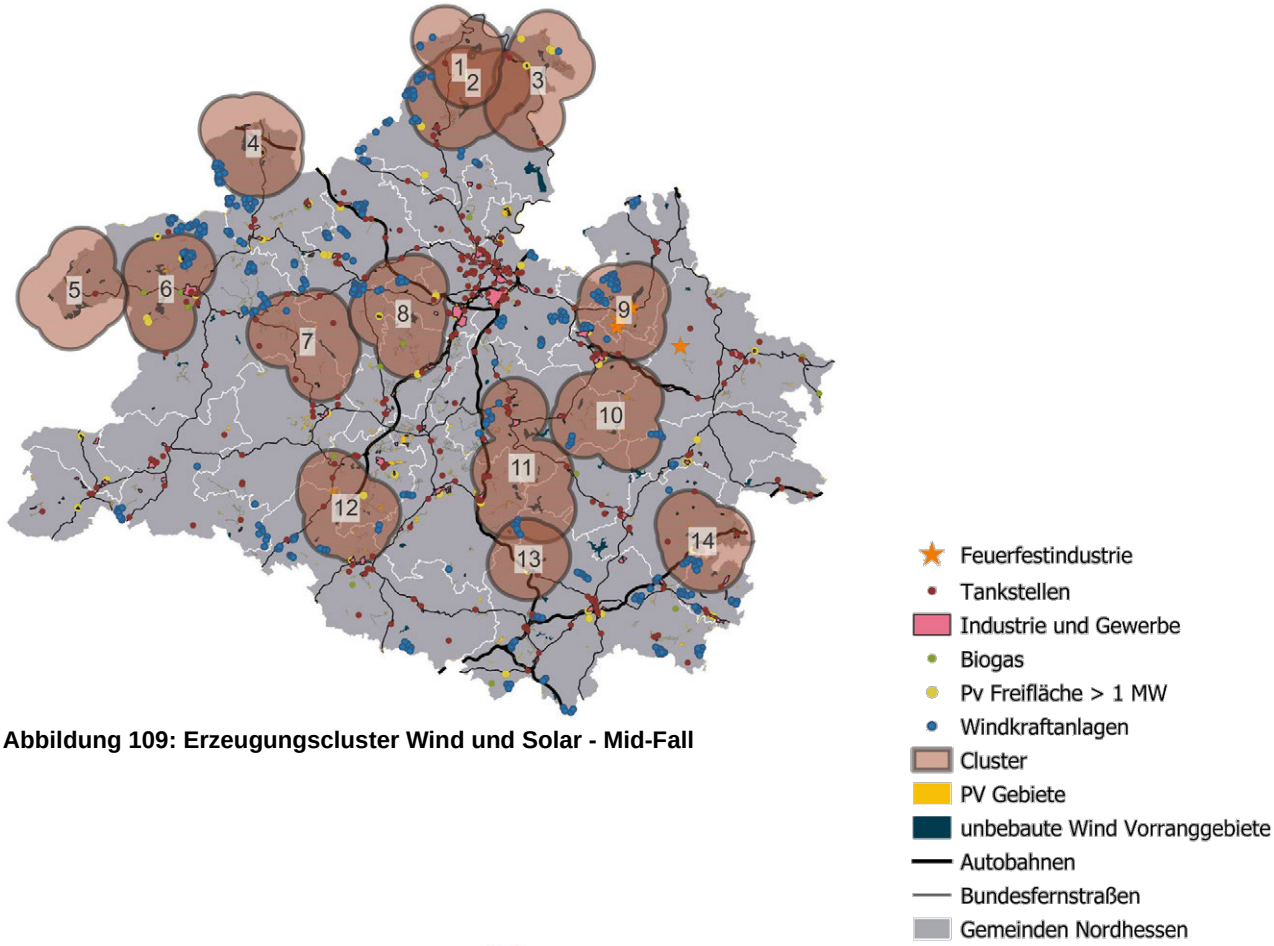


Abbildung 109: Erzeugungscluster Wind und Solar - Mid-Fall

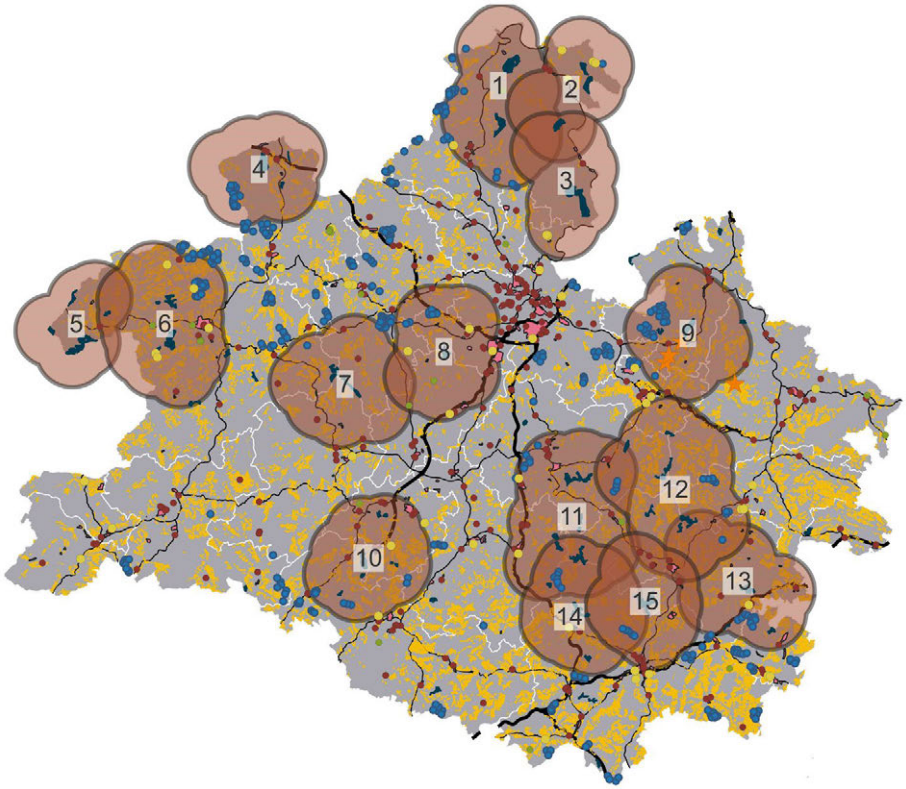


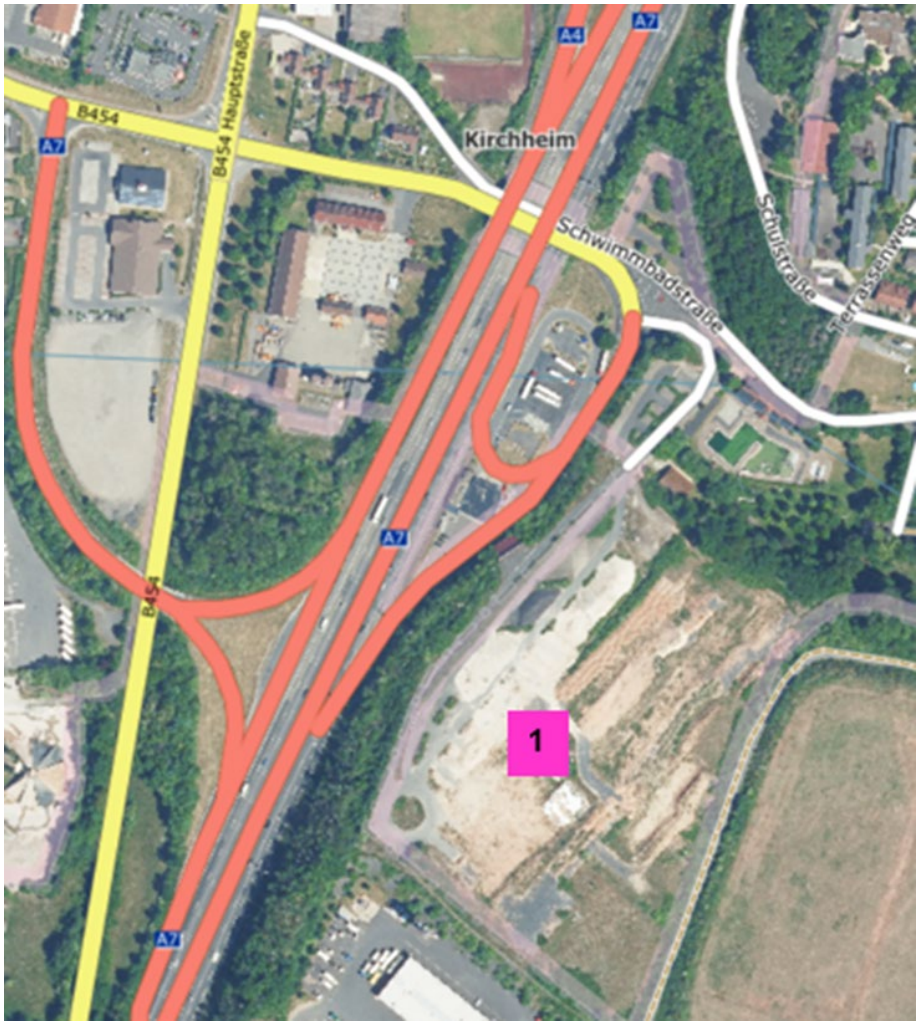
Abbildung 110: Erzeugungscluster Wind und Solar - Max-Fall

