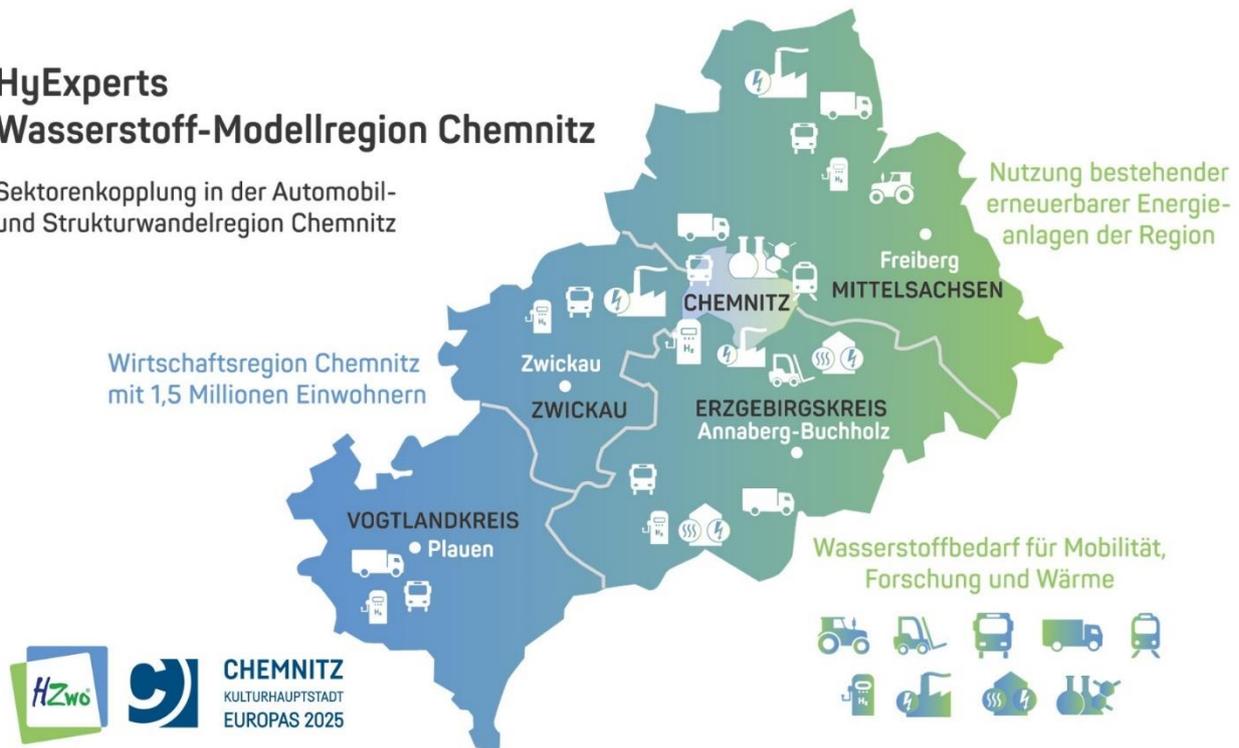


Abschlussbericht

HyExperts Wasserstoff-Modellregion Chemnitz

HyExperts Wasserstoff-Modellregion Chemnitz

Sektorenkopplung in der Automobil-
und Strukturwandelregion Chemnitz



Berichtsstand: September 2023

Kostenlos abrufbar auf der [Website der Stadt Chemnitz](#)

Auftraggeber

Stadt Chemnitz

Fachbereich

Umweltamt

Ansprechpartner

Carina Kühnel,
Benjamin Konrad



Beauftragt durch:



Bundesministerium
für Digitales
und Verkehr

Vergabe und Projektbegleitung durch:



Mit Unterstützung durch



Anlagen & Fahrzeuge

Annelie Kahlenberg

Scientific Engineer

Mobile:

+49152 28557137

Email:

annelie.kahlenberg@iav.de



Technologie &
Strategie

Marcus Lassowski

Senior Consultant

Mobile:

+49 173 6020 085

Email:

m.lassowski@consulting4drive.com



Von Erzeugung bis
Bedarf

Florian Lehnert

Projektleiter

Energieversorgungssysteme

Phone:

Tel: +49 3731 4195-358

Email:

Florian.Lehnert@dbi-gruppe.de

Michael Kühn

Teamleiter Process Studies

Phone:

Tel: +49 3731 4195-326

Email:

michael.kuehn@dbi-gruppe.de

Jens Hüttenrauch

Teamleiter Netzprojekte

Phone:

Tel: +49 341 2457-128

Email:

jens.huettenrauch@dbi-gruppe.de



Wasserstoff-
Marktplatz

Oliver Arnhold

CEO Localiser GmbH

Mobile:

+49 176 72500249

Email:

oliver.arnhold@localiser.de

Aleksandra Maliszewska

Data Scientist

Email:

aleksandra.maliszewska@localiser.de

Kurzfassung

Die vorliegende HyExperts-Studie zielt darauf ab, die Wasserstoffpotenziale der Region Chemnitz umfassend zu analysieren und aufzuzeigen. Diese Untersuchung ist von besonderer Bedeutung, da Wasserstoff als ein vielversprechender Energieträger für eine nachhaltige Zukunft gilt. Die Region Chemnitz bietet eine ausgezeichnete Möglichkeit, die Voraussetzungen für eine erfolgreiche Wasserstoffwirtschaft zu untersuchen.

Ein zentraler Aspekt dieser Studie ist die Analyse des Zusammenhangs der Erzeugung, Speicherung und dem Verbrauch von Wasserstoff. Es wird untersucht, wie die verschiedenen Teile des Wasserstoffökosystems miteinander interagieren und wie sie optimal aufeinander abgestimmt werden können. Dazu werden Wasserstoffökosysteme herausgearbeitet die kurzfristig die Region mit grünem Wasserstoff versorgen können. Langfristig werden der Ausbau und der Anschluss an die überregionalen Versorgungsnetze (Hydrogen Backbone) empfohlen.

Um ein umfassendes Bild der Potenziale zu erhalten, werden die Erzeugungs- und Bedarfspotenziale für grünen Wasserstoff miteinander verglichen. Dies ermöglicht es, die Möglichkeiten für eine nachhaltige Wasserstoffproduktion in der Region zu bewerten und den Bedarf potenzieller Anwender zu ermitteln. Im Fokus stehen hier vorrangig Mobilitätsanwendungen (bspw. Busse, H₂, leichte Nutzfahrzeuge). Mittel- bis langfristig kommen Anwendungen im Energie- und Wärmesektor hinzu.

Die Einbindung verschiedener Stakeholder aus der Industrie, Politik und Forschung sowie die Förderung von Netzwerkarbeit und Gesprächen sind entscheidende Schritte in diesem Prozess. Die Zusammenarbeit mit relevanten Akteuren trägt dazu bei, eine umfassende Wasserstoffstrategie zu erarbeiten, die auf die speziellen Bedürfnisse und Potenziale der Region Chemnitz zugeschnitten ist.

Abschließend werden in dieser Studie konkrete Handlungsempfehlungen innerhalb der Wasserstoffstrategie für die Region Chemnitz erarbeitet. Diese Empfehlungen sollen als Leitfaden dienen, um die Nutzung des Wasserstoffpotenzials in der Region zu maximieren und einen Beitrag zur nachhaltigen Energieversorgung zu leisten.



Inhalt

1	Einleitung.....	7
2	Ziel des Projekts.....	7
3	Modellregion Chemnitz.....	8
3.1	Übersicht der Wasserstoff-Aktivitäten in der Region.....	9
3.2	Angetroffene Herausforderungen.....	10
4	Marktübersicht, Stand der Technik und rechtliche Rahmenbedingungen.....	12
4.1	Marktübersicht Fahrzeuge.....	12
4.2	Marktübersicht Wasserstoffverbrennungsmotor.....	18
4.3	Marktübersicht Elektrolyseanlagen.....	20
4.4	Marktübersicht H ₂ -Transportlösungen.....	23
4.5	Marktübersicht H ₂ -Speicher.....	24
4.6	Stand der Technik alternative H ₂ -Erzeugungsverfahren.....	25
4.6.1	Reformierung auf Basis biogener Gase.....	25
4.6.2	Thermo-chemische Nutzung von Klärschlamm.....	26
4.6.3	Methanpyrolyse.....	28
4.6.4	Plasmalyse von Schmutzwasser.....	29
4.6.5	Kombination mit thermischer Abfallbeseitigung.....	30
4.6.6	Bewertung der alternativen H ₂ -Erzeugungsverfahren hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit.....	30
4.7	Nutzungsmöglichkeiten von Grau- statt Frischwasser im Rahmen der Elektrolyse.....	31
4.8	Strombezugskriterien für die Herstellung von grünem Wasserstoff im Verkehrssektor.....	32
4.9	Rechtliche Rahmenbedingungen / Genehmigungsverfahren.....	35
4.9.1	A: Genehmigung von Erzeugungsanlagen.....	36
4.9.2	B: Genehmigung von Leitungen.....	39
4.9.3	C: Genehmigung von Wasserstoffspeichern.....	44
4.9.4	D: Wasserstofftankstellen.....	47
4.9.5	E: Genehmigung von wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen.....	50
5	Ganzheitliche Erzeugungspotenzial- und Bedarfsanalyse.....	52
5.1	Übersicht bereits bestehender EE-Anlagen.....	52
5.2	Wasserstoff-Erzeugungspotenziale.....	58
5.2.1	Potenziale zum Ausbau der Windkraft.....	58
5.2.2	Potenziale zum Ausbau von Photovoltaik.....	70
5.2.3	Prognose des EE-Energieüberschusses zur Wasserstoffproduktion.....	73
5.3	Wasserstoff-Bedarfe.....	80
5.3.1	Methodik der Datenerhebung und Datengrundlage.....	80
5.3.2	Ermittelte Wasserstoffbedarfe.....	83



5.3.3	Regionale Wasserstoffbedarfe	85
5.3.4	Statistisch abgeleitete Bedarfe für den Straßenverkehr	89
5.3.5	Mögliche Wasserstofftankstellen in der Projektregion.....	93
5.3.6	Weitere potenzielle regionale Bedarfe	94
5.4	Auswerteergebnisse zur Umfrage zur Wasserstoffmodellregion Chemnitz	96
5.5	Erstellung einer interaktiven Karte zur Verbildlichung der Potenzial- und Bedarfsanalyse.....	100
6	Transport und Verteilung, Importbilanz	109
6.1	Entwicklung eines Versorgungskonzepts	109
6.2	Entwicklung eines H ₂ -Netzes	113
6.2.1	Aktuelle Projekte zum H ₂ -Backbone	113
6.2.2	Mögliche Struktur eines H ₂ -Netzes in der Modellregion	115
6.2.3	Umstellung von Leitungen auf Wasserstoff	118
6.2.4	Speicher und nachgelagerte Netze	119
7	Beschreibung der konkreten Wasserstoffaktivitäten in der Region	120
7.1	Positionierungsvorschlag für die Region hinsichtlich Wasserstoffportfolio	120
7.2	Wasserstoffinsel - Stadt Chemnitz	121
7.3	Wasserstoffinsel - Mittweida / Erlau	126
8	Ökonomischer und ökologischer Mehrwert für die Modellregion	130
8.1	Mobilisierung von Kapital	130
8.2	Wertschöpfung aus dem Energiemarkt	133
8.3	Wertschöpfung aus Wasserstoff-Absatz	137
8.4	Umweltbilanz	140
8.4.1	Zertifizierung für grünen und klimaneutralen Wasserstoff	140
8.4.2	Anforderungen für die Zertifizierung	141
8.4.3	Übersicht Emissionsfaktoren	143
8.5	Einfluss einer Wasserstoffwirtschaft auf den Arbeitsmarkt.....	144
8.5.1	Potenzial der Wasserstoffwertschöpfung in der Region.....	144
8.5.2	Transformationsprozess in der sächsischen Automobilzulieferindustrie	148
8.5.3	Schulungsangebote.....	156
9	Strategie für die Wasserstoffregion Chemnitz	158
9.1	Ausgearbeitete Strategie	159
9.2	Blaupausenkonzept.....	166
10	Ausblick	169
11	Verzeichnisse	171
11.1	Abbildungsverzeichnis.....	171
11.2	Tabellenverzeichnis.....	174
12	Anhang	175



13 Literatur 176

Einleitung

Wasserstoff - ein Energieträger für die Zukunft. Unsere Gesellschaft steht mit dem Klimawandel vor einem zentralen Problem unserer Zeit. Dieses erfordert die Treibhausgasemissionen in Zukunft deutlich zu reduzieren. Um die Erwärmung zu begrenzen sind daher verschiedenste Maßnahmen notwendig die zu einer Reduktion der Emissionen beitragen können. Die Bundesregierung hat hier mit dem Klimaschutzgesetz eine Vorgabe getroffen, die eine stetige Reduktion der Emissionen vorsieht. Vorgesehen ist eine Reduktion bis 2030 von mind. 65 % der Emissionen gegenüber dem Referenzjahr 1990 und die Reduktion auf Net-Zero-Emissionen im Jahr 2045. Auf diesem Weg soll den Zielen aus dem Pariser Klimaabkommen Rechnung getragen werden.

Diese Reduktion stellt uns vor eine immense gesamtgesellschaftliche Aufgabe. So sind beispielsweise eine sichere Stromversorgung sowie eine verlässliche Mobilität, existenzielle Abhängigkeiten unserer modernen Gesellschaft. Mit den Zielen, die sich aus der Emissionsreduktion, für diese Bereiche ergeben, geht eine enorme Herausforderung einher. Für die Energie- und die Verkehrswende müssen somit Konzepte entwickelt werden, die den technoökonomischen Ansprüchen gerecht werden können.

Wasserstoff kann hier einen Energieträger für die Zukunft darstellen, der vielfältig eingesetzt werden kann. Wie der Weg zu einer funktionierenden Wasserstoffwirtschaft gelingen kann und welche Voraussetzungen dafür erfüllt werden müssen, soll in diesem Bericht beleuchtet werden.

2 Ziel des Projekts

Die übergeordnete Fragestellung, die sich für das HyExperts-Projekt in der Modellregion Chemnitz ergibt, ist wie eine regionale Wasserstoffwertschöpfung aufgebaut und etabliert werden kann. Zentrale zu untersuchende Themengebiete sind dabei der Dreiklang aus Erzeugung, Speicherung und Verteilung, sowie dem Bedarf.



Abbildung 1: Zielsetzung der Studie

Ziel dabei war es eine technoökonomische Bewertung dieser einzelnen Dimensionen zu erarbeiten. Die Erkenntnisse der Analyse werden in diesem Bericht dargestellt. Weitergehend soll die Umsetzung erster Wasserstoffinseln beratend betreut werden, um umsetzungsfähige Konzepte zur Etablierung regionaler Wertschöpfungsketten für Erzeugung, Transport, Speicherung und Bereitstellung von grünem Wasserstoff zu erarbeiten. Der Fokus liegt dabei auf dem Wasserstoffbedarf im Mobilitätssektor und insbesondere dem öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV), dem Schwerlastverkehr, H₂-betriebenen Sonderfahrzeugen sowie dem motorisierten Individualverkehr. Abschließend steht der Prozess der Strategieentwicklung, der dabei helfen soll zielgerichtete Maßnahmen auf dem Weg zur Wasserstoffwirtschaft zu treffen.

3 Modellregion Chemnitz

Die Modellregion Chemnitz, für welche die Analysen dieser HyExperts-Studie durchgeführt wurden, liegt im südwestlichen Teil Sachsens. Die Region beschränkt sich dabei nicht auf das Stadtgebiet von Chemnitz, sondern enthält als Modellregion alle der in Abbildung 2 gezeigten Landkreise. So sind über das Stadtgebiet hinaus auch die Landkreise Mittelsachsen, Zwickau, der Erzgebirgskreis sowie der Vogtlandkreis Teil der Untersuchung. Dieser Mix aus städtischem und ländlichem Raum stellt somit ganz verschiedene Herausforderungen und Anforderungen für den Aufbau einer



Abbildung 2: Modellregion Chemnitz

Wasserstoffwirtschaft dar, die beim Aufbau konkreter Vorhaben berücksichtigt werden müssen.

3.1 Übersicht der Wasserstoff-Aktivitäten in der Region

Die Region Chemnitz hat beste Voraussetzungen, um sich in naher Zukunft zur Wasserstoff-Kompetenzregion zu entwickeln. Eine erstklassige Universität mit herausragender Fachkompetenz im Bereich Wasserstoff, sowie ansässige Unternehmen in den Schwerpunktbranchen Automobil- und Zuliefererindustrie, Informationstechnologie, regenerative Energie- und Umwelttechnik sowie Einige mehr. Aus dem Grund werden seit einigen Jahren viele F&E-Projekte mit Wasserstoffbezug umgesetzt. Stark involviert ist das führende deutsche Wasserstoffcluster HZwo e.V., welches sich zum Ziel gesetzt hat, relevante Akteure zu vernetzen sowie Wissen und Kompetenzen im Bereich Wasserstofftechnologie zu bündeln und dafür den beteiligten Akteuren frühzeitig einen Zugang zum künftigen Wasserstoffmarkt zu sichern. Relevante Vorhaben sind dabei der Aufbau des „HIC– Hydrogen and Mobility Innovation Center Chemnitz“ als Teil des ITZ (Nationales Innovations- und Technologiezentrum), sowie Cluster- und Leuchtturmprojekte (Transformations-Hub ch2ance, HZwo:Frame usw.), welche stets in die aktuelle Förderkulisse eingebettet werden. Somit ist HZwo e.V. ein starker Partner für das HyExperts-Konsortium zur Bündelung und Stärkung der Kompetenzen.

Wasserstoffaktivitäten der Region

- Aufbau einer Koordinationsstelle für H₂-Bildungsangebote
- Aufbau weiterer (Open Source) Entwicklungsplattformen alá OSS (Open Source Stack)
- Stellen von Förderanträgen zur Beschaffung von H₂-Bussen und -Nutzfahrzeugen
- Stellen von Förderanträgen zum Bau von H₂-Tankstellen
- Verstärkte gemeinschaftliche Politik- und Öffentlichkeitsarbeit zum Anschluss der Region Chemnitz an den Hydrogen Backbone bzw. das dt. H₂-Übertragungsnetzwerk
- Erste H₂-Bildungsangebote und weiterer Ausbau, Schließen von Lücken
- Konkrete Produktentwicklungen bei Unternehmen, z.B.:
 - SITEC Industrietechnologie GmbH: Wasserstoffverteillrohre, Komponenten für Brennstoffzellen und Stacks
 - WätaS Wärmetauscher Sachsen GmbH: Metallische Bipolarplatten für PEM-Brennstoffzellen, PEM-Brennstoffzellen und Stacks
 - LSE- Leighweight Structures Engineering GmbH: Wasserstofftanks

3.2 Angetroffene Herausforderungen

Zu Projektbeginn sind in der Modellregion Chemnitz schon diverse Akteure mit unterschiedlichen Interessen im Bereich der Wasserstoffwirtschaft präsent. Von Industrieunternehmen über Energieversorger bis hin zu Forschungseinrichtungen und Betreibern von Fahrzeugflotten, gibt es ein breites Feld von Akteuren, die an einer Wasserstoffwirtschaft partizipieren möchten. Diese Vielfalt an Einzelinteressen kann zu einer erschwerten Koordination und Identifikation der Interessen führen. Eine zentrale Herausforderung besteht somit darin, die Interessen zu bündeln, um die Potenziale ausschöpfen zu können. Durch das bereits bestehende Netzwerk über den HZwo e.V. ist hier schon ein entscheidender Schritt getan. Bislang fehlt es jedoch an der konkreten Umsetzung von gesamtheitlich gedachten Wasserstoffwertschöpfungsketten.

Eine der größten Herausforderungen liegt dabei im "Henne-Ei-Problem" begründet, das sich aus dem komplexen Zusammenspiel aus Erzeugung, Speicherung, Verteilung und dem tatsächlichen Bedarf nach Wasserstoff ergibt. Die Komplexität tritt auf, da sich die beteiligten Partner schwer tun ohne Sicherheiten einen ersten Schritt zu gehen. So gibt es zum einen die Tendenz Wasserstofffahrzeuge erst zu beschaffen, wenn Infrastruktur und Wasserstoff zu einem konkurrenzfähigen Preis vorhanden sind. Andererseits werden Investitionen in die Wasserstoffproduktion und Infrastruktur gehemmt, solange kein ausreichender Bedarf besteht.

In der Region besteht außerdem ein Spannungsfeld zwischen der Erzeugung von grünem Wasserstoff und der Verfügbarkeit erneuerbarer Energien. Die Produktion von grünem Wasserstoff stellt dabei besondere Anforderungen an den bezogenen Strom, die in diesem Bericht noch näher erläutert werden. Entscheidend ist ein weiterer Ausbau der Erzeugungskapazitäten. Hierbei ergeben sich auch politische Spannungsfelder die Berücksichtigt werden müssen. Hinsichtlich zu tätiger Investitionen fehlt aktuell außerdem eine Bedarfsabschätzung für grünen Wasserstoff. Eine genaue Bedarfsermittlung ist dabei entscheidend, um übermäßige Investitionen zu vermeiden und Ressourcen effizient einzusetzen.

Gleichzeitig müssen auch wirtschaftliche Anreize geschaffen werden, um die Entwicklung einer nachhaltigen Wasserstoffwirtschaft in der Region zu fördern. Subventionen, Steueranreize und Förderprogramme können dabei helfen, die Initialkosten zu reduzieren und Investitionen in Wasserstofftechnologien attraktiver zu gestalten.

Die Herausforderungen im Zusammenhang mit der Wasserstoffwirtschaft in der Region sind somit vielfältig und komplex. Die Koordination der Einzelinteressen, die Schaffung geschlossener Wertschöpfungsketten, die Bewältigung des "Henne-Ei-Problems" und die



genaue Ermittlung des Bedarfs sind zentrale Aufgaben, die eine kooperative und strategische Herangehensweise erfordern. Dies kann erreicht werden durch eine enge Zusammenarbeit zwischen den beteiligten Partnern. Als erster Schritt zur Adressierung dieser Problemstellungen sind die während der Projektlaufzeit entstandenen Konzepte der Wasserstoffinseln in Chemnitz und Mittweida zu verstehen, bei denen das Projektkonsortium unterstützend mitgewirkt hat. Durch die Zusammenführung verschiedener Partner, die unterschiedliche Schritte in der Wasserstoffwirtschaft bedienen, kann der Aufbau einer gesamtheitlich gedachten regionalen Wasserstoffwertschöpfung gelingen.

4 Marktübersicht, Stand der Technik und rechtliche Rahmenbedingungen

In diesem Kapitel wird der aktuelle Stand der Technik und eine Marktübersicht für die verschiedenen Schritte der Wertschöpfungskette aufgezeigt. Die Marktreife und Verfügbarkeit für die notwendigen Teilsysteme sind ein kritischer Faktor, um eine erfolgreiche regionale Wasserstoffwirtschaft aufbauen zu können. Besondere Beachtung gilt außerdem der Einordnung in die rechtlichen Rahmenbedingungen, die ebenfalls in diesem Kapitel untersucht werden.

4.1 Marktübersicht Fahrzeuge

Die Verfügbarkeit von Fahrzeugen ist ein wesentlicher Faktor für den Aufbau einer funktionierenden Wasserstoffmobilität. Vorrangig relevant ist dies aktuell für solche Anwendungen, die eine gesicherte Abnahme von Wasserstoff erzeugen können. Diese sind essenziell, um mit einer notwendigen Sicherheit zu einem Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft beizutragen. Da diese gesicherte Abnahme nicht im Bereich des motorisierten Individualverkehrs zu erwarten ist, liegt der Fokus in diesem Kapitel auf Nutzfahrzeugen und Bus-Anwendungen. Um hier funktionsfähige Konzepte für die Wasserstoffmobilität aufbauen zu können, ist es essenziell, dass entsprechende Fahrzeuge verfügbar sind. Größte Bedeutung hat dies beispielsweise im Rahmen bewilligter Förderanträge, die einen zeitlich begrenzten Abruf erfordern. Daher ist von großer Bedeutung, dass die Fahrzeuge ein entsprechendes Technology Readiness Level (TRL) erreicht haben und auch in einem moderaten Zeitrahmen lieferbar sind.

Dieses Kapitel soll eine Übersicht zu den verfügbaren Fahrzeuglösungen geben. Dabei kommen für die Beschaffung von Fahrzeugen mit Wasserstoffantrieb aktuell verschiedene Optionen in Betracht, die näher beleuchtet werden. Die Optionen unterscheiden sich beispielsweise je nach Fahrzeugklasse und Anwendungsfall. So stehen die Fahrzeuge in gewissen Klassen direkt vom OEM zur Verfügung, wie etwa im Rahmen der Hyundai-Xcient-Testserie. Abseits davon kommen Umrüslösungen infrage, die sich nochmals in zwei Bereiche unterteilen lassen. Dies ist zum einen das Angebot von Neufahrzeugen, die auf Basis bestehender Chassis auf einen Wasserstoffbetrieb umgerüstet werden. Im Bereich der Spezialanwendungen ist hier die Firma Faun mit Spezialfahrzeugen für die Abfallwirtschaft zu nennen. Daneben existieren Angebote für retrofit-Lösungen, bei denen Bestandsfahrzeuge auf einen Brennstoffzellenbetrieb umgerüstet werden.

Eine erste Orientierung zu verfügbaren und angekündigten Fahrzeugserien kann Abbildung 3 entnommen werden. Auf einer Zeitschiene bis 2030 sind hier sowohl bereits verfügbare als

auch angekündigte Fahrzeugkonzepte dargestellt. Gegeben ist dabei eine Aufteilung auf Basis der Nutzfahrzeuge sowie Fahrzeugen für den Busverkehr. Ergänzt wird dies um die ausgegrauten Konzepte, für welche bisher keine offizielle Ankündigung erfolgt ist. Anzumerken ist, dass aufgrund der aktuellen Dynamik in diesem Bereich weitere noch nicht absehbare Konzepte dazu kommen werden. Dies kann zwar aktuell im Spannungsfeld der Fahrzeugbeschaffung keinen direkten Mehrwert leisten, kann aber langfristig dazu beitragen, dass die abgefragten Volumina verfügbar sind.

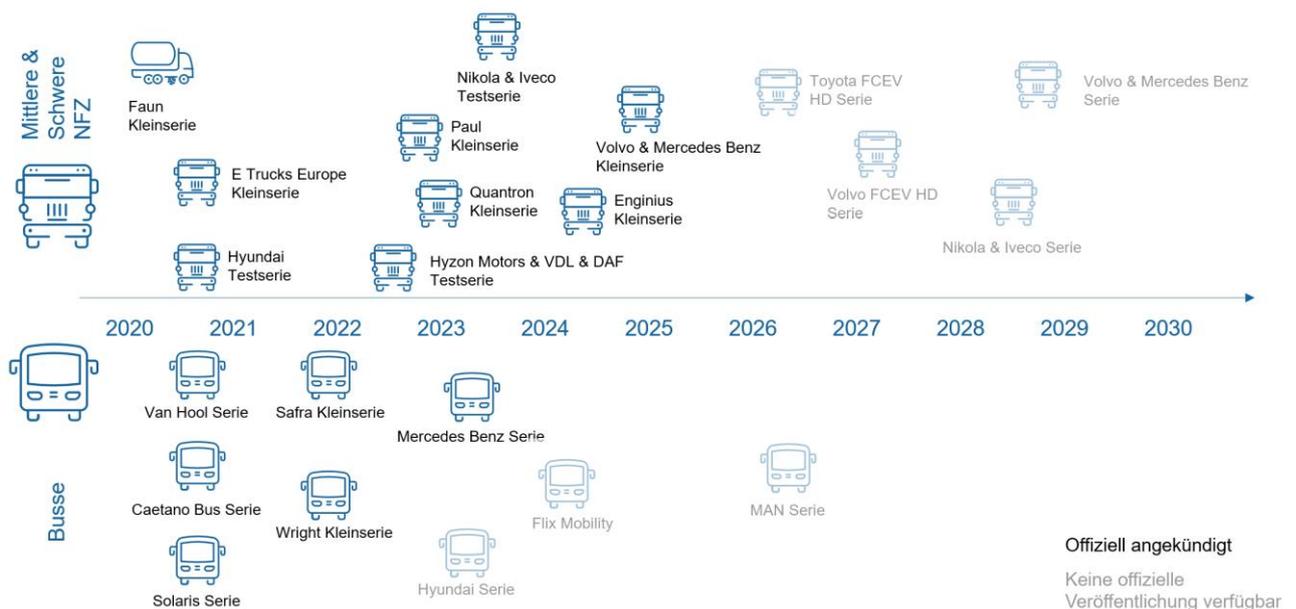


Abbildung 3: Übersicht zur Fahrzeugverfügbarkeit im Bereich der Nutzfahrzeuge und Busse (Ausschnitt der aktuellen Fahrzeuglandschaft mit Fokus auf Europa)

Neben der aktuellen Verfügbarkeit von Fahrzeugen soll in diesem Kapitel ein Fokus auf mögliche Umrüslösungen gesetzt werden. Hierzu soll die in Abbildung 4 dargestellte Landkarte zur Fahrzeugumrüstung einen prinzipiellen Überblick liefern. Dargestellt ist hier nicht nur die Umrüstung auf Wasserstofflösungen, sondern ebenso auf batterieelektrische Antriebe. Eine weitere Unterteilung erfolgt in die Fahrzeugklassen Lkw, Bus und Transporter. Deutlich wird in der Übersicht, dass der Fokus bei vielen Unternehmen aktuell auf der Elektromobilität liegt. Dies ist insbesondere für die Busse zu beobachten, wo aktuell keine Wasserstoff-Umrüstung verfügbar ist. Nach der Insolvenz von Clean Logistics und deren angekündigtem Konzeptfahrzeug, ist dieses Feld aktuell offen. Daneben kann jedoch weiterhin auf die oben gezeigten Anbieter von Wasserstoffbussen wie beispielsweise Solaris und Van Hool zurückgegriffen werden.

Die Aktivitäten im Bereich Wasserstoff zeigen sich vor allem im Bereich der Lkw, wo bereits verschiedene Anbieter mit Fahrzeugkonzepten vertreten sind. In aller Regel beschränken diese Anbieter ihre Umrüstungslösungen nicht nur auf den Bereich Wasserstoff. Bis auf Hyzon Motors und Enginius sind die gelisteten Anbieter auch im Bereich der batterieelektrischen Fahrzeuge vertreten. Mit Pepper Motion und Framo drängen aktuell zwei weitere Hersteller in den Markt für Wasserstofffahrzeuge. Diese haben erste Fahrzeuge angekündigt und befinden sich hier aktuell in der Entwicklung.