9.2 Beschreibung der ermittelten Tankstellenstandorte mit Bildmaterial

Hinweis: Alle folgenden Bilder sind dem Geoportal Hessen www.geoportal.hessen.de entnommen und unterliegen folgender Nutzungsbedingung: Datenlizenz Deutschland - Zero - Version 2.0

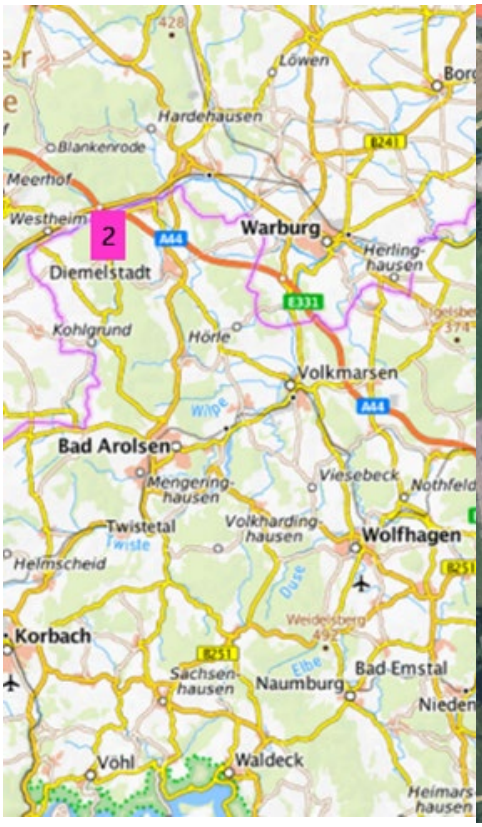
Standort 1: Kirchheim

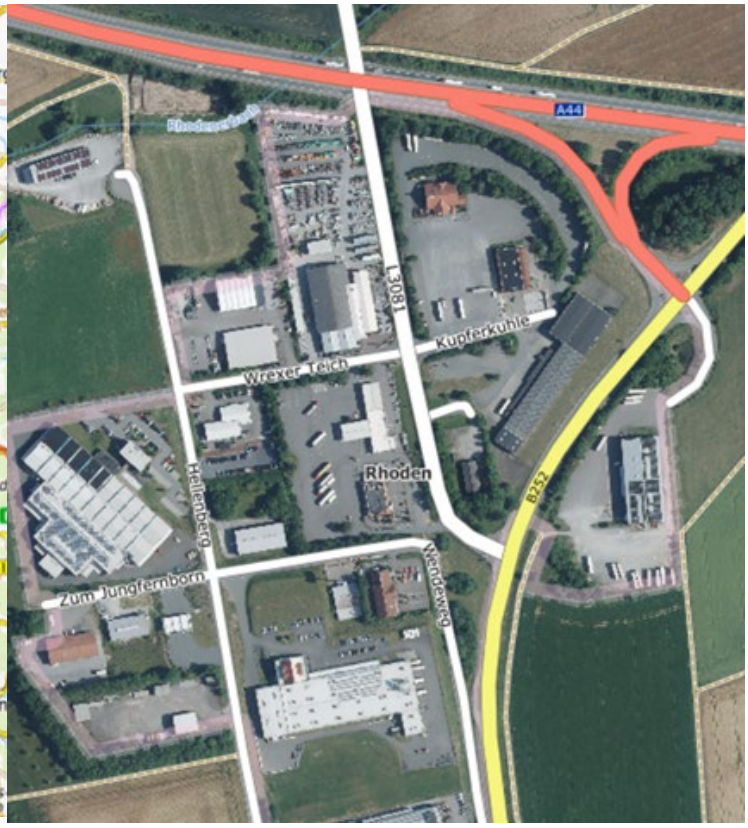
Ort	Kreuzung A4 / A7
Adresse	Motelstraße, 36275 Kirchheim
Entfernung zu Kassel in km	
Verbindung zu Bereich hoher Bedarf	innerhalb
Verbindung zu Bereich Cluster max	erreichbar in ca. 20 km
Strategisches Merkmal	Knotenpunkt, an Autobahn
Konventionelle Tankinfrastruktur vorhanden	nein
Industrie/Gewerbe umliegend	Logistik Kühne + Nagel und logit.syncreon, MAN Truck & Bus Service Kirchheim angrenzend (jedoch keine direkte Zufahrt möglich)
Platzverhältnisse	gut
Besonderheit	Wasserstoff Tankstelle für Pkw in der Nähe (Luftlinie 600m); Eigentümer Autohaus Schade würde gerne Standort für H2 TS bereitstellen; H2 Tankstelle für Pkw in der Nähe



Standort 2: Diemelstadt

Ort	Kreuzung A44 / B252 Ausfahrt Diemelstadt
Adresse	Wrexer Teich 1, 34474 Diemelstadt
Entfernung zu Kassel in km	50
Verbindung zu Bereich hoher Bedarf	innerhalb
Verbindung zu Bereich Cluster max	innerhalb
Strategisches Merkmal	Knotenpunkt; an Autobahn, liegt zwischen H2 TS Dortmund / Kamen und Kassel
Konventionelle Tankinfrastruktur vorhanden	Total Autohof Diemelstadt Wrexer Teich 1, 34474 Diemelstadt (51.489 9.006) Tankpool24 Dieselkraftstoff 24/7 Hellenberg 22, 34474 Diemelstadt (51,48742 9,00521) tankpool24.eu Tel 0800 3776532
Industrie/Gewerbe umliegend	hewe Fensterbau, Metallbau Jäkel GmbH & Co, Werk für Verpackungen Prima Welle (in 3 km)
Platzverhältnisse	gut
Besonderheit	Infrastruktur bereits vorhanden, H2 könnte in konventionelle Tankstelle integriert werden