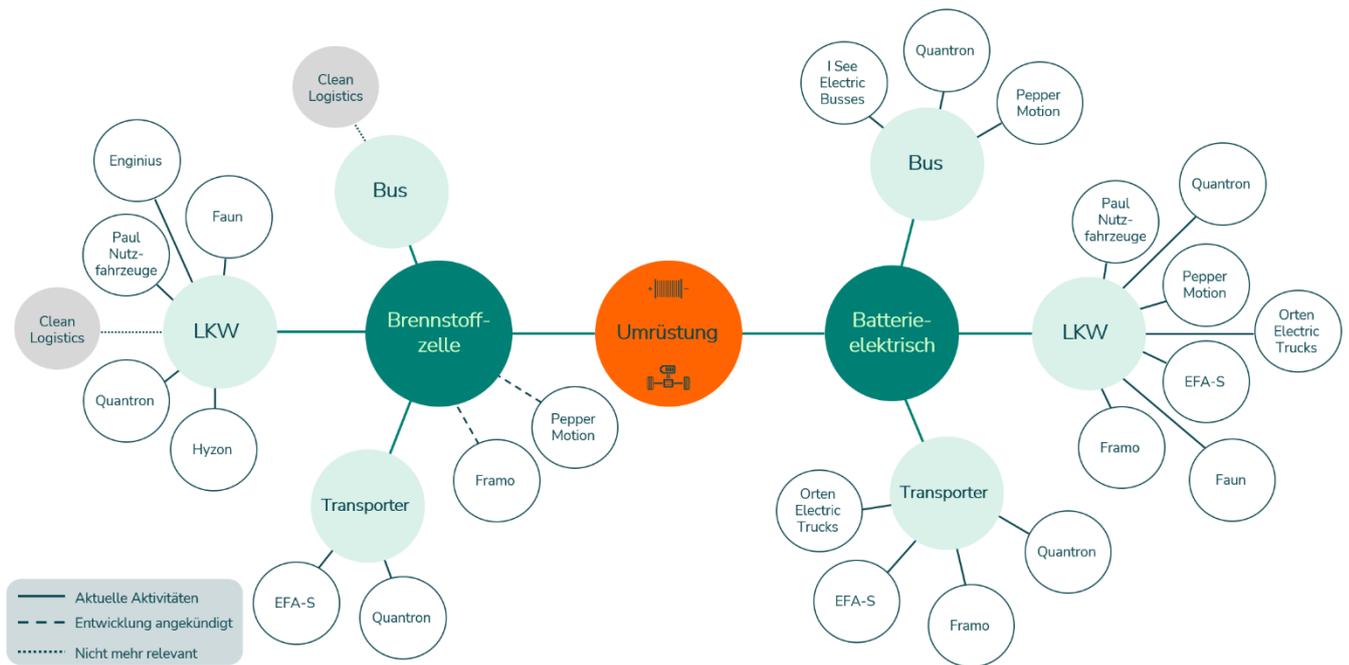


Abbildung 4: Landkarte Fahrzeugumrüstung

Essenziell bei der Betrachtung der Umrüstungsmöglichkeiten ist es, diese hinsichtlich der Umsetzungsreife einzuordnen. Dies hat sich nicht zuletzt das Beispiel Clean Logistics verdeutlicht. Daher wurde eine Einordnung der Anbieter hinsichtlich TRL und Marktdurchdringung durchgeführt. Diese Einschätzung soll als Orientierung für die Beschaffung von Fahrzeugen dienen und wird im Folgenden detailliert vorgestellt. Die in diesem Zuge erarbeitete Übersicht ist in Abbildung 5 dargestellt. Hierbei ist wichtig zu erwähnen, dass sich diese Einordnung nur auf die Umrüstungsaktivitäten für Wasserstoff beziehen. Die Nummerierung der Anbieter ist dabei zufällig gewählt und gibt keinen Aufschluss über die Bewertung der Aktivitäten. Weiterhin ist die Übersicht als Stand Mai 2023 zu verstehen. Die weitere Entwicklung kann hier nicht abgebildet werden.

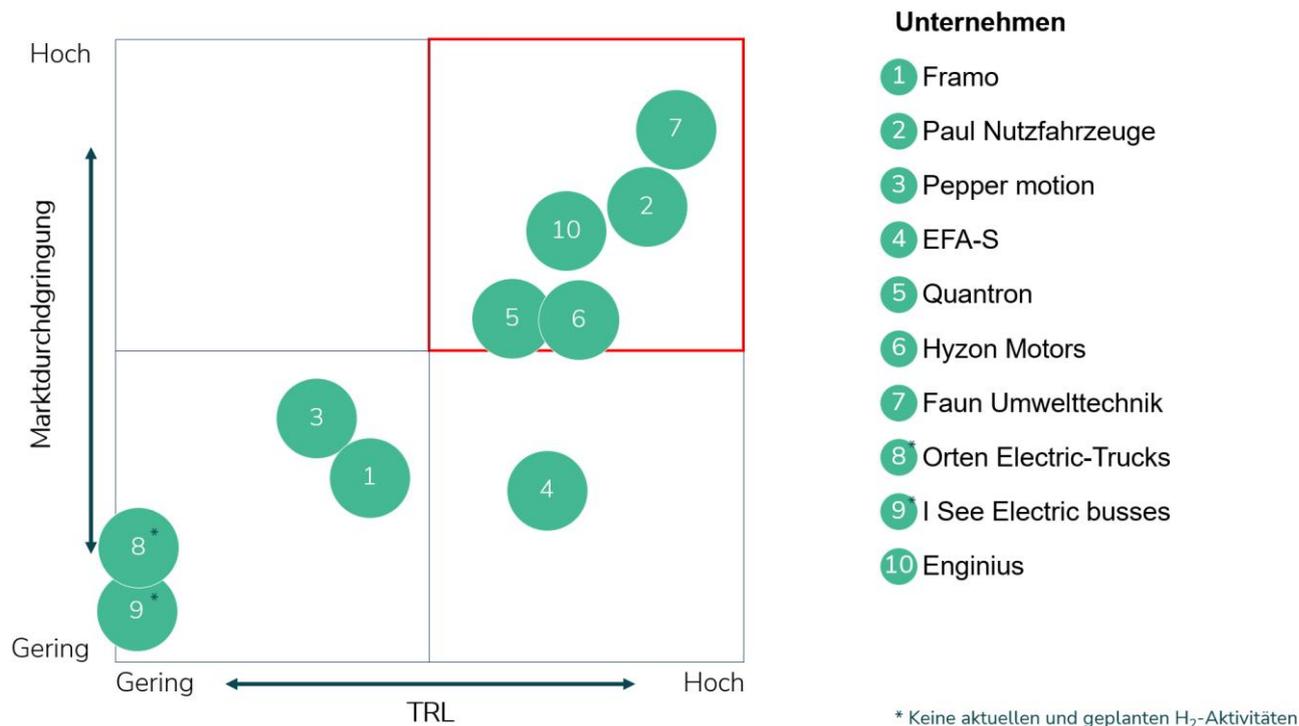


Abbildung 5: Bewertung und Priorisierung des Umrüstungsnetzwerkes hinsichtlich Wasserstoffaktivitäten

Initial aus der Betrachtung heraus fallen **Orten Electric-Trucks** und **I See Electric Busses**. Diese bieten zwar Umrüttlösungen für Nutzfahrzeuge und Busse an, sind aber nicht im Bereich Wasserstofflösungen aktiv. Ebenso im unteren Quadranten befinden sich Framo und Pepper motion. Dies ist damit zu begründen, dass hier zwar Fahrzeuge angekündigt wurden, diese sich zum Stand dieses Berichtes jedoch in der Entwicklungsphase befinden.

Die **Framo GmbH**, die in der Entwicklung und dem Vertrieb von Elektro-Lkw und Sonderfahrzeugen ab 7,5 t aktiv ist, bietet bereits Fahrzeuge für die Citylogistik, Kommunalwirtschaft, Bauwirtschaft und Werkslogistik an. Ein Wasserstofffahrzeug wurde noch für 2023 angekündigt. Dazu wurde eine Kooperation mit der FES GmbH (Fahrzeug-Entwicklung Sachsen) aus Zwickau für eine Kapazitätserweiterung der Produktion und zur Entwicklung der Wasserstofflösung eingegangen.

Bei der **Pepper motion GmbH**, die neben batterieelektrischen Neufahrzeugen auch kurzfristig bereitstellbare E-Umrüstkits anbieten, wurde ebenfalls die Entwicklung einer Wasserstofflösung angekündigt.

Im Quadranten mit einem recht hohen TRL, aber geringer Marktdurchdringung befindet sich die **EFA - S GmbH** aus Stuttgart. Spezialisiert auf den Umbau von Pkw und Lkw bis zu 12 t

zulässigem Gesamtgewicht auf Batterieantrieb, existiert ergänzend das Angebot eines Brennstoffzellentransporters.

Auch im oberen Quadranten sind einige der Anbieter einzuordnen, wobei sich auch hier noch Unterschiede in der Marktdurchdringung und Technologiereife ergeben.

Zu nennen ist die **Quantron AG** als Hersteller von emissionsfreien Fahrzeugen für den Güter- und Personentransport. Neben Lösungen für den batterieelektrischen Antrieb sind Wasserstofftrucks bereits am Markt sowie ein Wasserstoffbus angekündigt. Batterieelektrische retrofit-Lösungen finden sich ebenfalls im Portfolio von Quantron.

Weiterhin bereits verfügbar ist ein Fahrzeug von **Hyzon Motors**. Diese haben mit einem Wasserstofftruck basierend auf DAF-Chassis ihr erstes Fahrzeug für den europäischen Markt im Angebot.

Darüber hinaus ist hier die **Enginius GmbH** als eine Tochterfirma der Faun Umwelttechnik einzuordnen. Durch diese erfolgte eine Übernahme von Teilen der insolventen Clean Logistics. Scope ist der Aufbau von Neufahrzeugen mit Brennstoffzellenantrieb auf Basis bestehender Gleiter wie dem Atego von Daimler Trucks. Dabei sollen verschiedenen Aufbauten realisiert werden, um ein breites Spektrum an Anforderungen abdecken zu können.

Die **Paul Nutzfahrzeuge GmbH** ist eines der führenden europäischen Unternehmen für Sonderfahrzeugumbauten und kann somit auf ein gutes Netzwerk zurückgreifen. Als neues Geschäftsgebiet wurden die Entwicklung und der Vertrieb von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben aufgebaut. Bereits verfügbar ist der serienreife PH2P TRUCK mit H₂-Antrieb. Die ersten 25 Modelle wurden bereits Ende 2022 ausgeliefert.

Als bereits etablierter Anbieter ist außerdem die **FAUN Umwelttechnik GmbH & Co. KG** zu nennen. Diese setzen den Fokus auf Müllsammel- und Reinigungsfahrzeuge als Speziallösung für eine umweltfreundliche kommunale Mobilität. Bei Faun sind die wasserstoffbetriebenen Abfallsammelfahrzeuge bereits seit einiger Zeit als erprobte Lösung für Kommunen und Entsorgungsunternehmer am Markt.

Bei der Bereitstellung von Umrüttlösungen ergeben sich neben der wichtigen Frage nach der Verfügbarkeit auch ebenso wichtige Fragestellungen hinsichtlich der Zulassungs- und Homologationskriterien. Hier ist insbesondere die Produktsicherheit ein wesentlicher zu berücksichtigender Faktor. Diese ist vor allem mit Blick auf die H₂-Safety kritisch zu prüfen. Dabei gelten im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen besondere Anforderungen an den Aufprallschutz und die Crashesicherheit. Weiterhin sind die Anforderungen an Be- und Entlüftungssysteme sowie Blow-off in geschlossenen Räumen zu berücksichtigen. Allgemein

sind hinsichtlich dieser Kriterien zwei Varianten der Umrüstung zu unterscheiden. Zum einen die Nachrüstung eines Wasserstoffantriebs in ein gebrauchtes Fahrzeug. Zum anderen die Umrüstung von Neufahrzeugen, welche dann in Serie vertrieben werden.

Erstere Variante verursacht einen deutlich erhöhten Aufwand bezüglich der oben beschriebenen Problematik, die aus einer erforderlichen Einzelzulassung des jeweiligen Fahrzeuges resultiert. Bei den hier identifizierten Anbietern befindet sich eine solche retrofit-Lösung für Wasserstoffantriebe jedoch nicht im Angebot. Dies kann auf die hohe Komplexität der Systemintegration zurückgeführt werden. Dieser Fall ist für die durchgeführte Betrachtung innerhalb dieser Studie nicht relevant.

Für die letztere Variante, den Umbau auf Wasserstoffantrieb in Serie, entfällt diese Komplexität. Hier wird durch den Hersteller ein zulassungsfähiges Fahrzeug ausgeliefert, welches bereits über eine Typgenehmigung verfügt. Die notwendige Produktsicherheit für diese Fahrzeuge ist damit sichergestellt. Zusätzliche Zulassungs- und Homologationsaufwände für den Anwender der Fahrzeuge entfallen.

Ein weiterer wichtiger Punkt bei der Umsetzung von Umrüttlösungen ist die funktionale Sicherheit des Gesamtsystems. Dabei muss eine verlässliche und sichere Funktionsweise gewährleistet werden, selbst wenn Fehler auftreten. Dies ist besonders wichtig in sicherheitskritischen Umgebungen, in denen Menschenleben oder die Umwelt geschützt werden müssen. Die einzelnen Komponenten (H₂-Motor, Tanksystem, Sensoren und weitere Einzelteile) müssen in der Regel nicht isoliert abgeprüft werden, da sie als „eigensicher“ vom Zulieferer bereitgestellt werden.

In den Planungsprozess der Umrüstung wird ein umfassendes System von Sicherheitsvorkehrungen und Notfallplänen implementiert. Dies beinhaltet beispielsweise die Installation von Gasdetektoren, die auf Wasserstoffleckagen hinweisen, sowie die Implementierung eines Not-Aus-Systems, das den Motor bei auftretenden Gefahren sofort abschaltet. Dafür werden aus definierten Anforderungen, Testfälle abgeleitet, welche dann abgeprüft werden. Der Testumfang ist abhängig von der Fahrzeuganzahl, welche zugelassen werden sollen – die Bandbreite reicht von Prototypen, über Kleinstserien bis hin zu einer Serienzulassung. Zudem sollten Schulungen für das Betriebspersonal durchgeführt werden, um im Ernstfall angemessen reagieren zu können. Die Norm ISO 26262 ist ein Beispiel für einen internationalen Standard, der sich mit der funktionalen Sicherheit in der Automobilindustrie befasst.

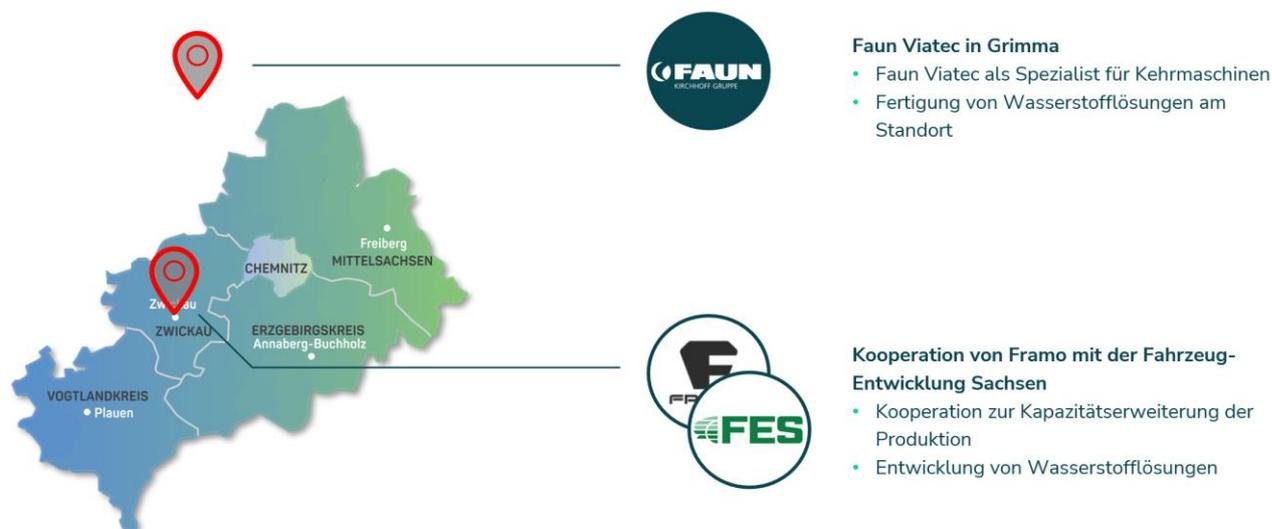


Abbildung 6: Potenzielle Fahrzeugumrüstung in der Region

Neben der gesamtheitlichen Verfügbarkeit von Umrüttlösungen sowie der Einordnung der anbietenden Unternehmen, ist ein Überblick über die lokalen Potenziale für die Umrüstung erstrebenswert. Wie in Abbildung 6 dargestellt, können hinsichtlich der in diesem Kapitel betrachteten Unternehmen verschiedene Synergien in der Region identifiziert werden. Nicht direkt im Raum Chemnitz, jedoch in Sachsen angesiedelt ist die Faun Viatec in Grimma. Bei dem Spezialisten für Kehrmaschinen werden am Standort Wasserstofflösungen gefertigt. Daneben ergibt sich ein weiteres Potenzial aus der Kooperation von Framo mit der Fahrzeugentwicklung Sachsen. Mit Sitz in Zwickau soll diese bei der Entwicklung von Wasserstofflösungen unterstützen und eine Kapazitätserweiterung der Produktion ermöglichen.