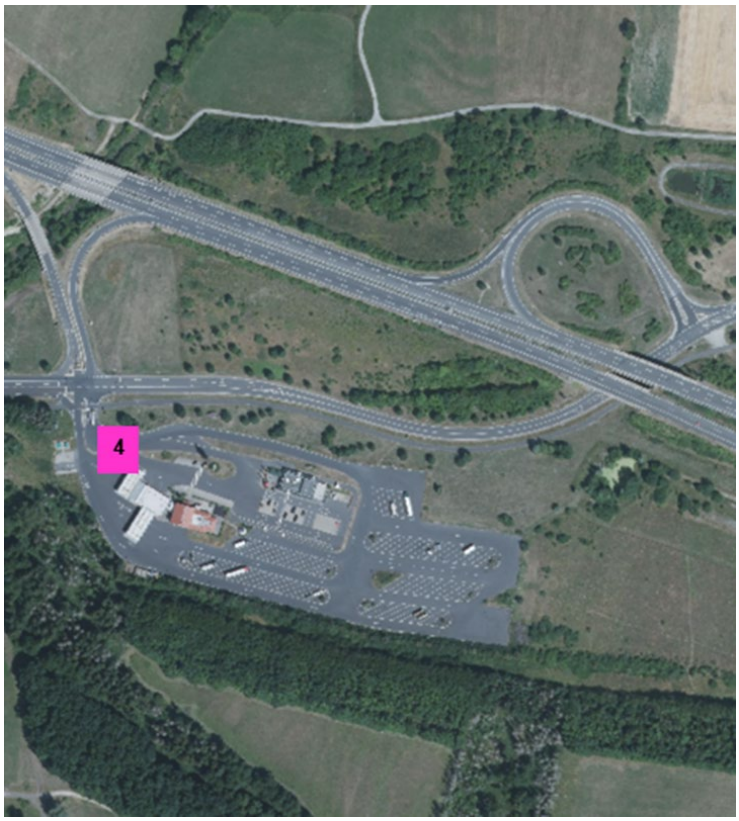


Standort 3: Knüllwald

Ort	Kreuzung A7 / B323, Ausfahrt Homberg
Adresse	Schilfwiese 1, 34593 Knüllwald
Entfernung zu Kassel in km	42
Verbindung zu Bereich hoher Bedarf	innerhalb
Verbindung zu Bereich Cluster max	Erreichbar in ca. 20 km
Strategisches Merkmal	Knotenpunkt, an Autobahn
Konventionelle Tankinfrastruktur vorhanden	24-Agip Autohof Homberg, Schilfwiese 1, 34593 Knüllwald 24-autohof.de Tankpool24
Industrie/Gewerbe umliegend	Speditionen elvis AG und Pallettways, Lager des Systembauteilehersteller Goldbeck, 8 km entfernt CTL Cargo Trans Logistik AG
Platzverhältnisse	gut
Besonderheit	Infrastruktur bereits vorhanden, H2 könnte in konventionelle Tankstelle integriert werden

Standort 4: Hessisch Lichtenau

Ort	Kreuzung B487 / A44, Ausfahrt Hessisch Lichtenau Mitte
Adresse	Leipziger Str. 201, 37235 Hessisch Lichtenau
Entfernung zu Kassel in km	27
Verbindung zu Bereich hoher Bedarf	innerhalb
Verbindung zu Bereich Cluster max	Erreichbar in ca. 30 km
Strategisches Merkmal	Knotenpunkt, an Autobahn; Verbindung zu H2 Tankstelle in Erfurt
Konventionelle Tankinfrastruktur vorhanden	SVG Autohof Werra Meißner Rast, Aral Tankstelle Leipziger Str. 201, 37235 Hessisch Lichtenau (51.198, 9.746) tankstelle.aral.de Tel: 05602 914088
Industrie/Gewerbe umliegend	Pressler Logistik, Fröhlich Internationale Transporte, Richter Industrie GmbH & Co, FORMAT Tresorbau GmbH & Co KG, Busunternehmen Frölich
Platzverhältnisse	gut
Besonderheit	Infrastruktur bereits vorhanden, H2 könnte in konventionelle Tankstelle integriert werden; Busunternehmen Frölich hat Förderantrag für 5 H2 Busse gestellt



Standort 5: Frankenberg

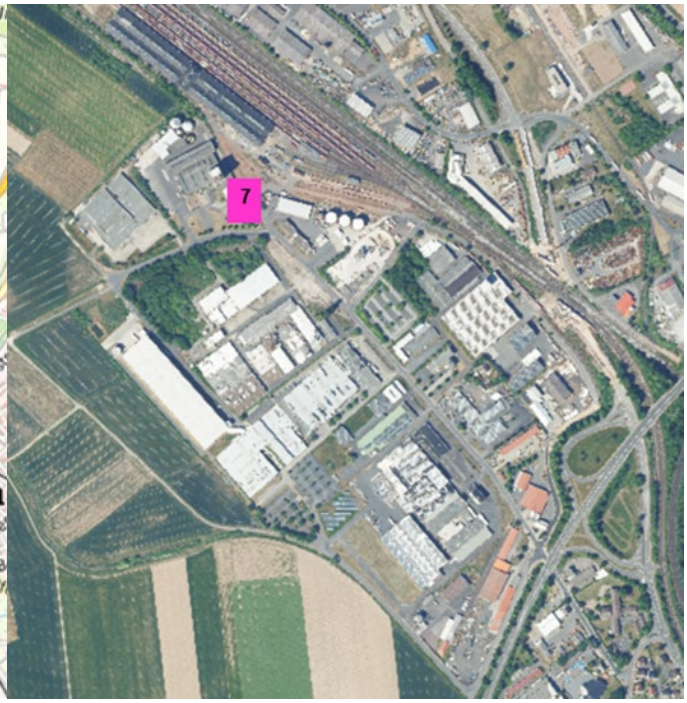
Ort	Kreuzung B263 / B252 Frankenberg
Adresse	Noch zu finden, 35066 Frankenberg
Entfernung zu Kassel in km	72
Verbindung zu Bereich hoher Bedarf	innerhalb
Verbindung zu Bereich Cluster max	Erreichbar in ca. 35 km
Strategisches Merkmal	Knotenpunkt; liegt in der Mitte zwischen H2 TS Siegen und Kassel
Konventionelle Tankinfrastruktur vorhanden	nein
Industrie/Gewerbe umliegend	Fertighaus Finger, Viessman Werke (in 8 km)
Platzverhältnisse	geeigneter Standort innerhalb des Bereichs muss noch gefunden werden
Besonderheit	obwohl eine hohe Zulassungszahl an Sattelzugmaschinen in diesem PLZ Bereich besteht, sind nur wenig große Betriebe ansässig; es besteht keine Infrastruktur wie Autohof in der Nähe; Notwendigkeit hängt auch vom örtlichen Bedarf ab

Standort 6: Korbach

Ort	34497 Korbach
Adresse	Noch zu finden, evtl.: Truck Parking Continental, Nordring 33 Raiffeisen Tankstelle, Raiffeisenstraße 20
Entfernung zu Kassel in km	56
Verbindung zu Bereich hoher Bedarf	innerhalb
Verbindung zu Bereich Cluster max	innerhalb
Strategisches Merkmal	Knotenpunkt B252 / B251, ergäbe Route H2 TS Siegen, Frankenberg (Nr. 5), Korbach, Diemelstadt (Nr. 2)
Konventionelle Tankinfrastruktur vorhanden	ja, aber nur mehrere kleine Tankstellen,
Industrie/Gewerbe umliegend	Continental Werk, mauser einrichtungssysteme GmbH & Co. KG, Weidemann GmbH Produktionswerk, mehrere Logistikunternehmen (Brass Transport Logistics, Contrans Logistics)
Platzverhältnisse	bei beiden Vorschlägen ausreichend
Besonderheit	obwohl eine hohe Zulassungszahl an Sattelzugmaschinen in diesem PLZ-Bereich besteht, und viele große Betriebe ansässig sind, besteht keine öffentliche Lkw Tankinfrastruktur (Autohof) in der Nähe; Notwendigkeit hängt primär vom örtlichen Bedarf ab

Standort 7: Bebra

Ort	36179 Bebra
Adresse	Evtl. Robert-Bunsen-Straße
Entfernung zu Kassel in km	62
Verbindung zu Bereich hoher Bedarf	innerhalb
Verbindung zu Bereich Cluster max	innerhalb
Strategisches Merkmal	Liegt nah an A4, Knoten B27 / B83
Konventionelle Tankinfrastruktur vorhanden	ja, wohl für Lkw geeignet: Raiffeisen Tankstelle Robert-Bunsen-Straße 23 Guenther Oil Robert-Bunsen-Straße 16-18
Industrie/Gewerbe umliegend	Rodolph Automotive Logistik, KRUG Logistik GmbH K+S, Vitesco Technologies, Hilti Deutschland
Platzverhältnisse	beide Tankstellen könnten über ausreichend Platz verfügen
Besonderheit	Notwendigkeit hängt primär vom örtlichen Bedarf ab



Standort 8: Hofgeismar

Ort	Hofgeismar, Anschluss B83
Adresse	Grebensteiner Straße, 34369 Hofgeismar
Entfernung zu Kassel in km	24
Verbindung zu Bereich hoher Bedarf	innerhalb
Verbindung zu Bereich Cluster max	innerhalb
Strategisches Merkmal	an der B83, einziger Standort im Norden von Kassel
Konventionelle Tankinfrastruktur vorhanden	Aral Tankstelle Grebensteiner Straße
Industrie/Gewerbe umliegend	AKG Gruppe
Platzverhältnisse	ausreichend
Besonderheit	relativ hohe Zahl von Sattelzügen, obwohl wenig Gewerbe und keine Logistik im Luftbild erkennbar; Notwendigkeit hängt primär vom örtlichen Bedarf ab; Akteur Sera Hydrogen GmbH in 10 km Entfernung

9.3 Steckbriefe Wasserstoff-Erzeugungstechnologien

Auf den nachfolgenden Seiten werden folgende Technologien vorgestellt:

- Chlor-Alkali-Elektrolyse
- Alkalische Elektrolyse
- PEM-Elektrolyse
- SOEC-Elektrolyse
- Dampfreformierung
- Biomasse Vergasung

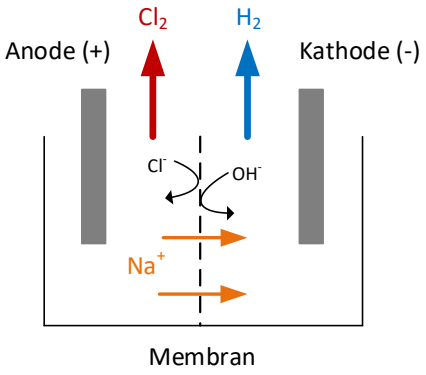
Chlor-Alkali-Elektrolyse

Die Chlor-Alkali-Elektrolyse ist der verbreitetste Prozess in der chemischen Industrie und seit über einhundert Jahren im Einsatz. Es gibt weltweit viele Anlagen im Megawatt-Bereich.

TR-Level (1-9):	9
Markrelevanz:	mäßig
Entwicklungspotenzial:	gering
Spezifische Kosten:	800 €/kW [18]
Wirkungsgrad:	40-60 % [19]
Eignung Nordhessen:	○ ○ ●

Funktionsweise

Bei der Chlor-Alkali-Elektrolyse sind Kathoden- und Anodenraum durch eine Kunststoff-Membran voneinander getrennt. Die Kathode besteht dabei aus Eisen und die Anode aus Titan oder Grafit. Zunächst wird eine Salzlösung (Sole) in Wasser gelöst und elektrolysiert. Die Membran verhindert, dass die Hydroxidionen (OH^-) zur Anode wandern und mit Chlor-Molekülen zu unerwünschten Nebenprodukten reagieren. Die Chloridionen (Cl^-) können die Membran ebenfalls nicht durchbrechen. Lediglich Natriumionen (Na^+) gelangen über die Membran zur Kathode und eine chloridfreie Natronlauge entsteht. Diese wird anschließend aus dem Kathodenraum abgezogen. Als Nebenprodukt entsteht an der Anode Chlor und an der Kathode Wasserstoff.



Entwicklungsstand

Die Technologie der Chlor-Alkali-Elektrolyse ist seit vielen Jahrzehnten etabliert und ausgereift. Aus dem hohen Stromverbrauch werden für die Energiewirtschaft die resultierenden Flexibilisierungsoptionen diskutiert.

Vorteile	Nachteile
hohe Wasserstoffqualität	Einsatz an Standorten mit Chlorverarbeitung
Anlagen im Megawatt-Bereich	hohe Empfindlichkeit der Membran, geringe Lebensdauer

Eignung Nordhessen

Da in der Region keine Chemieproduktion vorhanden ist, ist davon auszugehen, dass in Nordhessen keine Chlor-Alkali-Elektrolyseure entstehen werden.

Marktübersicht ausgewählter Hersteller [20]

Unternehmen	Leistungsaufnahme [kW]	Spez. Strombedarf [kWh/Nm³H2]	Flächenbedarf [m²]	H_2-Menge [t/a]	Chlor [t/a]	Natronlauge [t/a]	Wirkungsgrad [%]
Thyssen Krupp	k.A.	k.A.	51.000.	9.000	300.000	660.000	k.A.

[18] Energie Campus Nürnberg: Handbook Screening Wasserstoff Technik, April 2021

[19] K. Roh, L. C. Brée, K. Perrey, A. Bulan, and A. Mitsos: Flexible operation of switchable chlor-alkali electrolysis for demand side management," *Appl. Energy*, vol. 255, no. June, p. 113880, 2019, https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113880

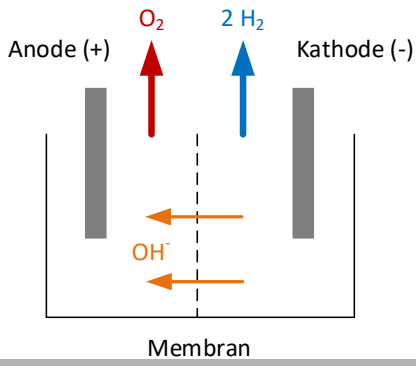
[20] Genehmigungsbescheid der Chlor-Alkali- Elektrolyse, Regierungspräsidium Darmstadt, https://rp-darmstadt.hessen.de/sites/rp-darmstadt.hessen.de/files/2022-04/akzo_aenderung_der_anlage_chloralkalielektrolyse_29.05.2013.pdf

Alkalische Elektrolyse

Nach der Chlor-Alkali-Elektrolyse ist die Alkalische Elektrolyse (AEL) ebenfalls eine fortgeschrittene Technologie. Diese zeichnet sich als bewährte Technologie im industriellen Einsatz mit hoher Stack-Lebensdauer und moderaten Investitionskosten aufgrund des Einsatzes von unkritischen Materialien aus.

TR-Level (1-9):	8-9
Markrelevanz:	hoch
Entwicklungspotenzial:	mäßig
Spezifische Kosten:	663-949 €/kW [21]
Wirkungsgrad:	63-70 % [22]
Eignung Nordhessen:	● ○ ○

Funktionsweise



Beim alkalischen Elektrolyseur wird an der Kathode Wasserstoff (H_2) und an der Anode Sauerstoff (O_2) gebildet. Dies erfolgt durch das Anlegen einer Gleichspannung von mindestens 1,5 Volt. Die Metallelektroden sind dabei in einer alkalisch-wässrigen-Lösung eingetaucht. Hierbei wird Kalilauge (Kaliumhydroxid-Lösung, KOH) als Elektrolyt mit einer Konzentration von 20 bis 40 % verwendet. Eine gasdichte Membran (Diaphragma) lässt den Transport von OH− -Ionen zu, verhindert aber gleichzeitig die Vermischung der entstehenden Gase.

Entwicklungsstand

Aufgrund des längeren industriellen Einsatzes ist die alkalische Elektrolyse als ausgereiftere Technologien einzustufen. Die aufwendigere Wartung und Systemführung und der daraus resultierende Flächenbedarf spielen für die Auswahl der Technologie eine untergeordnete Rolle.

Vorteile	Nachteile
geringe Investitionskosten	wartungsaufwand
hoher Teillastwirkungsgrad	Niedrige Leistungsdichten und etwas größere Stellfläche als PEM

AEL-Systeme werden in Modulbauweise angeboten und können miteinander gekoppelt werden, um skalierbare Systeme zu realisieren. Einen großen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der Elektrolyse haben die Investitions- und die Strombezugskosten. Daher ist das vorrangige Entwicklungsziel, den Wirkungsgrad zu erhöhen.

Eignung Nordhessen

Die Technologie ist am Markt etabliert und in großen Leistungsgrößen verfügbar. Es wurden bereits Anlagen in großem MW-Bereich realisiert und immer mehr Hersteller bieten Alkalische Elektrolyseure an. Für Nordhessen ist diese Technologie geeignet.