4.2 Marktübersicht Wasserstoffverbrennungsmotor

Langfristig kann auch der Wasserstoffverbrennungsmotor eine Alternative für die Bereitstellung von CO₂-neutraler Mobilität darstellen. Dieser befindet sich allerdings in der Entwicklungsphase und ist zum Zeitpunkt der Berichterstellung nicht im Serienbetrieb verfügbar.

Dabei sind entwicklungsseitig verschiedene Herausforderungen zu berücksichtigen. Der Wasserstoffverbrennungsmotor beruht häufig auf Gasmotoren, die nach dem Otto-Brennverfahren arbeiten. Gegenüber den Gasmotoren sind für die Verbrennung von reinem Wasserstoff jedoch motorseitige Anpassungen vorzunehmen. Wasserstoff als Brennstoff zeichnet sich durch einen sehr hohen massenspezifischen Energiegehalt aus. Durch die geringe Dichte ist der volumetrische Energiegehalt jedoch bedeutend niedriger im Vergleich zu Methan oder flüssigen Kraftstoffen. Aufgrund des geringeren Wirkungsgrads des



Wasserstoffverbrennungsmotors im Vergleich zur Brennstoffzelle erhöht sich außerdem die mitzuführende Wasserstoffmenge. Als konstruktive Änderungen bei der Verbrennung von Wasserstoff ergibt sich beispielsweise eine Minderung des Verdichtungsverhältnisses, da Wasserstoff eine geringere Klopfintensität im Vergleich zu konventionellem Otto-Kraftstoff aufweist. Weiterhin sind spezielle Kolbenringe einzusetzen, welche den Blow-By minimieren, da der Eintrag von Wasserstoff in das Kurbelgehäuse sich negativ auf die Ölalterung auswirkt. Eine Problematik, die von Gasmotoren bekannt ist, sind die fehlenden Schmiereigenschaften von Wasserstoff. Dies wirkt sich ebenfalls auf die Konstruktion des Motors aus, da die Bauteile darauf ausgelegt werden müssen. Neben den konstruktiven Anpassungen ist für einen korrekten Betrieb eine für Wasserstoff applizierte Motorsteuerung zu verwenden, welche spezifisch auf die Betriebsbedingungen ausgelegt ist [1, 2].

Aktuell arbeiten verschiedene OEMs an Wasserstoffverbrennungsmotoren, von denen im Folgenden einige Vorhaben exemplarisch vorgestellt werden.

So plant Deutz 2024 mit der ersten Serienproduktion für Wasserstoffmotoren zu starten. Zunächst sind diese für stationäre Anwendungen vorgesehen. Perspektivisch ist jedoch auch der Einsatz in mobilen Anwendungen im Off-Road Sektor geplant [3].

Auch Liebherr entwickelt an Wasserstoffmotoren für Heavy Duty Anwendungen. Der erste Prototyp wurde 2022 vorgestellt. Dieser ist als Konzept bereits in einem Raupenbagger im Einsatz. Der Start der Serienproduktion ist für 2025 geplant [4].

Auch internationale Hersteller entwickeln an der Technologie. Hier ist beispielsweise Toyota zu nennen. Diese haben mit dem Corolla Cross Hydrogen Concept einen Prototyp mit Wasserstoffmotor für den Straßenverkehr veröffentlicht, der aktuell erprobt wird [5].

Hinsichtlich des Wasserstoffmotors gilt es die künftige Entwicklung zu beobachten. Perspektivisch sind Fahrzeuge mit dieser Antriebsart auch in Chemnitz denkbar, kommen jedoch für eine kurzfristige Umstellung der Flotten nicht in Betracht.

4.3 Marktübersicht Elektrolyseanlagen

In diesem Kapitel werden zunächst die relevanten Elektrolysetechnologien zur Erzeugung von grünem Wasserstoff vorgestellt und in eine Marktübersicht von verschiedenen Herstellern eingeordnet. Weiterführend erfolgt eine Vorstellung der Investitionskosten für einige Anlagen (beispielhaft 1 MW) anhand von tagesaktuellen Angeboten.

Die Wasserelektrolyse ist ein elektrochemischer Prozess, in dem Wasser mittels elektrischer Energie in seine Bestandteile – Wasserstoff und Sauerstoff – zerlegt wird. Technisch ausgereift und daher heutzutage von Bedeutung sind vier Elektrolysetechnologien:

- Alkalische Elektrolyse (AEL)
- Protonen-Austausch-Membran-(PEM)-Elektrolyse
- Alkalische Membranelektrolyse (AEM)
- Hochtemperaturelektrolyse oder Solid Oxide-Elektrolyse (SOEC)

Die **alkalische Elektrolyse (AEL)** ist eine etablierte Technologie, die seit ca. 100 Jahren großtechnisch eingesetzt und mit installierten Leistungen bis in den niedrigen dreistelligen Megawatt (MW)-Bereich realisiert wird. Zu den Vorteilen zählen die geringen Investitionskosten von ca. 1.000 € pro kW_{el} oder weniger bei großen Anlagen und die lange Lebensdauer. Beide Vorteile ergeben sich hauptsächlich aus der Tatsache, dass keine Edelmetalle als Elektrokatalysatoren verwendet werden müssen, sondern Nickel- oder Edelstahlstrukturen als Elektrode Anwendung finden. Nachteilig ist die Notwendigkeit eines flüssigen Elektrolyten (wässrige Kaliumhydroxid-Lösung mit ca. 30 Gew.-% KOH), wodurch ebenfalls die thermische Trägheit im direkten Vergleich zu den anderen Elektrolysetechnologien erhöht ist. Die Betriebstemperatur beträgt 70°C bis 90°C und der Betriebsdruck liegt zwischen 1 bar bis 30 bar. Der (heizwertbezogene) Zellwirkungsgrad beträgt derzeit ca. 50 bis 68 Prozent, woraus sich ein spezifischer Stromverbrauch von 47 bis 66 Kilowattstunde (kWh) pro Kilogramm (kg) Wasserstoff ergibt. Der Stromverbrauch des Gesamtsystems ist etwas höher, wobei erwartet wird, dass dieser sich bis 2050 auf unter 45 kWh pro kg reduzieren lässt [6–8].

Die **PEM-Elektrolyse** ist eine neuere Technologie, jedoch bereits kommerziell im Maßstab bis in den zweistelligen MW-Bereich verfügbar. Zu den Vorteilen der PEM-Elektrolyse zählen die höhere Betriebsdynamik, die einen Kaltstart binnen weniger Minuten ermöglicht, höhere Laständerungsgeschwindigkeiten im Vergleich zur AEL und ein möglicher Betrieb über den gesamten Lastbereich (0 bis >100 Prozent) mit hoher Gasreinheit des Wasserstoffs. Wegen dieser Vorteile ist die PEM-Elektrolyse besser für den Betrieb mit fluktuierenden Stromquellen geeignet. Nachteilig ist der bisher erforderliche Einsatz der seltenen Metalle Platin und Iridium

in den Elektroden, an deren Reduktion geforscht wird, sowie höhere Investitionskosten von ca. 2.000 € pro kW_{el} installierter Leistung¹. Die Betriebstemperatur beträgt 50°C bis 80°C und der Betriebsdruck liegt bei bis zu 100 bar. Der Wirkungsgrad ist auf Zellebene ähnlich zu der alkalischen Elektrolyse, der Systemwirkungsgrad kann im Vergleich zur AEL geringfügig höher ausfallen.

Die **alkalische Membranelektrolyse (AEM)** ist grundsätzlich vergleichbar mit der PEM-Elektrolyse, jedoch läuft der Ionentransport unterschiedlich ab (OH- anstatt von H+), weswegen andere Membranen und Elektroden verwendet werden. Zusätzlich wird keine hochkonzentrierte Kalilauge, sondern bestenfalls nur demineralisiertes Wasser benötigt (je nach Membran).

Bei der **Solid Oxide-Elektrolyse (SOEC)** wird der spezifische Strombedarf gesenkt, indem Wärme zugeführt wird, um das Wasser aufzuspalten. Das Wasser wird dabei bei Temperaturen von meist 700°C bis 1.000°C dampfförmig an die Elektroden geführt. Die SOEC befindet sich im Pilotstadium, wobei die Firma Sunfire aus Dresden SOEC-Systeme bereits vermarktet. Neben der derzeit geringen Marktreife zählen auch die noch hohen Investitionskosten von etwa 2.500 €/kW_{el} und eine träge Betriebsdynamik mit Kaltstartzeiten von mehreren Stunden zu den Nachteilen der SOEC [6–8].

Der Wasserverbrauch ist im Vergleich zu anderen Sektoren (z. B. Energieversorgung, Bergbau, Landwirtschaft) verhältnismäßig gering. Es werden für jeden Kubikmeter Wasserstoff etwa 9 bis 12 Kubikmeter Reinstwasser benötigt.

Zu erwähnen ist, dass der Wirkungsgrad der Elektrolyse abhängig vom Betriebspunkt bei Teillast zunimmt. Zudem spielt die Temperatur eine wesentliche Rolle bei der Beeinflussung des Wirkungsgrades, während der Druck lediglich einen geringfügigen Einfluss hat [9]. Dieser optimale Arbeitspunkt des Elektrolyseurs kann sich je nach Lastgradient (Änderung der elektrischen Leistung oder des Stroms im Verhältnis zur Zeit) ändern. Wenn der Lastgradient zu schnell oder zu stark steigt oder fällt, kann sich der Wirkungsgrad verringern, da der Elektrolyseur möglicherweise nicht in der Lage ist, die Änderungen in der Stromstärke effizient zu verarbeiten. Ein sanfter Anstieg oder Abfall des Lastgradienten kann dazu beitragen, den Elektrolyseur näher an seinem optimalen Arbeitspunkt zu halten und somit einen höheren Wirkungsgrad zu erreichen. Daher ist es wichtig, den Lastgradienten zu berücksichtigen, um

¹ Bei größeren Anlagen sinken die spezifischen Kosten.



sicherzustellen, dass der Elektrolyseur effizient arbeitet und der Wasserstoff mit minimalen Energieverlusten produziert wird.

Die vorliegende Abbildung 7 zeigt eine aktuelle Marktübersicht von Elektrolyseanlagen verschiedener Hersteller zum Zeitpunkt der Berichterstellung. Die Bandbreite der Nennleistung reicht von 1 – 10 MW.

Hersteller	Typ	Verfahren	Nennleistung (kW) 1 - 10 Megawatt
Elogen SAS	ELYTE 200	PEM	1.000
H-Tec Systems GmbH	PEM-Elektrolyseur ME450/1400	PEM	1.000
Kyocera AVX Corp.	PEM-40-1000	PEM	1.000
McPhy Energy S.A.	McLyzer 200-30	AEL	1.000
Enapter AG	AEM Multicore 420	AEM	1.008
Nel Hydrogen Electrolyser AS	MC250	PEM	1.230
Elogen SAS	ELYTE 260	PEM	1.300
Hoeller Electrolyzer GmbH	PROMETHEUS L	PEM	1.400
Cummins Inc.	HyLYZER 200	PEM	1.400
Nel Hydrogen Electrolyser AS	A300	AEL	1.500
Cummins Inc.	HyLYZER 250	PEM	1.700
ITM Power plc	3MEP CUBE	PEM	1.800
ITM Power plc	HGAS3SP	PEM	1.863
McPhy Energy S.A.	McLyzer 400-30	AEL	2.000
Sunfire GmbH	SUNFIRE-HYLINK SOEC	SOEC	2.412
Nel Hydrogen Electrolyser AS	A485	AEL	2.425
Nel Hydrogen Electrolyser AS	MC500	PEM	2.460
Elogen SAS	OPEN POWER	PEM	2.500
Cummins Inc.	HyLYZER 400	PEM	3.200
Cummins Inc.	HyLYZER 500	PEM	3.200
McPhy Energy S.A.	McLyzer 800-30	AEL	4.000
ITM Power plc	2 GEP Skid	PEM	4.500
Plug Power Inc.	Plug 5MW Electrolyzer	PEM	4.500
Nel Hydrogen Electrolyser AS	A1000	AEL	4.850
Cummins Inc.	HyLYZER	PEM	7.000
Plug Power Inc.	Plug 1MW Electrolyzer	PEM	9.000
Sunfire GmbH	SUNFIRE-HYLINK ALKALINE	AEL	9.000
Nel Hydrogen Electrolyser AS	A2000	AEL	9.700
Nel Hydrogen Electrolyser AS	M2000	PEM	9.990
H-Tec Systems GmbH	HCS	PEM	10.000

Abbildung 7: Marktübersicht von Elektrolyseanlagen [10]

In der Tabelle 1 werden beispielhaft die Investitionskosten, die Leistung, das Anlagenformat, die H₂-Produktion, die H₂-Qualität und der Ausgangsdruck verschiedener Hersteller für Anlagen mit einer vergleichbaren Leistung von etwa 1 MW dargestellt.



Tabelle 1: Gegenüberstellung der Elektrolyseurkosten verschiedener Hersteller

Hersteller	Elogen	Enapter	H-Tec Systems	KYROS	McPhy	Nel
Bezeichnung	E200	AEM Multicore 450	ME 450	KYROS Electrolyser 1050	McLyzer 200-30	MC 250
Technologie	PEM	AEM	PEM	PEM	AEL	PEM
Format	Cont.	40 ft Cont.	2x 40 ft Cont. (9 Stacks)	40 ft Container	Container	Container
Leistung	1 MW	1 MW	1 MW	1,23 MW	1 MW	1,25 MW
H ₂ Produktion	200 Nm ³ /h	210 Nm ³ /h	210 Nm ³ /h	210 Nm ³ /h	200 Nm ³ /h	246 Nm ³ /h
H ₂ Qualität	99,999 %	99,999 %	99,97 %	99,9995%	99,998 %	99,9995%
Ausgangsdruck	30 barg	35 barg	15-30 barg	40 barg	30 barg	30 barg
Preis in € Stand Ende '22	2 Mio.	1,2 Mio.	1,7 Mio.	2,7 Mio.	2,3 Mio.	2,8 Mio.

Um die hohen Investitionskosten der Elektrolyseanlage schneller zu amortisieren, fördert das Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) entsprechende Vorhaben zur Herstellung von grünem Wasserstoff. Die Förderquoten betragen bis zu 80 Prozent der Investitionsausgaben (CapEx). Zum Zeitpunkt der Berichtfertigstellung ist kein offener Förderaufruf gegeben.

4.4 Marktübersicht H₂-Transportlösungen

Ein wichtiger Baustein der Wertschöpfungskette ist der Wasserstofftransport. Dabei beginnt die Herausforderung bei der Auswahl eines geeigneten Transportmittels und reicht bis hin zur Bewältigung von technischen und logistischen Aspekten, um die reibungslose Integration in bestehende Energiesysteme zu gewährleisten. Nur eine ganzheitliche Betrachtung inkl. Speicherung, Transport, Erzeugungs- und Bedarfsprofilen führt zu einer kostenoptimalen Lösung.

Relevante Lösungen für die Projektregion Chemnitz sind kurzfristig vor allem der Lkw-gebundene Wasserstofftransport mit Multi Element Gas Containern (MEGC) und langfristig die Pipelineversorgung über einen Hydrogen Backbone Anschluss.

Im Anhang finden Sie Technologie-Steckbriefe, welche alle Technologien gesamthaft aufführen.

4.5 Marktübersicht H₂-Speicher

Auch die Speicherung von Wasserstoff spielt eine entscheidende Rolle bei der Verwendung von Wasserstoff als Energiequelle, vor allem dann, wenn sowohl die Erzeugung als auch der Bedarf an Wasserstoff intermittierend auftreten, wie zum Beispiel bei der Herstellung von grünem Wasserstoff durch Elektrolyse aus erneuerbaren Quellen oder beim Betanken von Fahrzeugen. Im Gegensatz zu anderen Gasen besteht die besondere Herausforderung bei der Wasserstoffspeicherung hauptsächlich darin, die gewünschten Energiedichten für das gesamte Speicher- oder Transportsystem zu erreichen. Dies wird üblicherweise durch die gasförmige Lagerung bei hohem Druck (mindestens 200 bar, in Tankstellen sind sogar bis zu 1000 bar möglich) oder gelegentlich durch die kryogene Lagerung von Wasserstoff in flüssiger Form bei sehr niedrigen Temperaturen (unter 20 Kelvin) erreicht. Beide Technologien sind anspruchsvoll in der Anwendung. Eine weitere Herausforderung bei der Wasserstoffspeicherung besteht darin, die Investitionskosten zu reduzieren, ohne die Sicherheit zu gefährden. Wenn jedoch eine geeignete Gestaltung gewährleistet ist, erweist sich die Speicherung von Energie in Form von Wasserstoff im Vergleich zu anderen Technologien wie Batterien oder Pumpspeicherkraftwerken als relativ kostengünstige Option.

Besonders relevant für die Region Chemnitz ist die Druckspeicherung von Wasserstoff je nach Mengenanforderung im Flaschenbündel, Großzylinder oder MEGC. Zusätzlich sind in Sachsen Technologien zur Wasserstoffspeicherung mit einem festen Trägermedium (z.B. Eisenoxid, Magnesiumhydrid-Pulver²) und ein marktreifes Verfahren zur Speicherung mit einem flüssigen Trägermedium (synthetisches Benzin CAC Synfuel) bekannt. Zum Thema Flüssigwasserstoff forscht das HyLiq-Konsortium (TU Dresden, IFW Dresden und HTW Dresden). Über die Grenzen der Projektregion hinaus gibt es Untersuchungen zur Unterspeicherung von Wasserstoff in Bad Lauchstädt.

Im Anhang finden Sie Technologie-Steckbriefe, welche alle Technologien gesamthaft aufführen.

² „Powerpaste“ – eine Erfindung des Fraunhofer IFAM

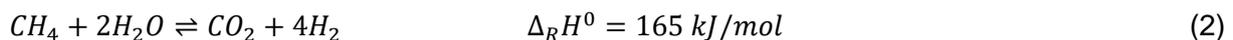
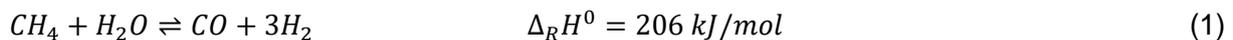
4.6 Stand der Technik alternative H₂-Erzeugungsverfahren

Die Herstellung von Wasserstoff ist aktuell durch Nutzung fossiler Energieträger in Verfahren, die im industriellen Maßstab verfügbar sind und den Stand der Technik darstellen, geprägt. Das primäre Erzeugungsverfahren ist die Reformierung von Methan, basierend auf Erdgas, welche etwa 47 % der weltweiten Erzeugung darstellt, weitere 27 % stammen aus der Kohlevergasung sowie 22 % aus der Erdölverarbeitung als Nebenprodukt [11]. Auch die bereits beschriebene Elektrolyse gewinnt zunehmend an Bedeutung.

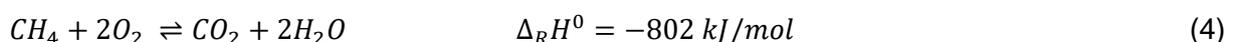
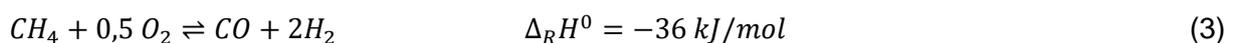
Neben diesen etablierten Verfahren existieren allerdings auch weitere Optionen zur H₂-Erzeugung, die teilweise auf den bekannten Verfahren basieren, aber regenerative oder alternative Energieträger einsetzen, sowie Verfahren, die eine andere technische Basis aufweisen.

4.6.1 Reformierung auf Basis biogener Gase

Wie einleitend erwähnt, ist die Reformierung von Erdgas aktuell wichtigster Herstellungsprozess für Wasserstoff. Die im Erdgas enthaltenen Kohlenwasserstoffe, insbesondere Methan, werden dabei bei hohen Temperaturen in einer endothermen Reaktion mit Wasserdampf zu Wasserstoff und Kohlenmonoxid bzw. -dioxid umgesetzt, siehe Gleichung (1)-(2), (Dampfreformierung) [12, 13].



Die Bereitstellung von benötigtem Temperaturniveau und Reaktionswärme erfordert eine aktive Beheizung, z.B. durch Verbrennung von Erdgas. Um die Beheizung des Reformers zu vermeiden, kann dem Erdgas-Wasserdampfgemisch auch Sauerstoff zugemischt werden (autotherme Reformierung), sodass auch exotherme Reaktionen ablaufen, Gleichung (3)-(4) [12, 13].



Aufgrund der industriellen Anwendung der Reformierungsverfahren, insbesondere in Verschaltung mit Nachfolgeprozessen wie der Ammoniak- oder Methanolsynthese, und der

guten Verfügbarkeit von Erdgas findet die Reformierung überwiegend im großindustriellen Maßstab Anwendung. Erzeugungskapazitäten bis >100.000 m³/h Wasserstoff sind möglich [14]. Neben Erdgas ist die Dampfreformierung prinzipiell auch zur Umsetzung anderer kohlenstoffhaltiger Gase bzw. methanhaltiger biogener Gase geeignet [15].

Hinsichtlich des Einsatzes biogener Gase besteht jedoch noch Entwicklungsbedarf. Da biogene Gase zumeist in geringeren Mengen als Erdgas zur Verfügung stehen, ist ein Downscaling der auf Großanlagen ausgerichteten Reformer und Nebenanlagen erforderlich. Hinzu kommt die Qualität der eingesetzten Gase, die durch variierenden Gaszusammensetzungen (Methangehalt) und enthaltene Störstoffe (z.B. Schwefelverbindungen) abweichende Anforderungen bedingt, insbesondere bei direkter Nutzung von Biogas. Hierbei müssen die Prozesse jedoch an die insb. höheren CO₂-Gehalte im Gas angepasst und das Biogas zumindest von Katalysatorgiften wie Schwefelverbindungen befreit sein [15]. Eine Anwendung kann standortspezifisch sinnvoll sein und insb. hinsichtlich einer möglichen Umstellung des Erdgasnetzes auf Wasserstoff an Bedeutung gewinnen. Hersteller bzw. Anbieter für Reformierungsanlagen, die für den direkten Einsatz von Biogas geeignet sind, sind bekannt u.a. die WS Reformer GmbH oder die HELBIO S.A. [16, 17], jedoch überwiegt aktuell der Anteil an Entwicklungsvorhaben [18–21].

Erfolgt eine Aufbereitung des Biogases zu Biomethan, ist angesichts der erdgasähnlichen Eigenschaften ein Einsatz in Reformern, welche für Erdgas projektiert sind, möglich und es finden sich mehrere Anbieter von entsprechend geeigneten Anlagen. Aktiv in diesem Feld sind u.a. Haldor Topsøe, H2Gen Innovations, HyGear, Caloric Anlagenbau GmbH, Mahler AGS GmbH, Air Liquide Engineering & Construction.

4.6.2 Thermo-chemische Nutzung von Klärschlamm

Als Nebenprodukt der Abwasserbehandlung fällt Klärschlamm zunächst als Abfallprodukt an, welcher in Deutschland zu einem großen Teil der thermischen Verwertung in Form der Verbrennung zugeführt wird, sowie in der Landwirtschaft und Landschaftsbau Verwendung findet [22]. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit Klärschlämme weitergehend nutzbar zu machen z.B. für die Rückgewinnung von Phosphor sowie zur Herstellung von Wasserstoff über thermo-chemische Verfahren.

Während die thermo-chemische Nutzung von Biomassen bereits Stand der Technik ist, finden sich im Kontext der H₂-Gewinnung aus Klärschlamm verschiedene in Entwicklung befindliche Verfahren. Zur thermo-chemischen Nutzung zählen zunächst die Verfahren der Vergasung und Pyrolyse. Bei der Vergasung wird der Einsatzstoff bei hohen Temperaturen und bevorzugt niedrigen Drücken in Gegenwart eines Oxidationsmittels, wie z.B. Sauerstoff oder

Wasserdampf, umgesetzt, wobei es zur Entstehung eines brennbaren Gasgemisches aus CO, H₂, CH₄ und weiteren Gasen kommt. Die Pyrolyse hingegen findet bei hohen Temperaturen, unter Sauerstoffabschluss statt. Hierbei entsteht neben Koks und Pyrolyseöl ebenfalls ein wasserstoffhaltiges Gasgemisch.

Die Produktgase aus beiden Verfahren können zur H₂-Gewinnung genutzt werden, wozu eine weitergehende Aufbereitung nötig ist, je nach Gaszusammensetzung ist dies zunächst eine Reformierung und Shift-Reaktion, welche den Wasserstoffanteil weiter erhöht sowie eine Abtrennung des Wasserstoffes, um diesen in hoher Reinheit zu gewinnen. Diese Schritte sind angesichts der weiteren Gasbestandteile, z.B. höhere Kohlenwasserstoffe, Schwefelverbindungen o.ä., technisch anspruchsvoll. Entsprechende Ansätze sind aber bekannt bzw. zumindest in Entwicklung. Der erreichbare Wasserstofftrag ist dabei stark von Verfahrensansatz und eingesetzten Biomassen abhängig. Für Biomasse verarbeitenden Verfahren finden sich Orientierungswerte verschiedener Anbieter für die Produktion von Wasserstoff im Bereich von 0,04 – 0,1 kg/kg Biomassesubstrat. Die als Nebenprodukt der thermo-chemischen Umsetzung entstehenden Aschen bzw. Schlacken können ebenfalls weiter zur Rohstoffrückgewinnung behandelt oder deponiert werden [23].

Ein weiteres Verfahren der thermo-chemischen Nutzung ist die überkritische Gaserzeugung aus Klärschlamm. Hierbei erfolgt die Spaltung des organischen Materials mit überkritischem H₂O. Wie bei den bereits beschriebenen Verfahren wird zunächst ein Synthesegas erzeugt, welches entsprechend aufbereitet werden muss, um reinen Wasserstoff zu gewinnen. Als weitere Nebenprodukte lassen sich mineralische Bestandteile und Phosphor gewinnen, welche ebenfalls nutzbar gemacht werden können [24]. Ein entsprechendes Verfahren wird momentan hinsichtlich der Umsetzung von Biomasse erprobt [25].

Die Nutzung von Klärschlamm zur Erzeugung von Wasserstoff ist technisch möglich, hängt aber stark von ökonomischen Faktoren sowie den örtlichen Gegebenheiten ab. Weitere Einflussfaktoren bestehen in gesetzlichen Regelungen und Zielsetzungen, z.B. bzgl. Phosphorrückgewinnung oder energetischer Unabhängigkeit. Die Möglichkeiten zur Wasserstofferzeugung aus Klärschlamm sind somit standortspezifisch zu bewerten.

4.6.3 Methanpyrolyse

Als Methanpyrolyse wird die thermische Zersetzung von Methan in Wasserstoff und festen Kohlenstoff nach Gleichung (5) bezeichnet [26]. Technische Ansätze und Verfahren zur Methanpyrolyse sind schon seit längerer Zeit bekannt und werden auch vor allem zur Herstellung von Kohlenstoffpartikeln sogenannten Carbon Blacks, vgl. Abbildung 8, eingesetzt. Die gezielte Gewinnung von CO₂-armem Wasserstoff kann entsprechend als neuere Entwicklung angesehen werden. Generell handelt es sich um einen Hochtemperaturprozess, der bei Temperaturen von über 1000 °C abläuft. Dies zieht zum einen hohe Ansprüche an verwendete Materialien nach sich, als auch einen relativ hohen Energieverbrauch [26, 27].

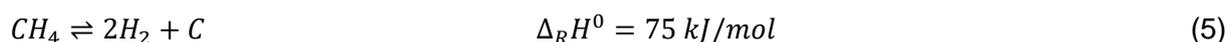


Abbildung 8: Carbon Black als Nebenprodukt der Methanpyrolyse

Für die technische Umsetzung der Methanpyrolyse existieren verschiedene Ansätze, welche wiederum verschiedene Entwicklungsstände aufweisen. Einzelne Verfahren unterscheiden sich hauptsächlich in der Art und Weise, wie die für die Reaktion notwendige Energie eingebracht wird und in der Abtrennung des Kohlenstoffes, in letzterem liegt ebenfalls die größte Herausforderung dieser Verfahren da Kohlenstoffablagerungen einen negativen Einfluss haben können [27].

Rein thermische Verfahren sind vom Aufbau her am einfachsten und bringen die Wärme direkt über die Reaktorwand ein. Probleme bestehen hier vor allem durch die Ablagerung von Kohlenstoff die zur Verschlechterung des Wärmeübergangs und zum Verstopfen des Reaktors führt [28]. Die Nutzung von Katalysatoren um die notwendige Reaktionstemperatur zu verringern ist möglich, erweist sich aber generell als schwierig, da es durch die Kohlenstoffablagerungen zu einer Deaktivierung der Katalysatoren kommt und diese nach

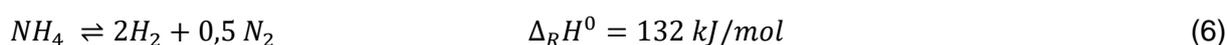
kurzer Zeit getauscht werden müssten [29–31]. Konzepte für die Verwendung von katalytischem Material, welches nach Prozessende verworfen wird, sind in Entwicklung, aber stark von der Verfügbarkeit des „Katalysators“ abhängig [32]. Als Option zur Abtrennung des Kohlenstoffes, ohne dass es zu Ablagerungen kommt, werden Verfahren mit flüssigen Medien angesehen [33]. Hierbei wird Methan bzw. Erdgas durch eine Salz- oder Metallschmelze geleitet und durch Kontakt mit dem heißen Medium zur Reaktion gebracht. Der entstehende feste Kohlenstoff lässt sich durch den Dichteunterschied zum flüssigen Medium einfacher abtrennen [33, 34].

Als am weitesten entwickelte Verfahren können die Feststoff- sowie Plasmaverfahren angesehen werden. Feststoffverfahren verwenden Partikel u.a. Kohlenstoffschüttungen, die zum Wärmeeintrag genutzt werden, aber auch als „Keimpartikel“ dienen, auf denen sich primär der Kohlenstoff ablagert. In einem von der BASF entwickelten Verfahren wird ein Wanderbett aus Kohlenstoffpartikeln im Gegenstrom zum Gas geführt und so ein kontinuierlicher Prozess ermöglicht [35, 36]. Plasmaprozesse nutzen für den Energieeintrag ins Gas entweder thermisches oder nicht thermisches Plasma zur Spaltung des Methans. Ersteres wird aufgrund der spürbaren Wärme, zumeist erzeugt durch einen Lichtbogen, als Hochtemperaturprozess gesehen, während Prozesse, die nicht-thermisches Plasma verwenden, bei bedeutend niedrigeren Temperaturen arbeiten [37–39]. Nah an der industriellen Anwendung finden sich insbesondere Anbieter, welche thermisches Plasma nutzen [40], während Anbieter hinsichtlich nicht-thermischen Plasmen zumeist noch im Bereich Forschung und Entwicklung zu finden sind [27, 41–43]. Unter den Akteuren im Bereich Methanpyrolyse finden sich beispielsweise die Monolith Inc., BASF, H2Plas GmbH, Hazer Group Ltd sowie HiiROC Limited.

Ein großer Teil der beschriebenen Pyrolyseverfahren zielt auf die großtechnische Umsetzung von Methan bzw. Erdgas ab, eine Umsetzung von z.B. in Biogas enthaltenen Methan ist denkbar. Eine Einstufung des erzeugten Wasserstoffes ist abhängig des Einsatzstoffs und der Herkunft der genutzten elektrischen Energie zu treffen.