Marktübersicht ausgewählter Hersteller [23]

Unternehmen	Leistungsaufnahme [kW]	Spez. Strombedarf [kWh/Nm³H2]	Flächenbedarf [m²]	H_2-Drucknivau [bar]	H_2-Menge [kg/h]	H_2-Menge [Nm³/h]	Wirkungsgrad [%]
Hydrogenics (Cummins Inc.)	320-800	k.A	89,0	10	8,96	99,5	k.A.
Sunfire GmbH	4.192-10.481	4,7	450,0	30	200,7	2.230	63,8
Thyssenkrupp Uhde Chlorine Engineers	1.800-18.000	4,5	k.A.	0	360,00	4.000,0	66,7

[21] Fraunhofer ISE, pv-magazine.de
[22] T. Smolinka et al.: Industrialisierung der Wasser-Elektrolyse in Deutschland: Chancen und Herausforderungen für nachhaltigen Wasserstoff für Verkehr, Strom und Wärme, 2018, G. Tjarks, PEM-Elektrolyse-Systeme zur Anwendung in Power-to-Gas Anlagen
[23] https://www.carmen-ev.de/wp-content/uploads/2022/12/Marktuebersicht-Elektrolyseure_2023-03.pdf

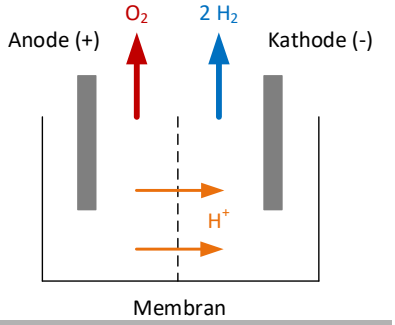
PEM-Elektrolyse

Die Polymer-Elektrolyt-Membran-Elektrolyse (PEM-Elektrolyse) zählt nach der Chlor-Alkali-Elektrolyse und der AEL zu einer aktuell technisch nutzbaren Technologie zur Wasserspaltung. Diese wird in verschiedenen Leistungsgrößen kommerziell angeboten. Da die PEM-Elektrolyse nur einen kleinen Marktanteil hat, sind die Investitionskosten höher als bei der AEL.

TR-Level (1-9):	6-8
Markrelevanz:	sehr hoch
Entwicklungspotenzial:	hoch
Spezifische Kosten:	1500-2000€/kW
Wirkungsgrad:	56-70 % [24]
Eignung Nordhessen:	● ○ ○

Funktionsweise

Dieses Verfahren arbeitet im Gegensatz zur alkalischen Elektrolyse im sauren Milieu. Die Polymerelektrolytmembran ist nur für Wasserstoff-Protonen und nicht für andere Gase durchlässig. Die Protonen (H^+) wandern von der Anode zur Kathode und werden beim Passieren der Membran gefiltert. Dadurch ist der nachfolgende Gasreinigungsaufwand geringer als bei AEL. Durch das saure Milieu kommen seltene Edelmetalle (z.B. Iridium) für die Elektroden zur Anwendung, um Korrosion zu vermeiden.



Entwicklungsstand

Bei der PEM-Elektrolyse handelt es sich um eine Technologie, deren Bau und Betrieb von größeren Sys-temen im MW-Bereich noch am Anfang steht. Vorteil der PEM-Technologie sind schnelle Kaltstartzeiten und bessere Reaktionen auf volatile Lastwechsel von Erneuerbaren Energien. Der große Nachteil ist die Verwendung von kritischen Platingruppenmetallen, allen voran von Iridium, dessen Substitution nicht abzusehen ist. Sollte ausreichend in die Technologie investiert werden, kann davon ausgegangen werden, dass diese langfristig günstiger wird. Erfahrungen aus dem langjährigen Betrieb wird zeigen, wie sich die Technologie behauptet und am Markt entwickelt.

Vorteile	Nachteile
gutes Lastwechsel- und Teillastverhalten bei schwankenden Strommengen	Höhere Investitions- und Betriebskosten ggü. AEL
geringer Flächenbedarf	Langzeitstabilität muss im MW-Maßstab nachgewiesen werden

Eignung Nordhessen

In Nordhessen sind zurzeit keine großen MW-Anlagen verfügbar. Das Verfahren ist jedoch grundsätzlich für die Region geeignet.

Marktübersicht ausgewählter Hersteller [23]

Unternehmen	Leistungsaufnahme [kW]	Spez. Strombedarf [kWh/Nm³H2]	Flächenbedarf [m²]	H_2-Drucknivau [bar]	H_2-Menge [kg/h]	H_2-Menge [Nm³/h]	Wirkungsgrad [%]
Siemens Energy	8.700	4,74	60	k.A.	165	1.835,4	63,29
Hydrogenics (Cummins Inc.).	215-5.375	4,3	k.A	30	90,00	1.000,0	69,8
ITMPower	10.070	k.A.	k.A.	20	168,75	1.875,0	k.A.
PlugPower Inc.	5.000	k.A.	120,0	40	90,00	1.000,0	k.A.

[24] M. Vos, J. Douma, and A. Van den Noort: Study on the Import of Liquid Renewable Energy: Technology Cost Assessment, DNV GL, 2020

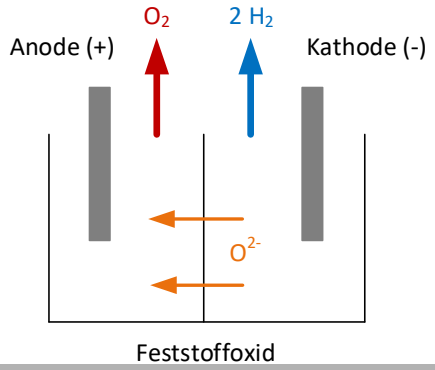
SOEC-Elektrolyse

Die Solid-Oxid-Elektrolyse (SOEC) bzw. Festoxid-Elektrolyse oder Hochtemperatur-Elektrolyse befindet sich im Übergang zwischen Labormaßstab und industrieller Anwendung. Diese Technologie zeichnet sich dabei durch Betriebstemperaturen zwischen 650 - 1.000 °C aus

TR-Level (1-9):	4-6
Markrelevanz:	mäßig
Entwicklungspotenzial:	sehr hoch
Spezifische Kosten:	3.500 €/kW
Wirkungsgrad:	60-90 % [24, 25]
Eignung Nordhessen:	○ ● ○

Funktionsweise

Die SOEC-Elektrolyse basiert auf der oxidkeramischen SOFC-Brennstoffzelle. Bei dieser Elektrolyse wird Wasserdampf als Elektrolyt verwendet. Kathodenseitig wird Wasserstoff gebildet. Der Elektrolyt besteht aus keramischen Werkstoffen. Durch diese Membran können lediglich Sauerstoffionen (O^{2-}) geleitet werden.



Entwicklungsstand

Die SOEC-Elektrolyse weist im Vergleich zu anderen Elektrolysen den geringsten Entwicklungsstand auf. Aufgrund bislang unzureichend geklärter Degradations- und Oxidationseffekte dieser Technologie, besteht noch signifikanter Forschungsbedarf. Beispielsweise müssten neue Materialien entwickelt werden, die bei den hohen Betriebstemperaturen die Lebensdauer verbessern. Die Wasserstoffreinheit ist bei diesem Verfahren aufgrund des Sauerstoffs am geringsten. Niederdruckdampf aus Geothermie oder Solaranlagen kann bei geringeren Betriebstemperaturen und damit geringerem Wirkungsgrad verwendet werden.

Vorteile	Nachteile
weniger elektr. Energie zur Spaltung des Wasserdampfs nötig als bei flüssigem Wasser	Hohe Systemkosten wegen hoher Betriebstemperaturen
sehr hohe Reinheit des Wasserstoffs (99,9 – 99,9999 %)	Reduzierte Lebensdauer aufgrund hoher Betriebstemperaturen

Eignung Nordhessen

Aufgrund des derzeitigen Entwicklungsstandes und der erforderlichen Wärmezufuhr ist die SOEC-Elektrolyse nicht für Nordhessen geeignet.