4.6.4 Plasmalyse von Schmutzwasser

Unter der Bezeichnung Plasmalyse findet sich ein plasmabasiertes Verfahren zur Abwasserreinigung bei dem Wasserstoff als Produkt entsteht. Die im Abwasser enthaltenen organischen Verbindungen werden mit Hilfe eines Plasmas gespalten, hierbei zielt das Verfahren insbesondere auf Ammonium ab welches nach Gleichung (6) die Spaltprodukte Wasserstoff und Stickstoff liefert [44, 45].



Laut Anbieterangaben ist dieses Verfahren insbesondere für Schlammwasser aus Kläranlagen oder Gülle aus Biogasanlagen geeignet, da hier größere Mengen an organischen Verbindungen zu finden sind [46]. Eingesetzt wird das Verfahren der Graforce GmbH im Pilotmaßstab an Kläranlagen und wird ebenfalls angeboten von der Synreform GmbH [47, 48].

4.6.5 Kombination mit thermischer Abfallbeseitigung

Die Verbrennung von Siedlungs- und Sonderabfällen ist in Deutschland Stand der Technik und einer der Hauptentsorgungswege für Abfälle. Die Verbrennung findet zum einen in eigens dafür zur Verfügung stehenden Abfallverbrennungsanlagen oder als Mitverbrennung in Kohlekraftwerken statt. Insbesondere die Abfallverbrennungsanlagen nutzen die hierbei entstehende Abwärme zur Energieerzeugung in Form von Dampf. Dieser Dampf kann entweder als Wärmequelle, z.B. Fernwärme, oder in einem weiteren Schritt über eine Dampfturbine zur Bereitstellung elektrischer Energie genutzt werden. In den meisten Fällen wird diese Energie zur Abdeckung des Eigenverbrauchs genutzt sowie der Überschuss ins Netz eingespeist [22].

Die Nutzbarmachung der möglicherweise überschüssigen elektrischen Energie zur Erzeugung von Wasserstoff über Elektrolyse ist möglich. Eine Anwendbarkeit ergibt sich hier jedoch hauptsächlich aus ökonomischen Gesichtspunkten wie Einspeisevergütung und Menge der überschüssigen elektrischen Energie. Ein weiterer Aspekt hinsichtlich der Nutzung ist die Einstufung als Orangener Wasserstoff [49], verbunden mit Fragestellungen zur emissionsrechtlichen Betrachtung.

4.6.6 Bewertung der alternativen H₂-Erzeugungsverfahren hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit

Für die Erzeugung von Wasserstoff existieren neben der etablierten Reformierung von Erdgas sowie der Elektrolyse weitere alternative Verfahren. Diese unterscheiden sich im Entwicklungsstand und können insbesondere im Hinblick auf den Einsatz von Biomasse als Ausgangsstoff dem Bereich FuE zugeordnet werden.

Technisch gesehen sind die Verfahren zur Reformierung biogener Gase sowie der Pyrolyse und Vergasung von Biomassen aufgrund ihrer Ähnlichkeit zum Stand der Technik am relevantesten für einen absehbaren Einsatz. Methanpyrolyse und Plasmapyrolyse erfordern weitere Entwicklungsarbeiten.

Neben der technischen Verfügbarkeit sind für die Anwendbarkeit ökonomische und logistische Faktoren bedeutend. Besonders deutlich wird dies an der Kombination der H₂-Erzeugung mit der thermischen Abfallbeseitigung. Hier spielt die Vermarktbarkeit der erzeugten elektrischen

Energie eine wichtige Rolle, inwiefern diese für die H₂-Erzeugung oder Abgabe ans Stromnetz verwendet wird. Dezentral anfallende Ausgangsstoffe wie Klärschlamm oder Biogas erfordern ggf. ebenfalls eine dezentrale Errichtung von Anlagen.

Für die Anwendbarkeit der technisch verfügbaren H₂-Erzeugungsverfahren ist in jedem Einzelfall die Wirtschaftlichkeit als Haupteinflussfaktor zu prüfen. Darüber hinaus sind individuelle Standortfaktoren wie Verfügbarkeit von Ressourcen oder Infrastruktur zu beachten.

4.7 Nutzungsmöglichkeiten von Grau- statt Frischwasser im Rahmen der Elektrolyse

Neben der erforderlichen elektrischen Energie erfordert die Herstellung von Wasserstoff über Elektrolyse die Bereitstellung von Wasser als Ausgangsstoff. Da mit bis zu 10 Litern Wasser zur Herstellung von einem Kilogramm Wasserstoff zu rechnen ist, ergibt sich aus der Verfügbarkeit und den Kosten für das Wasser ein ökonomisch relevanter Punkt [50].

Störstoffe im Wasser führen zu einer verringerten Leistung oder zu Schäden an den Elektrolyseuren [51], anbieterseitig wird daher für die Elektrolyse deionisiertes Wasser (VE-Wasser) oder Wasser mit höherer Qualität gefordert [42–44]. Hierbei handelt es sich um Wasser, welches aufbereitet und z.B. mittels Ionentauschern von gelösten Ionen befreit wurde. Neben Grenzwerten für Partikel und organische Verbindungen wird eine niedrige Leitfähigkeit von z.B. 1 µS vorgegeben [50, 52]. Es wird somit eine entsprechend aufwendige Wasseraufbereitung benötigt. Während eine Verwendung und Aufbereitung von Oberflächenwasser und Meerwasser diskutiert wird, spielt der Begriff Grauwasser in diesem Zusammenhang bisher keine Rolle [50, 53]. Als Grauwasser wird Abwasser bezeichnet, welches durch Duschen, Baden oder Händewaschen nur leicht verschmutzt wird und nicht mit Fäkalien belastet ist. Da ähnlich wie bei der Nutzung von Oberflächenwasser bzw. Seewasser für Grauwasser ebenfalls eine Aufbereitung notwendig ist, spricht aus technologischer Sicht zunächst nichts gegen eine Verwendung. Der erforderliche Aufbereitungsaufwand ist im Einzelfall abzuwägen. Ein größeres Problem stellt die Bereitstellung dar, da Grauwasser über ein separates Leitungssystem in Gebäuden bzw. Kommunen gesammelt werden müsste. Im Gebäudebestand ist ein solches separates Leitungssystem kaum vorzufinden, entsprechend ist die Versorgung größerer Elektrolyseure schwierig und ggf. auch nicht ökonomisch darstellbar.



4.8 Strombezugskriterien für die Herstellung von grünem Wasserstoff im Verkehrssektor

Am 10.02.2023 wurden nach einer Verzögerung von über einem Jahr zwei delegierte Rechtsakte zur Erneuerbare-Energien-Richtlinie (RED II) veröffentlicht.

Der **delegierte Rechtsakt der Europäischen Kommission zu Artikel 27 Abs. 3 UAbs. 7 REDII (DA 1)** [54] definiert die Anforderungen für den Strombezug zur Erzeugung von „Renewable Fuels of Non-Biological Origin“ (RFNBOs) im Verkehrssektor, worunter auch grüner Wasserstoff zu fassen ist. Die wichtigsten Nachhaltigkeitskriterien für die Wasserstoffherzeugung in Elektrolyseanlagen und den bezogenen erneuerbaren Strom sind:

Direktverbindung: Gemäß Art. 3 DA 1 muss die Elektrolyse entweder in derselben Anlage wie die Stromproduktion aus erneuerbaren Energien stattfinden oder eine Direktleitung zwischen der Wasserstoffherzeugungsanlage und der Stromerzeugungsanlage bestehen. Falls die Elektrolyseanlage mit dem Stromnetz verbunden ist, muss über Smart Meter nachgewiesen werden, dass kein Strom aus dem Stromnetz für die Elektrolyse entnommen wurde. Eine Ausnahme hiervon bildet der Einsatz von an anderer Stelle selbst erzeugtem oder über ein **Power Purchase Agreement (PPA)** bezogenem, erneuerbarem Strom.

Gemäß Art. 4 DA 1 gilt als erneuerbarer Strom solcher, den der Betreiber des Elektrolyseurs entweder selbst erzeugt oder über ein **Power Purchase Agreement (PPA)** von einem Betreiber einer Erneuerbare-Energien-Anlage aus dem Netz bezieht.

Zusätzlichkeit (Art 4. DA 1): Die Erneuerbare-Energien-Anlage darf nicht früher als 36 Monate vor dem Elektrolyseur in Betrieb genommen worden sein und darf keine Beihilfen für Bau und Betrieb erhalten haben. Es gibt jedoch eine Ausnahmeregelung für Elektrolyseure, welche bis zum 1. Januar 2028 in Betrieb genommen wurden: diese sind von diesen Anforderungen für maximal 10 Jahre, namentlich bis zum 1. Januar 2038, befreit. Diese Ausnahme gilt nicht für Kapazitätserweiterungen nach dem 1. Januar 2028. Dabei müssen die folgenden zwei Voraussetzungen erfüllt sein:

Zeitliche Korrelation: Ab 2030 erzeugte Renewable Fuels of Non-Biological Origin (RFNBOs) müssen innerhalb derselben Stunde erzeugt werden wie der eingesetzte erneuerbare Strom. Der Strom kann auch einem neuen Stromspeicher entnommen werden, der sich am selben Netzanschlusspunkt wie der Elektrolyseur befindet und innerhalb derselben Stunde geladen wurde, in der der bezogene erneuerbare Strom produziert wurde.

Geografischen Korrelation: Der Elektrolyseur und die Erneuerbare-Energien-Anlage müssen zum Zeitpunkt ihrer Inbetriebnahme in derselben Stromgebotszone liegen. Angrenzende

Gebotszonen sind ebenfalls akzeptabel, vorausgesetzt, der Day-ahead-Strompreis in der Gebotszone der Erneuerbare-Energien-Anlage entspricht mindestens dem Preis in der Stromgebotszone in der sich der Elektrolyseur befindet. Es besteht auch die Möglichkeit, dass die Erneuerbare-Energien-Anlage sich in einer angrenzenden Offshore-Stromgebotszone befindet. Gegenwärtig besteht Deutschland aus nur einer Stromgebotszone, allerdings gibt es eine lebendige politische Diskussion über die Aufspaltung in mehrere Stromgebotszonen.

Der **delegierte Rechtsakt der Europäischen Kommission zu Artikel 25 Absatz 2 und Artikel 28 Abs. 5 RED II (DA 2)** [55] enthält die Methode zur Berechnung der Treibhausgasemissionen und setzt das Ziel der Treibhausgaseinsparungen um. Nach Art. 25 Abs. 1 S. 1 RED II soll der Anteil erneuerbarer Energie am **Endenergieverbrauch des Verkehrssektors bis 2030 mindestens 14 %** betragen.

Außerdem sind **Einsparungen von mindestens 70 % Treibhausgasen** bei RFNBOs ab dem 1. Januar 2021, im Vergleich zu den zu ersetzenden Kraftstoffen, erforderlich. Die Berechnung der Treibhausgasemissionen umfasst den gesamten Lebenszyklus der RFNBOs, von der Erzeugung bis zum Endverbraucher, unter Ausschluss von Emissionen aus der Herstellung von Maschinen und Zubehör (vgl. Anhang A.1 DA 2).

Ein wichtiger Aspekt bei der Herstellung von RFNBOs aus erneuerbarem H₂ ist die Bewertung des verwendeten CO₂. Der Anhang des DA 2 legt Bedingungen fest, unter denen abgeschiedenes CO₂ als vermiedene Treibhausgasemission betrachtet werden kann, was seine Nutzung bei der RFNBO-Produktion ermöglicht. Dies betrifft CO₂ aus industriellen Prozessen, die bis 2036 in einem Emissionshandelssystem erfasst sind aus Luftabscheidung aus der Produktion oder Verbrennung von nachhaltigen Biobrennstoffen oder Biomasse (ohne Treibhausgaseinsparungs-Gutschriften) aus der Verbrennung von RFNBOs, die den DA 2-Kriterien entsprechen aus geologischer Herkunft.

Die Umsetzung der Vorgaben der RED II erfolgt in Deutschland durch Änderungen der **37. Bundes-Immissionsschutz-Verordnung (BImSchV)**. Die Novellierung der 37. BImSchV soll zum 01.01.24 in Kraft treten.

Die Strombezugskriterien zur Herstellung von „erneuerbaren Kraftstoffen nicht-biogenen Ursprungs“ (Deutscher Begriff für „RFNBOs“ für die wird die Delegierten Rechtsakte DA 1 und DA 2 voraussichtlich 1:1 umsetzen. Der deutsche Gesetzgeber wird zu diesem Zweck das Instrument der THG-Quote weiterentwickeln. Ein Referentenentwurf zur Novellierung der 37. BImSchV liegt bereits vor [56].

So kann nach § 5 Abs. 37. BImSchV „Strom zur Herstellung von erneuerbaren Kraftstoffen nicht-biogenen Ursprungs, der aus dem Netz entnommen wird, [...] als vollständig erneuerbar



angerechnet werden [...]“, wenn sich die Vorgaben der Nachhaltigkeitskriterien der Direktverbindung (vgl. §4 37. BImSchV), die zeitliche Korrelation (§ 5 Abs. 1 (2) 37. BImSchV), und die geografische Korrelation (vgl. § 5 Abs. 1 (3) 37. BImSchV) einhalten lassen.

Als wichtiger zusätzlicher Investitionsanreiz sollen die Treibhausgasemissionen der erneuerbaren Kraftstoffe nicht-biogenen Ursprungs nach § 3 Abs. 4 BImSchV durch Multiplikation der energetischen Menge des erneuerbaren Kraftstoffs nicht-biogenen Ursprungs mit dem Faktor 3 angerechnet werden.

Derzeit wird der Referentenentwurf in zahlreichen Gremien diskutiert und Stellungnahmen eingeholt. Ob und welche Anpassungen gegebenenfalls vorgenommen werden müssen, bleibt abzuwarten. Die Frist zur Stellungnahme endet zum 01.09.23.

4.9 Rechtliche Rahmenbedingungen / Genehmigungsverfahren

Der folgende Bericht gliedert sich in die 5 Bereiche der Genehmigung von Erzeugungsanlagen, Leitungen, Speicher, Tankstellen und Fahrzeuge. Eine Grobübersicht der Ergebnisse ist in der folgenden Abbildung zusammengefasst, Details sind in den folgenden Abschnitten erläutert.

Erzeugungsanlagen	Leitungen	Speicher	Tankstellen	Fahrzeuge
<p>Planfeststellung/Plangenehmigung Großvorhaben zur Verbindung von Infrastrukturen, UVP-pflichtig, mit OB</p> <p>Immissionsschutzrechtliches Genehmigungsverfahren Erzeugung im „industriellen Umfang“, ggf. UVP formelles Verfahren mit OB</p> <p>Erlaubnis nach Betriebssicherheitsverordnung keine Erzeugung im „industriellen Umfang“, Forschungsanlage</p> <p>Baugenehmigung sehr kleine Anlagen, Forschungsanlage</p>	<p>Raumordnungsverfahren Neubau mit DN > 300 mm, die raumbedeutsam ist</p> <p>Planfeststellung Neubau mit DN > 800 mm, UVP-pflichtig, mit OB</p> <p>Plangenehmigung Neubau, DN < 300 mm</p> <p>fakultative Planfeststellung Neubau mit DN < 300 mm</p> <p>Sicherheitstechnisches Anzeigeverfahren Umstellung Erdgasleitung</p> <p>Energierightliches Anzeigeverfahren Umstellung Erdgasleitung und unwesentliche bauliche/technische Änderungen / Erweiterungen</p>	<p>Immissionsschutzrechtliches Genehmigungsverfahren vereinfacht: oberirdische Speicherung > 3 t</p> <p>formell: oberirdische Speicherung > 30 t, ggf. UVP mit OB</p> <p>Erlaubnis nach Betriebssicherheitsverordnung und Baugenehmigung oberirdische Speicherung < 3 t</p> <p>Bergrechtliches Genehmigungsverfahren unterirdische Speicherung des Wasserstoffs</p>	<p>Planfeststellung nach § 18 Allgemeines Eisenbahngesetz, Eisenbahntankstelle</p> <p>Immissionsschutzrechtliches Genehmigungsverfahren H₂-Station – Gasfüllanlage mit eigener Produktion des Wasserstoffs vor Ort, Speicherung > 3 t</p> <p>Erlaubnis nach Betriebssicherheitsverordnung und Baugenehmigung H₂-Liefertankstelle – Gasfüllanlage ohne eigene Produktion des Wasserstoffs vor Ort, Speicherung < 3 t</p>	<p>Keine Anwendbarkeit klassischer Genehmigungsverfahren (Planfeststellung, Baugenehmigung, etc.)</p> <p>Schienefahrzeuge <u>europ.:</u> 4. Eisenbahnpaket <u>national:</u> Eisenbahn-Inbetriebnahme-genehmigungs-verordnung (Länge, Maße, etc.; Betreiberlaubnis/-bewilligung)</p> <p>Straßenfahrzeuge <u>europ.:</u> Richtlinie 96/53/EG, Richtlinie 2009/30/EG, Richtlinie 2014/94/EU <u>national:</u> Straßenverkehrs-(Zulassungs)-Ordnung, Verordnung über die Zulassung von Fahrzeugen zum Straßenverkehr</p>

Abbildung 9: Übersicht rechtliche Rahmenbedingungen

4.9.1 A: Genehmigung von Erzeugungsanlagen

Im Folgenden werden die möglichen Genehmigungsverfahren, die für die Errichtung von H₂-Erzeugungsanlagen Anwendung finden können, kurz erläutert. Bei der Kurzbeschreibung der Verfahren wird jeweils auf den Ablauf, die Dauer bzw. Fristen, die notwendigen Unterlagen und die zuständige Behörde für die Region Chemnitz eingegangen sowie ein Anwendungsbeispiel genannt.

Das jeweils höherrangige Verfahren schließt dabei die anderen Verfahren mit ein (Konzentrationswirkung). Das heißt, im Planfeststellungsverfahren sind die immissionsschutzrechtliche Genehmigung, die Erlaubnis nach Betriebssicherheitsverordnung und die Baugenehmigung einkonzentriert, werden von einer Behörde koordiniert und der Antragsteller muss keine Einzelgenehmigungen einholen. Im Gegensatz dazu ist bei der Baugenehmigung keine weitere Genehmigung eingeschlossen und der Antragsteller muss sich um alle weiteren einzuholenden Genehmigungen (z.B. naturschutzrechtliche Belange) selbst kümmern.

In den meisten Fällen findet das immissionsschutzrechtliche Genehmigungsverfahren (§ 4 BImSchG i.V.m. Nr. 4.1.12 Anhang 1 der 4. BImSchV) für H₂-Erzeugungsanlagen Anwendung. Die gängige Behördenpraxis stuft H₂-Erzeugungsanlagen, die Wasserstoff im industriellen Umfang herstellen, als Industrieemissionsanlage (IE-Anlage) nach der europäischen IE-Richtlinie [57] ein und fordert ein förmliches Genehmigungsverfahren mit Öffentlichkeitsbeteiligung (ÖB).

Planfeststellungs- und Plangenehmigungsverfahren (Bsp.: Großvorhaben zur Verbindung von Strom- und Gasinfrastrukturen und PtG-Anlagen in Schienennähe zur Versorgung von Zügen)

Ablauf:

Der Ablauf des Planfeststellungs- und Plangenehmigungsverfahrens wird in den §§ 72 und 78 des Verwaltungsverfahrensgesetzes (VwVfG) geregelt. Das Planfeststellungsverfahren ist UVP-pflichtig, d.h. eine Öffentlichkeitsbeteiligung (ÖB) ist zwingend. Der wesentliche Unterschied der Plangenehmigung ist, dass es dort keine ÖB gibt.

Dauer:

Die Dauer reicht von mehreren Monaten bis zu 2 Jahren (Plangenehmigung ohne ÖB, daher kürzer).

Unterlagen:

u.a. Planunterlagen laut § 73 Abs. 1 VwVfG, Erläuterungsbericht, Übersichtskarten und Lagepläne, Unterlagen zu wasserrechtlichen Sachverhalten, Grunderwerbspläne, Grundstücksverzeichnis, Gutachten, spezielle Bauwerkspläne

Zuständige Behörde: Landesdirektion Sachsen, Referat 32 – Planfeststellung [58]

Immissionsschutzrechtliches Genehmigungsverfahren (Bsp.: kommerzielle/gewerblich genutzte Anlage, Erzeugung im industriellen Umfang)

Ablauf:

Der Ablauf ist in § 10 BImSchG festgelegt. Zu Beginn wird ein Scoping-Termin (Feststellung UVP-Pflicht) durchgeführt. Dann folgen das Vorgespräch und anschließend die Erarbeitung und Einreichung der Antragsunterlagen (ggf. Ergänzung). Nun können die Fachbehörden ihre Stellungnahme einreichen und nachfolgend werden der Antrag und die Einwendungen durch die Behörde geprüft. Den Abschluss bildet der Genehmigungsbescheid. Es gibt zwei verschiedene Genehmigungsverfahren. Das förmliche Genehmigungsverfahren findet mit ÖB statt (d.h. öffentliche Bekanntmachung, Auslegung der Unterlagen und Erörterungstermin). Das vereinfachte Genehmigungsverfahren ist ohne ÖB.

Unterlagen:

u.a. Antrag, Anlagenbeschreibung, Fließbilder, Stoffliste, Emissionsquellen und -daten, Lärmgutachten, Schallgutachten, Schutzkonzept, Ausgangszustandsbericht (bei Einstufung als IE-Anlage, Arbeitshilfe [59])

Fristen:

Vollständigkeitsprüfung – 1 Monat, Auslegungsfrist – 1 Monat (nur förmliches V.), Einwendungsfrist – 2 Wochen bzw. 1 Monat (IE-Anlage und UVP-Pflicht) nach Ablauf Auslegungsfrist (nur förmliches Verfahren), Entscheidung über Genehmigungsantrag – 7 Monate nach Antragseingang beim förmlichen Verfahren und 3 Monate beim vereinfachten Verfahren (ggf. Verlängerung um 3 Monate), Widerspruchsfrist – 1 Monat

Zuständige Behörde:

Landesdirektion Sachsen, Referat 44 – Immissionsschutz [60]

Erlaubnisverfahren nach Betriebssicherheitsverordnung (Bsp.: Kein industrieller Umfang, Forschungsanlage)

Ablauf:

Einreichen des Antrags auf Erlaubnis bei Erlaubnisbehörde, Entscheidung über den Antrag; Entscheidungsbaum zur Einstufung als Energieanlage oder überwachungsbedürftige Anlage im Technischen Leitfaden PORTAL GREEN (Kap. 3.2.1, S. 25) [61].

Unterlagen:

Antrag auf Erlaubnis (§ 18 Abs. 3 BetrSichV), Prüfbericht der ZÜS, Gefährdungsbeurteilung, Ex-Schutzdokument, Risikobeurteilung

Erlaubnispflichtige Anlage: zusätzlich Unterlagen nach LV 49 /LAS 17/ des LASI [62]

Fristen: Entscheidung über den Antrag bis 3 Monate nach Eingang aller Unterlagen

Zuständige Behörde: Landesdirektion Sachsen, Referat 54 – Betriebssicherheit [63]

Baugenehmigung (Bsp.: sehr kleine Anlagen, kein industrieller Umfang, Forschungsanlage)

Zulässigkeit:

Zuerst wird die bauplanungsrechtliche Zulässigkeit geprüft, also ob das Vorhaben an einem bestimmten Standort zulässig ist. Gibt es hierzu Unsicherheit kann der Vorhabenträger ggf. einen Bauvorbescheid zur bauplanungsrechtlichen Zulässigkeit beantragen, § 75 MBO. Drei Bereiche sind zu unterscheiden: beplanter Innenbereich, „unbeplanter“ Innenbereich und Außenbereich. Im beplanten Innenbereich ist ein Vorhaben zulässig, sofern es den Festsetzungen im Bebauungsplan nicht widerspricht und die Erschließung gesichert ist, § 30 BauGB. In den meisten Fällen ist eine PtG-Anlage im Industriegebiet zulässig, im Gewerbegebiet kann es Einschränkungen geben, im Mischgebiet kann sie in bestimmten/besonderen Fällen zulässig sein und im Kerngebiet ist es eher unwahrscheinlich, jedoch nicht ausgeschlossen. Der Außenbereich soll von Bebauung weitestgehend freigehalten werden. Bauvorhaben im Außenbereich können jedoch in Sonderfällen zulässig sein, sofern das Vorhaben nach § 35 Abs. 2 BauGB privilegiert ist, öffentliche Belange nicht entgegenstehen und die Erschließung gesichert ist.

Ablauf:

Der Antragsteller reicht bei der zuständigen Behörde eine Bauvoranfrage zur Entscheidung über die bauplanungsrechtliche Zulässigkeit ein. Die Behörde übergibt den Vorbescheid zur Bauanfrage. Der Vorhabenträger reicht anschließend den Bauantrag inklusive der

erforderlichen Unterlagen ein. Die Behörde prüft den Antrag und holt Stellungnahmen ein. Bei offenen Fragen wird eine Bauverhandlung durch die Behörde initiiert. Wenn alle Genehmigungen vorliegen, wird die Baugenehmigung erteilt. Der Vorhabenträger veröffentlicht eine Baubeginnanzeige und kann mit dem Bau beginnen. Abschließend erfolgt eine Bauabnahme durch die Behörde.

Unterlagen:

ggf. Bauantragsformular, Baubeschreibung, Betriebsbeschreibung, Bauvorlageberechtigung, topografische Karte, Auszug aus Flächennutzungs- oder Bebauungsplan, beglaubigter Auszug aus der Liegenschafts- oder Flurkarte, ...

Fristen:

Sächsische Bauordnung (SächsBO) [64]: nach Eingang des Bauantrages hat die Bauaufsichtsbehörde 2 Wochen Zeit diesen zu prüfen; Entscheidungsfrist innerhalb 3 Monaten

Zuständige Behörde: Baugenehmigungsamt [65] (Dienstleistungsportal | Stadt Chemnitz [66])

4.9.2 B: Genehmigung von Leitungen

Im Folgenden werden die möglichen Genehmigungsverfahren, die für die Umstellung von Erdgasleitungen auf Wasserstoff bzw. für den Neubau von Wasserstoffleitungen Anwendung finden könnten, kurz erläutert. Bei der Kurzbeschreibung der Verfahren wird jeweils auf die Voraussetzungen, den Ablauf, die Dauer bzw. Fristen, die notwendigen Unterlagen und die zuständige Behörde für die Region Chemnitz eingegangen sowie Anwendungsbeispiele genannt. Die Auflistung der Unterlagen ist nicht abschließend, da sie sich nach dem jeweiligen konkreten Vorhaben richten.

Das jeweils höherrangige Verfahren schließt dabei die anderen Verfahren mit ein (Konzentrationswirkung). Das heißt, im Planfeststellungsverfahren sind alle weiteren notwendigen Genehmigungen einkonzentriert, werden von einer Behörde koordiniert und der Antragsteller muss keine Einzelgenehmigungen einholen. Wird das Vorhaben als verfahrensfrei eingestuft, sind dennoch Einzelgenehmigungen einzuholen (naturschutzrechtliche, wasserrechtliche, bergbaurechtliche und auch immissionsschutzrechtliche Genehmigungen), welche der Antragsteller bei einer Vielzahl an Behörden beantragen muss. Daher gibt es die Möglichkeit eines fakultativen Planfeststellungsverfahrens, da dieses die Konzentrationswirkung entfaltet.



Die Errichtung von Wasserstoffleitungen liegt bis zum 31. Dezember 2025 im überragenden öffentlichen Interesse gemäß § 43I (1) Satz 2 EnWG und soll der Beschleunigung des Auf- und Ausbaus der Wasserstofftransportinfrastruktur dienen.

Raumordnungsverfahren (Bsp.: Neubau Wasserstoffleitung mit DN > 300 mm, die raumbedeutsam ist oder überörtliche Bedeutung hat gemäß § 1 Nr. 14 RoV i.V.m. § 43I Abs. 7 EnWG)

Ablauf:

Durchführung des Verfahrens auf Antrag (§ 15 Abs. 5 S. 1 ROG) oder von Amts wegen (§ 15 Abs. 5 S. 3 ROG). Im Verfahren ist zwingend eine Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) durchzuführen (§ 15 Abs. 1 S. 2 i.V.m. § 2 Abs. 2 S. 6 ROG). Für das nachfolgende Genehmigungsverfahren bedeutet dies jedoch nicht, dass die UVP entfallen kann, sondern ihr Prüfungsumfang wird lediglich reduziert, da die Ergebnisse der vorangegangenen UVP berücksichtigt werden können.

Dauer/Fristen:

mind. 1 Monat Veröffentlichung der Verfahrensunterlagen; Abschluss des Verfahrens innerhalb von 6 Monaten

Unterlagen:

Antrag nach § 15 Abs. 5 S. 1 ROG oder von Amts wegen nach § 15 Abs. 5 S. 3 ROG, UVP-Bericht; Verfahrensunterlagen, die notwendig sind, um eine Bewertung der raumbedeutsamen Auswirkungen des Vorhabens zu ermöglichen

Zuständige Behörde: Landesdirektion Sachsen, Referat 34 – Raumordnung [67]

Planfeststellungsverfahren (Bsp.: Neubau Wasserstoffleitung mit DN > 300 mm und UVP-pflichtig)

Ablauf:

Die Errichtung und der Betrieb sowie die Änderung von Wasserstoffleitungen einschließlich der Anbindungsleitungen von Anlandungsterminals für Wasserstoff mit einem Durchmesser > 300 mm bedürfen der Planfeststellung gemäß § 43I Abs. 1 EnWG, wenn das Vorhaben UVP-pflichtig ist. Eine UVP-Pflicht entsteht bei einer Länge > 40 km und einem Durchmesser > 800 mm (ausgenommen Werksgelände) gemäß Nr. 19.2.1 Anlage 1 UVPG. Die UVP-Pflicht zieht zwingend eine Öffentlichkeitsbeteiligung (ÖB) nach sich.



Der Ablauf des Planfeststellungsverfahrens wird in den §§ 72 und 78 VwVfG geregelt. Der Vorhabenträger reicht zuerst den Plan bei der Anhörungsbehörde ein. Dann wird das Anhörungsverfahren durchgeführt. Dabei werden die betroffenen Fachbehörden beteiligt und der Plan für die Öffentlichkeit zur Einsichtnahme ausgelegt. Nach Ablauf der Einwendungsfrist findet der Erörterungstermin statt. Nun gibt die Anhörungsbehörde alle Ergebnisse an die Planfeststellungsbehörde weiter, welche den Planfeststellungsbeschluss erstellt.

Dauer/Fristen:

8 Monate Anhörungsverfahren, 3 Monate Einwendungsfrist für Fachbehörden, 1 Monat Auslegungsfrist der Planunterlagen, Einwendungsfrist Öffentlichkeit bis 2 Wochen nach Ende Auslegungsfrist, Abschluss der Erörterung bis 3 Monate nach Ablauf der Einwendungsfrist, 1 Monat nach Erörterung Ergebnis der Anhörungsbehörde

Unterlagen:

Beschreibung des Vorhabens und des Anlasses, Erkennbarkeit der betroffenen Grundstücke und Anlagen, Erläuterungsbericht, Übersichts- und Lagepläne, Trassierungs- und Profilpläne, Höhen- und Stationspläne, Kreuzungsverzeichnis und Längenschnitte, Grunderwerbs- bzw. Wegerechtsplan, Grundstücksverzeichnis, Baugrunduntersuchung, Anzeige nach § 5 GasHDrLtGV, wasserrechtliche Beweissicherung und Anträge, landschaftspflegerischer Begleitplan, UVP-Bericht, Untersuchungen zum Artenschutz und zu FFH- und Vogelschutzgebieten, forstrechtliche Anträge und ggf. weitere (technische) Unterlagen

Zuständige Behörde: Landesdirektion Sachsen, Referat 32 – Planfeststellung [58]

Plangenehmigungsverfahren (*Bsp.: Neubau Wasserstoffleitung mit DN > 300 mm und nicht UVP-pflichtig*)

Ablauf:

Die Errichtung und der Betrieb sowie die Änderung von Wasserstoffleitungen einschließlich der Anbindungsleitungen von Anlandungsterminals für Wasserstoff mit einem Durchmesser > 300 mm bedürfen der Plangenehmigung gemäß § 43I Abs. 2 S. 2 EnWG, wenn das Vorhaben nicht UVP-pflichtig ist. Bei Leitungen, die unter die Nr. 19.2.2. bis 19.2.4 Anlage 1 UVP-G fallen, wird eine allgemeine bzw. standortspezifische Vorprüfung des Einzelfalls durchgeführt. Ergibt diese, dass das Vorhaben nicht UVP-pflichtig ist, so wird ein Plangenehmigungsverfahren angeordnet.