Marktübersicht ausgewählter Hersteller [23] [26]

Unternehmen	Leistungsaufnahme [kW]	Spez. Strombedarf [kWh/Nm³H2]	Flächenbedarf [m²]	H_2-Drucknivau [bar]	H_2-Menge [kg/h]	H_2-Menge [Nm³/h]	Wirkungsgrad [%]
Sunfire GmbH	135-2.475	3,3	300,0	1	67,50	750,0	90,9
TOPSOE	100.000	3,1	8.400,0	2	2.880	32.000	90,0

[25] P. R. Schmidt, W. Zittel, W. Weindorf, and T. Raksha: Renewables in Transport 2050 - Empowering a sustainable mobility future with zero emission fuels from renewable electricity, Frankfurt am Main, 2016
[26] https://www.topsoe.com/Brochures/SOEC/high-temperatureelectrolysis.pdf

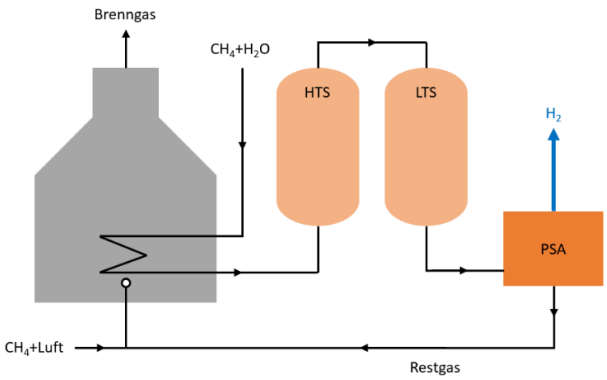
Dampfreformierung

Die Dampfreformierung ist das zurzeit bedeutendste großindustrielle Verfahren zur Herstellung von Wasserstoff aus kohlenstoffhaltigen Energieträgern und Wasser. Erdgas ist derzeit der wichtigste Rohstoff.

TR-Level (1-9):	9
Markrelevanz:	mäßig
Entwicklungspotenzial:	hoch*
Spezifische Kosten:	300 €/kW [27]
Wirkungsgrad:	83 %
Eignung Nordhessen:	● ● ○

*Angabe bezieht sich auf Dampfreformierung mit Biomethan

Funktionsweise



Bei der Dampfreformierung wird Methan (CH_4) und Wasserdampf (H_2O) bei einer Temperatur zwischen 450 und 500 °C einem Reformer zugeführt. Die benötigte Wärme wird durch Verbrennung eines Brenngases im Reformer erreicht. Der Sauerstoff, der im Wasserdampf enthalten ist, führt dazu, dass der Brennstoff oxidiert. Durch diese Oxidation entsteht Wasserstoff. Die anschließende Abtrennung des Kohlenmonoxids vom Wasserstoff erfolgt in zwei Stufen. Zuerst wird bei hohen Temperaturen 400-500 °C (Hight Temperature Shift-, HTS-Stufe) und dann bei 200-250 °C (Low Temperature Shift-, LTS-Stufe) die Wasserstoffausbeute erhöht. Zur abschließenden Reinigung des Wasserstoffs werden Druckwechseladsorbtionsanlagen (PSA) genutzt. Mit diesen können Nebenprodukte wie Kohlenmonoxid, Kohlendioxid und Methan herausgefiltert werden. Das Restgas wird wiederum zur Befeuerung des Reformers genutzt.

Entwicklungsstand

Anlagen zur Dampfreformierung fossiler Brennstoffe sind am Markt etabliert, allerdings besteht Entwicklungsbedarf bei Nutzung von Biomethan als Ausgangsstoff für die Wasserstoffherstellung. Hierfür ist eine Vereinfachung der Prozesskette für die vergleichsweise kleinen Biogas- und Biomethananlagen erforderlich. Auf die wechselnde und schwankende Gasqualität der Ausgangsstoffe muss die Regelung ebenfalls reagieren können.

Vorteile	Nachteile
Geringe Strommenge erforderlich, da notwendige Wärmezufuhr durch Teilverbrennung des Biomethans bereitgestellt werden kann	Hohe Komplexität, da mehrere aufeinanderfolgende Prozessschritte aufeinander abgestimmt sein müssen

Eignung Nordhessen

Prinzipiell ist eine Dampfreformierung mit Biogas in Nordhessen möglich. Hierfür bedarf es einer Umrüstung der vorhandenen Biogasanlagen zur Erzeugung von Biomethan.

Marktübersicht ausgewählter Hersteller [28] [29]

Unternehmen	Einsatzstoff	Anlagenkapazität [Nm³/h]	H_2-Druck [bar]	Zufuhr Erdgas [Nm³//h]	Elektr. Energie [kW]	Wirkungsgrad [%]
Mahler AGS	Erdgas, LPG, Naphtha	200 - 10.000	10 - 30	430 für 1.000 Nm³/h H_2	38 kW für 1.000 Nm³/h H_2	-
Caloric Anlagenbau GmbH	Erdgas, LPG, Naphtha	200-13.000	16	380 – 420 für 1.000 Nm³/h H_2	28 kW für 1.000 Nm³/h H_2	-

[27] Kosten und Transformationspfade für Strombasierte Energieträger, Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie, 2020
[28] https://www.mahler-ags.com/anlagen/wasserstoffanlagen-hydroform-c/
[29] Wasserstoff aus Dampfreformierung - Caloric Anlagenbau GmbH

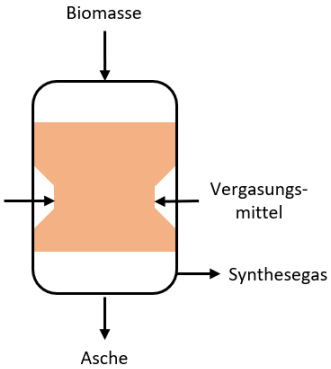
Biomasse Vergasung

Die Vergasung von Kohle ist ein etablierter Prozess, allerdings sind nach aktuellem Stand keine Vergaser für Biomasse vorhanden. Zum einen liegt dies an den hohen Vergastemperaturen von Biomasse. Zum anderen müssten die gasaufbereitungsanlagen stark vereinfacht werden für die kleineren Biomasseanlagen.

TR-Level (1-9):	5-8
Markrelevanz:	hoch
Entwicklungspotenzial:	hoch
Spezifische Kosten:	275 €/kW [30]
Wirkungsgrad:	47-68 % [31]
Eignung Nordhessen:	○ ● ○

Funktionsweise

Bei der Vergasung von Biomasse oder biogenen Zwischenprodukten spricht man auch von einer partiellen Oxidation. Das bedeutet ein Brennstoff-Luft-Gemisch wird teilweise verbrannt und es entsteht ein wasserstoffreiches Synthesegas. Hierfür sind Temperaturen von 800 °C – 1100 °C erforderlich. Während dem Prozess wird zur Biomasse Sauerstoff und Wasserdampf als Vergasungsmittel zugeführt, um zu hohe Temperaturen zu vermeiden. Der Wasserstoffgehalt wird durch dieses Vorgehen im Produktgas ebenfalls erhöht (40-50 %). Das entstandene Synthesegas muss im Anschluss gereinigt und gekühlt werden. Nach der aufwendigen Reinigung wird der Wasserstoffgehalt im Produktgas auf 99% gesteigert. Dies erfolgt katalytisch in einem Shift-Reaktor und einer CO_2-Abtrennung. Abschließend muss in einem weiteren Reinigungsschritt das Katalysatorgift CO vollständig entfernt werden.



Entwicklungsstand

Etablierte Verfahren sind die Festbettvergasung, Wirbelschichtvergasung sowie die Flugstromvergasung. Letztere wird hauptsächlich in China für die Vergasung von Kohle genutzt. Das Verfahren Vergasung von Biomasse ist zurzeit lediglich im Rahmen von Entwicklungsprojekten vorzufinden (siehe Projektbeispiele). Es gibt einige Festbettvergasungsanlagen, die auf den Betrieb mit Sauerstoff erprobt werden. In Schweden ist es bereits gelungen einen Wirbelschichtvergaser auf Sauerstoffvergasung umzustellen.

Vorteile	Nachteile
Umstellung existierender Verfahren zur Biomasse-Vergasung auf Wasserdampf-Sauerstoff-Betrieb möglich	Komplexe und kostenintensive Gasreinigungsverfahren
Prozess verläuft autotherm	Hohe Vergasungstermperaturen der Biomasse erforderlich

Eignung Nordhessen

In der Region sind Biomasseanlagen vorhanden. Diese Anlagen befinden sich allerdings noch im Pilot-/Demonstrationsstatus, es sind keine kommerziellen Anlagen verfügbar.

Projektbeispiele [31]

Unternehmen	Ort	Technologie	Status	Vergaserleistung [kW]
REPOTEC GmbH	Güssing, Österreich	Wirbelschicht-Dampf-Vergaser	Betrieb 2001-2016	k.A.
Karlsruher Institut für Technologie	Karlsruhe	Schnellpyrolyse und Flugstromvergasung	Demonstrationsanlage	5.000

[30] I. Dimitriou, H. Goldingay, and A. V Bridgwater: Technoeconomic and uncertainty analysis of Biomass to Liquid (BTL) systems for transport fuel production, Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 88, no. November 2016, pp. 160–175, 2018, https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.02.023

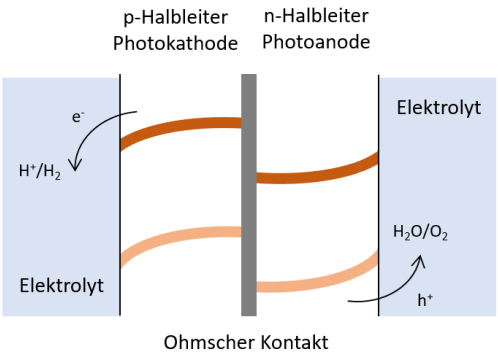
[31] DBFZ Deutsches Biomassezentrum: Wasserstoff aus Biomasse, DBFZ Report Nr.46, 2022

Photokatalytische Wasserspaltung

Die Effizienz des Verfahrens lässt sich über das Verhältnis von eingestrahlter Sonnenenergie zur produzierten nutzbaren chemischen Energie beschreiben. Da das Verfahren noch in der Entwicklung ist, sind Prognosen, ab welcher Effizienz der Prozess wirtschaftlich interessant werden könnte, noch sehr vage.

TR-Level (1-9):	3
Markrelevanz:	mäßig
Entwicklungspotenzial:	hoch
Spezifische Kosten:	-
Wirkungsgrad:	19,3 % [32]
Eignung Nordhessen:	○ ○ ●

Funktionsweise



Bei diesem Verfahren erfolgt die Wasserspaltung durch Sonnenlicht. Um ein Wasserstoffatom von einem Sauerstoffatom zu trennen, muss eine Spannung von 1,6 bis 2,4 V zwischen Anode und Kathode aufgebracht werden. Dies kann über verschiedene Zellaufbauten umgesetzt werden. Bei der p/n-Typ Photoanode/Photokathode wird ein- p-Halbleiter mit einem n-Halbleiter über einen ohmschen Kontakt verbunden. Es kommt zu einer Ladungstrennung von Elektron und Loch an der Photoanode und an der Photokathode. Durch die Bandverbiegung des p-Halbleiters kommt es dazu, dass die Elektronen an die Grenzfläche wandern und eine Reaktion von H+ zu H2 erfolgt. Die Löcher werden an die Grenzfläche zum n-Halbleiter getrieben. Dort werden diese mit den Elektronen rekombiniert. Das Loch wird für die Reaktion des H2O zu O2 verwendet. Es werden dementsprechend zwei Photonen benötigt, um ein Elektron und ein Loch für die Reaktion zu erzeugen.

Entwicklungsstand

Vorteile	Nachteile
funktioniert ohne Strom	geringe Energie- und Leistungsdichten
sehr geringe Emissionen	kostspielige Photokatalysatoren

Kommerziell ist die photokatalytische Wasserspaltung bislang nicht verfügbar. Im Jahr 2018 gelang ein Entwicklungsfortschritt für diese Technologie. Es wurde ein Wirkungsgrad von 19,3 % mit der „Dual-Junction-Tandem“-Photoelektrode erreicht. Für 2020 wurde als Meilenstein ein Wirkungsgrad von 20 % festgelegt. Im Allgemeinen besteht ein hohes Entwicklungspotenzial für die photokatalytische Wasserspaltung, wenn kostengünstigere Si/Ti/Pt-Photokathoden integriert und Ersatzmaterialien für die Edelmetallbestandteile gefunden werden. Das Verfahren verspricht eine hohe Wirtschaftlichkeit, wenn kompakte Erzeugungszentren mit Zugang zu hoher Sonnenleistung und Salzwasser errichtet werden.

Eignung Nordhessen

Da diese Technologie noch nicht kommerziell verfügbar ist, ist diese für Nordhessen nicht geeignet.

Projektbeispiel

Forschungsinstitut	Effizienz [%]	Material der Photokatalysatoren	Projektzeitraum
TU Darmstadt	9,5	Platin als Katalysatorschicht Rutheniumoxid als Gegenelektrode	2012 - 2019

[32] W. H. Cheng et al.: Monolithic Photoelectrochemical Device for Direct Water Splitting with 19% Efficiency, ACS Energy Lett., vol. 3, no. 8, pp. 1795–1800, Aug. 2018, https://doi.org/10.1021/acsenergylett.8b00920

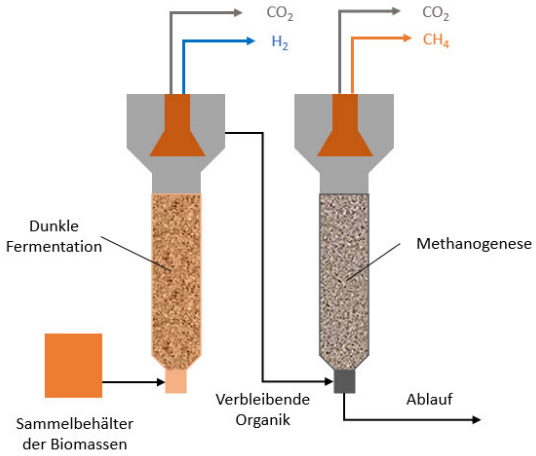
Fermentation

Die fermentative Wasserstofferzeugung hat den Vorteil, dass das Biokatalysatormaterial erneuerbar und selbstvermehrend ist. Allerdings ist die Wasserstoffausbeute sehr unterschiedlich und hängt von den Zellkulturen ab. Für eine Kommerzialisierung sollte die Ausbeute um mindestens den Faktor 10 erhöht werden.

TR-Level (1-9):	4 - 5 [31]
Markrelevanz:	hoch
Entwicklungspotenzial:	hoch
Spezifische Kosten:	-
Wirkungsgrad:	-
Eignung Nordhessen:	○ ○ ●

Funktionsweise

Bei der Fermentation wird Wasserstoff durch lebende Organismen erzeugt. Hierbei unterscheidet man zwischen lichtenergieabhängigen „hellen“ Prozessen und „dunklen“-Prozessen. Bei dem hellen Prozess wird mit Mikroalgen, unter anaeroben (ohne Sauerstoff) und schwefelarmen Bedingungen H2 produziert. Dabei wird Wasser mittels eines Photosystems I und II in Wasserstoffionen und Sauerstoff gespalten. Bei der Dunkelfermentation werden kohlenhydrathaltige Substrate aus Biomasseresten oxidiert. Dies geschieht durch spezielle Bakterienarten. Dadurch, dass kein Sauerstoff vorhanden ist, können die vorhandenen Protonen zu H2 reduziert werden.



Entwicklungsstand

Die Skalierung der „hellen“ Prozesse sowie die Anwendbarkeit sind bislang limitiert. Der Grund hierfür ist zum einen die hohe benötigte Bestrahlungsfläche der Bioreaktoren. Zum anderen sind die verwendeten Organismen empfindlich gegenüber dem Sauerstoff, der als Nebenprodukt gebildet wird. Zurzeit werden große Entwicklungsfortschritte in der Zellkonzentration, dem Reaktordesign und der Wasserstoffausbeute erzielt. Bei der Dunkelfermentation ist die Optimierung des Wasserstoffpartialdrucks möglich. Hohe H2-Partialdrücke sind nämlich ungünstig für die H2-Ausbeute. Das Potenzial bei der Dunkelfermentation kann im Allgemeinen als hoch angesehen werden, da die Kopplung an eine Reststoffbehandlung (organische Abfälle, Abwässer, Klärschlamm) möglich ist. Die fermentative, dezentrale Wasserstofferzeugung wird bereits in Multitechnologiestrategien genutzt, wie beispielsweise im Projekt HyPerFerMent des Fraunhofer IFF.

Vorteile	Nachteile
geringer externer Energieinput	niedrige Umsatzraten
nachhaltige und selbstreplizierende Katalysatoren	noch keine kommerziell relevante Skalierung

Eignung Nordhessen

Das Verfahren ist grundsätzlich durch das Biomassepotenzial für die zukünftige Wasserstofferzeugung in Nordhessen geeignet. Hierfür sind vorerst weitere Entwicklungsfortschritte erforderlich.

Projektbeispiel [31]

Forschungsinstitut	Projektziel	Projektzeitraum
Frauenhofer FF, Vorhaben HyPerFerment II	Bau einer 10 m³ großen Pilotanlage und Test unter realen Bedingungen an einer Biogasanlage	10.2020 - 09.2023

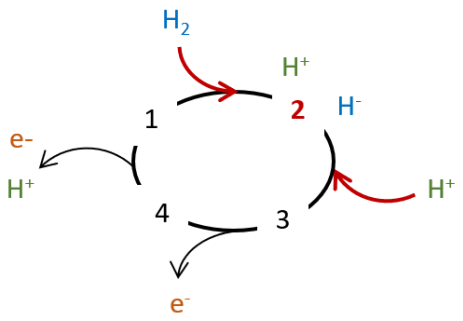
Enzymatische Wasserstofferzeugung

Dieses Verfahren befindet sich noch ganz am Anfang der Entwicklung. Die Wasserstofferzeugung durch Enzyme hat jedoch ein großes Potenzial aufgrund des geringen Landverbrauchs und Lichtunabhängigkeit.

TR-Level (1-9):	1
Markrelevanz:	mäßig
Entwicklungspotenzial:	hoch
Spezifische Kosten:	-
Wirkungsgrad:	-
Eignung Nordhessen:	○ ○ ●

Funktionsweise

Die enzymatischen Wasserstofferzeugung beschreibt die biotechnologische Herstellung von Wasserstoff. Hierbei werden durch einen Katalyseprozess Elektronen (e-) und Protonen (H+) effizient zu Wasserstoff umgesetzt. Dieser Prozess erfolgt im Zentrum der Hydrogenase (H-Cluster). Dieses H-Cluster durchläuft während des Katalyseprozesses vier Zwischenzustände. Zustand 2 ist der wichtigste Zwischenzustand. Der Wasserstoff wird hierbei ungleichmäßig in H+ und H- gespalten. Da Zustand 2 sehr instabil ist, reagiert er umgehend weiter zu zwei Elektronen und zwei Protonen. Um Zustand 2 nachzuweisen, wurde das chemische Gleichgewicht zugunsten dieses Zustands verschoben, indem die Konzentrationen des Wasserstoffs und der Protonen erhöht wurden (rote Pfeile).



Entwicklungsstand

Die Forscher sind noch dabei die Funktionsweise des Verfahrens genau zu verstehen. Dementsprechend befindet sich die Wasserstofferzeugung durch Enzyme noch in der Grundlagenforschung. Laut einigen Schätzungen ist optimistisch gesehen eine H2 Produktion von 1500 kg pro Tag in einem 80 m^3 Bioreaktor möglich. Vergleichsweise dazu wäre bei einer solarthermischen Wasserspaltung eine Landfläche von 100.000 m^2 nötig. Allerding ist die Enzymisolation aufwendig und der Katalyseprozess bislang nicht stabil. Daher ist die Kosteneffizienz des Verfahrens noch nicht absehbar.

Vorteile	Nachteile
nicht auf Sonnenlicht angewiesen	mangelnde Katalysatorstabilität
geringer Platzbedarf	teils kostenintensive Aufreinigungsschritte zur Enzymisolierung

Eignung Nordhessen

Da sich die enzymatische Wasserstofferzeugung noch in der Entwicklung befindet, ist dieses Verfahren für Nordhessen nicht geeignet. Eine mögliche Eignung müsste zu einem späteren Entwicklungsstand geprüft werden.

Projektbeispiel

Forschungsinstitut	Projektziel	Förderung	Projektzeitraum
Ruhr Universität Bochum	Experimenteller Beleg des Katalyseprinzips	Volkswagen-Stiftung (LigH2t) Deutsche Forschungsgemeinschaft Resolv (EXC1069)	2017

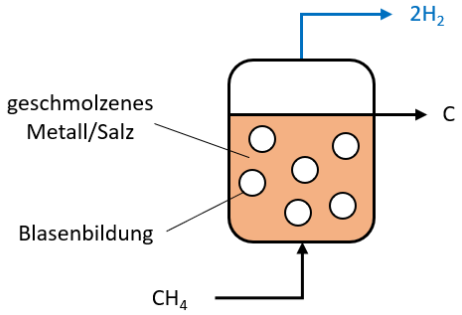
Methan-Pyrolyse

Die direkte Spaltung von Methan in Wasserstoff und Kohlenstoff wird als Methanpyrolyse bezeichnet. Dieser Prozess ist weniger verbreitet als das in Konkurrenz dazu stehende Steam Reforming. In der praktischen Umsetzung weist die Methanpyrolyse nach aktuellem Entwicklungsstand noch Effizienzpotenziale auf.

TR-Level (1-9):	3-4 [33]
Markrelevanz:	hoch
Entwicklungspotenzial:	Sehr hoch
Spezifische Kosten:	-
Wirkungsgrad:	-
Eignung Nordhessen:	○ ○ ●

Funktionsweise

Bei der Biomethan-Pyrolyse wird Methan direkt in festen Kohlenstoff und Wasserstoff gespalten. Es gibt drei verschiedene Verfahren, wie die Reaktion umgesetzt bzw. beschleunigt werden kann. Bei einem der verschiedenen thermischen Verfahren wird das Methan in einen Reaktor mit geschmolzenem Metall bzw. Salz geführt. In diesem Schmelzbad bilden sich bei Temperaturen von 900°C - 1200°C Blasen. Diese zerplatzen und der Kohlenstoff setzt sich in Pulverform über dem Schmelzbad ab. Dabei wird ebenfalls Wasserstoff freigesetzt, der aus dem Reaktor abgezogen wird. Beim katalytischen Verfahren erfolgt die Spaltung an Nickel bei Temperaturen ab 500 °C. Bei der Plasma-Spaltung werden in der Plasma-Fackel Temperaturen bis 2000 °C erreicht.



Entwicklungsstand

Vorteile	Nachteile
fester Kohlenstoff als Nebenprodukt oder für CCS	Entsorgung des festen Kohlenstoffs erforderlich

Von den drei oben genannten Prozessen ist das plasmabasierte Verfahren am weitesten entwickelt. Aktuell entwickelt die BASF mit weiteren universitären Partnern ein Verfahren zur Methanpyrolyse in neuartigen chemischen Reaktoren. Diese Entwicklung wird vom BMBF mit 9 Mio. € gefördert. Der in dem Me^2H_2-Projekt zu entwickelndem Katalysator stellt aufgrund der erforderlichen Stabilität sowie der Langlebigkeit eine Herausforderung dar. Als Ausgangsstoff wird hierbei fossiles Erdgas genutzt, allerdings könnte auch Biogas verwendet werden.

Eignung Nordhessen

Die Anlagen sind bislang auf Erdgasbasis erprobt. Da die Biomethan-Pyrolyse noch in der Forschung ist, ist diese nicht für Nordhessen geeignet.

Projektbeispiele

Unternehmen	Ort	Technologie	Status	H_2-Produktion [t/a]
Monolith Materials Olive Creek 1/2	Nebraska, USA	Thermisches Plasma	Inbetriebnahme (OC 1) Baubeginn 2021 (OC 2)	50.000
Hazer Commercial Demonstration Plant	Perth, AUS	Thermo-katalytisches Verfahren mit Eisenerz	Im Bau	100
Graforce MOA-H2eat	Berlin, GER	Nicht-thermisches Plasma	Im Bau	255

[33] Verfahrensübersicht zur Erzeugung von Wasserstoff durch Erdgas-Pyrolyse, Zeitschrift Chemie Ingenieur Technik, 2020, https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cite.202000021

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Digitales
und Verkehr

Koordiniert durch:

NOW
NOW-GMBH.DE

Projektträger:

ptj
Projektträger Jülich
Forschungszentrum Jülich