Die vom Vorhaben Betroffenen werden durch die Genehmigungsbehörde ermittelt und in einem unmittelbaren Austausch direkt am Genehmigungsverfahren beteiligt (d.h. keine direkte

Öffentlichkeitsbeteiligung). Der Ablauf des Plangenehmigungsverfahrens wird in den §§ 73 und 74 des VwVfG i.V.m. § 43b EnWG geregelt.

Dauer/Fristen:

Einwendungen und Stellungnahmen innerhalb eines Monats nach der Einreichung des vollständigen Plans für eine Frist von sechs Wochen (§ 43b Abs. 1 Nr. 1 EnWG).

Unterlagen: Siehe Planfeststellungsverfahren (kein UVP-Bericht)

Zuständige Behörde: Landesdirektion Sachsen, Referat 32 – Planfeststellung **[58]**

Beantragung von Einzelgenehmigungen (Bsp.: *Neubau Wasserstoffleitung mit DN < 300 mm*)

Ablauf:

Der Vorhabenträger muss die notwendigen Einzelgenehmigungen (naturschutzrechtliche, wasserrechtliche, bergbaurechtliche und auch immissionsschutzrechtliche Genehmigungen) bei einer Vielzahl an Behörden beantragen (möglich ist aber auch eine fakultative Planfeststellung nach § 43I Abs. 3 EnWG, siehe Einleitung).

Zuständige Behörde:

u.a. verschiedene Referate der Landesdirektion Sachsen (z.B. Referat 35 – Baurecht, Denkmalschutz; Referat 43 – Bodenschutz; Referat 45 – Naturschutz; Referat 54 – Betriebssicherheit; ...)

Sicherheitstechnisches Anzeigeverfahren (Bsp.: *Umstellung Erdgasleitung auf H₂-Transport*)

Ablauf:

Der Vorhabensträger stellt eine Anzeige zur Umstellung von Erdgasleitungen auf Wasserstofftransport bei der zuständigen Behörde gemäß § 113c Abs. 3 S. 1 EnWG.

Dauer/Fristen:

Meldung der Umstellung an die Behörde acht Wochen vor Beginn. Die zuständige Behörde kann die geplante Umstellung innerhalb einer Frist von acht Wochen beanstanden.

Unterlagen:

Unterlagen zu Beurteilung der Sicherheit, gutachterliche Äußerung eines Sachverständigen (Anforderungen des § 49 Abs.1 EnWG erfüllt)

Zuständige Behörde: i.d.R. Energieaufsichtsbehörde (Zuständigkeit für Chemnitz ist zu erfragen)

Energierechtliches Anzeigeverfahren (Bsp.: Umstellung Erdgasleitung > 300 mm auf H₂-Transport und zusätzlich unwesentliche bauliche/technische Änderungen/Erweiterungen)

Ablauf:

Der Vorhabensträger stellt eine Anzeige des Umstellvorhabens durch den Vorhabensträger bei der zuständigen Behörde. Gemäß § 43f Abs. 2 Nr. 1 EnWG sind Änderungen/Erweiterungen von Gasversorgungsleitungen zum H₂-Transport von der UVP-Pflicht befreit. Die Behörde prüft demnach nur noch, ob öffentliche Belange durch das Vorhaben berührt sind. Die Behörde entscheidet, welche Genehmigungen notwendig sind, ob diese vorliegen und dem Vorhaben nicht entgegenstehen. Die Änderung ist unwesentlich, wenn das Vorhaben nicht UVP-pflichtig, andere öffentliche Belange unberührt und Rechte anderer nicht beeinträchtigt werden. § 43l Abs. 5 EnWG gilt auch für auf Grundlage anderer Gesetze zugelassener Gas-, Wasserstoff- und Produktenleitungen (insb. nach § 65 UVPG planfestgestellte und nach RohrFLtgV zugelassene Leitungen).

Dauer/Fristen:

1 Monat für Ermessensentscheidung der Behörde über die Freistellung von einem förmlichen Verfahren oder ob ein Planfeststellungs- oder -genehmigungsverfahren notwendig ist.

Unterlagen:

Anzeige, Erläuterungen zur Erfüllung der Voraussetzungen des § 43f Abs. 1-3 EnWG, Darstellung zu erwartender Umweltauswirkungen (§ 43f Abs. 4 S. 3 EnWG), Einzelgenehmigung bzw. Stellungnahme der betroffenen Fachämter, Standortbezogene Vorprüfung des Einzelfalles, behördliche Entscheidungen bzw. Stellungnahmen der Träger öffentlicher Belange und der betroffenen Fachbehörden (insb. untere Wasserbehörde, untere Naturschutzbehörde, untere Denkmalbehörde)

Zuständige Behörde: Landesdirektion Sachsen, Referat 32 – Planfeststellung [58]

4.9.3 C: Genehmigung von Wasserstoffspeichern

Die Art und der Umfang der anzuwendenden Genehmigungsverfahren für die Errichtung und den Betrieb von Wasserstoffspeichern ist abhängig von der vorhandenen Lagermenge an Wasserstoff, der Art der Speicherung und ob zu einem Elektrolyseur im „industriellen Maßstab“ im Sinne der IED-Richtlinie [57] ein räumlicher und betriebstechnischer Zusammenhang besteht. Zudem ist zu unterscheiden, ob es sich um oberirdische Speicher, unterirdische Speicheranlagen oder um die Umnutzung von Erdgasspeichern handelt.

Immissionsschutzrechtliches Genehmigungsverfahren (oberirdische Speicherung ab 3 Tonnen)

Ablauf:

Das Verfahren beginnt mit einem Scoping-Termin und der Feststellung, ob eine UVP-Pflicht besteht. Während für die Errichtung und den Betrieb von Wasserstoff-Speicheranlagen mit einer Lagerkapazität von drei Tonnen und mehr nach Nr. 9.3.3 des Anhang 1 UVPG die Durchführung einer standortbezogenen Vorprüfung genügt, bedarf es ab einer Kapazität von 30 Tonnen und mehr nach Nr. 9.3.2 Anhang 1 UVPG einer allgemeinen Vorprüfung. Ab einer Speicherkapazität von 200.000 Tonnen und mehr ist nach Nr. 9.3.1 der Anlage 1 zum UVPG die Durchführung einer UVP verpflichtend.

Es folgt die Antragstellung durch den Betreiber der Anlage. Es gibt zwei verschiedene Genehmigungsverfahren. Das förmliche Genehmigungsverfahren findet mit ÖB statt (d.h. öffentliche Bekanntmachung, Auslegung der Unterlagen und Erörterungstermin). Das vereinfachte Genehmigungsverfahren ist ohne ÖB. Das Verfahren endet mit der dem Genehmigungsbescheid durch die Behörde. Die Genehmigung kann mit Auflagen und Bedingungen versehen sein, um schädliche Umwelteinwirkungen zu minimieren.

Unterlagen:

u.a. Antrag, Anlagenbeschreibung, Standortbeschreibung, Verfahrensflißbilder, Stoffliste, Emissionsquellen und -daten, Lärmgutachten, Schallgutachten, Sicherheitskonzept, ggf. Ausgangszustandsbericht (bei Einstufung als IE-Anlage), ggf. UVP-Bericht

Fristen:

Vollständigkeitsprüfung – 1 Monat, Auslegungsfrist – 1 Monat (nur förmliches V.), Einwendungsfrist – 2 Wochen bzw. 1 Monat (IE-Anlage und UVP-Pflicht) nach Ablauf Auslegungsfrist (nur förmliches V.), Entscheidung über Genehmigungsantrag – 7 Monate nach

Antragseingang beim förmlichen Verfahren und 3 Monate beim vereinfachten Verfahren (ggf. Verlängerung um 3 Monate), Widerspruchsfrist – 1 Monat

Zuständige Behörde: Landesdirektion Sachsen, Referat 44 – Immissionsschutz [60]

Erlaubnis nach Betriebssicherheitsverordnung gemäß § 18 BetrSichV (oberirdische Speicherung unter 3 Tonnen)

Ablauf:

Der Ablauf des Verfahrens umfasst die Antragstellung, die Prüfung des Antrags durch die Behörde, die Entscheidung der zuständigen Behörde und die Überwachung der Einhaltung von Auflagen und Bedingungen.

Unterlagen:

Antrag auf Erlaubnis (§ 18 Abs. 3 BetrSichV), Prüfbericht der ZÜS, Gefährdungsbeurteilung, Ex-Schutzdokument, Risikobeurteilung, Erlaubnispflichtige Anlage: zusätzlich Unterlagen nach LV 49 /LAS 17/ des LASI [62]

Fristen: Entscheidung über Antrag – 3 Monate nach Eingang der vollständigen Unterlagen

Zuständige Behörde: Landesdirektion Sachsen, Referat 54 – Betriebssicherheit [63]

Baugenehmigung (oberirdische Speicherung unter 3 Tonnen)

Ablauf:

Der Antragsteller stellt bei der zuständigen Behörde eine Bauvoranfrage zur Entscheidung über die bauplanungsrechtliche Zulässigkeit. Die Behörde übergibt daraufhin einen Vorbescheid zur Bauanfrage. Der Vorhabenträger reicht im Anschluss den Bauantrag inklusive der erforderlichen Unterlagen ein. Die Behörde prüft den Antrag und holt gegebenenfalls Stellungnahmen ein. Falls offene Fragen bestehen, initiiert die Behörde eine Bauverhandlung. Wenn alle erforderlichen Genehmigungen vorliegen, wird die Baugenehmigung erteilt. Der Vorhabenträger gibt eine Baubeginnanzeige bekannt und kann mit dem Bau beginnen. Schließlich erfolgt durch die Behörde eine Bauabnahme.

Unterlagen:

ggf. Bauantragsformular, Baubeschreibung, Betriebsbeschreibung, Bauvorlageberechtigung, topografische Karte, Auszug aus Flächennutzungs- oder Bebauungsplan, beglaubigter Auszug aus der Liegenschafts- oder Flurkarte (vgl. Sächsische Bauordnung)

Fristen:

Sächsische Bauordnung (SächsBO) [64]: Prüfung des Bauantrags durch die Bauaufsichtsbehörde – 2 Wochen; Entscheidung über Antrag – 3 Monate nach Eingang des Bauantrags

Zuständige Behörde: Baugenehmigungsamt [65] (Dienstleistungsportal | Stadt Chemnitz [66])

Bergrechtliches Zulassungsverfahren gemäß § 2 BbergG (unterirdische Speicherung von Wasserstoff)

Ablauf:

Für Wasserstoffkavernenspeicher kommen zwei bergbaurechtliche Zulassungsarten in Betracht: eine Hauptbetriebsplanzulassung oder eine Rahmenbetriebsplanzulassung im Planfeststellungsverfahren. Besteht für das Vorhaben eine UVP-Pflicht im Sinne der UVP-V Bergbau, ist eine Rahmenbetriebsplanzulassung (§ 126 BbergG) im Planfeststellungsverfahren nach § 57a Abs. 1 BbergG durchzuführen. Ist das Vorhaben nicht UVP-pflichtig ist eine Hauptbetriebsplanzulassung (§ 52 BbergG) ausreichend und wird keine Umweltverträglichkeitsprüfung durchgeführt.

Das Verfahren beginnt mit dem behördlichen Verlangen zur Einreichung eines Betriebsplans und einer Beratung zum Umfang und Inhalt der Umweltverträglichkeitsprüfung. Nach Erstellung und Einreichung der Planunterlagen wird deren Vollständigkeit geprüft. Vollständige Unterlagen werden öffentlich ausgelegt, zugleich erfolgt die Beteiligung aller Behörden. Ein Erörterungstermin mit Einwendern, Behörden und Antragsteller wird in der Regel durchgeführt. Der Planfeststellungsbeschluss wird gefertigt, zugestellt und öffentlich ausgelegt. Besteht keine UVP-Pflicht, beginnt das allgemeine Verwaltungsverfahren mit einem Antrag, der – sobald vollständig – den berührten Behörden zur Stellungnahme zugesendet wird. Sind alle Stellungnahmen eingegangen, wird der Zulassungsbescheid gefertigt und bekanntgegeben. Bei bestimmten nicht UVP-pflichtigen Vorhaben kann ergänzend eine Beteiligung bestimmter Dritter oder ergänzend eine Beteiligung der Öffentlichkeit erforderlich sein.

Unterlagen:

Erlaubnisantrag, Betriebspläne: Hauptbetriebsplan, ggf. Rahmenbetriebsplan, ggf. Sonderbetriebspläne einzelner Anlagenteile (enthalten sind Lagepläne, Gefährdungsbeurteilungen, Sicherheitsmaßnahmen, Vgl. §§ 51-53) [64] , ggf. UVP-Bericht

Fristen:

Erlaubnis wird für maximal 5 Jahre erteilt und kann um 3 Jahre verlängert werden

Zuständige Behörde: Sächsische Oberbergamt Freiberg [68]

Sonderfall: Umnutzung von Erdgasspeichern

Oberirdisch

Bei der Umnutzung von Erdgasspeichern ist je nach Beschaffenheit der Bestandsanlage entweder eine Änderungsgenehmigung gemäß § 16 BimSchG erforderlich. Im Einzelfall kann jedoch auch eine Änderungsanzeige nach § 15 BimSchG erforderlich sein. Sind durch die Änderung hervorgerufenen nachteiligen Auswirkungen gering und die Erfüllung der sich aus § 6 Abs. 1 Nr. 1 BimSchG ergebenden Anforderungen sichergestellt (vgl. § 16 Abs. 1 Satz 2 BimSchG), kann eine Änderungsanzeige nach § 15 BimSchG ausreichend sein.

Unterirdisch

Soll unterirdische Erdgasspeicher zu Wasserstoffspeichern umgenutzt werden, ist eine Änderung des Betriebsplans erforderlich nach § 52 Abs. 4 BbergG. Gemäß § 52 Absatz 2a BbergG kann eine Planfeststellungspflicht bestehen, sofern für das Änderungsvorhaben eine Umweltverträglichkeitsprüfung nach § 9 UVPG durchzuführen ist. Dies ist generell der Fall, wenn für den betreffenden Erdgasspeicher bereits eine Umweltverträglichkeitsprüfung durchgeführt wurde und eine Vorprüfung ergibt, dass die Änderung zusätzliche erhebliche oder andere nachteilige Auswirkungen auf die Umwelt haben kann (§ 9 Abs. 1 Satz 1 Nr. 2 UVPG).

4.9.4 D: Wasserstofftankstellen

Das anzuwendende Genehmigungsverfahren für die Errichtung und den Betrieb von Wasserstofftankstellen ist abhängig von der maximalen Lagermenge an Wasserstoff sowie davon, ob zu einem Elektrolyseur im „industriellen Maßstab“ ein räumlicher und betriebstechnischer Zusammenhang besteht. Grundsätzlich ist zwischen Liefer-H₂-Tankstellen und H₂-Stationen zu unterscheiden. Liefer-H₂-Tankstellen produzieren keinen eigenen Wasserstoff vor Ort, sodass Erlaubnisverfahren nach der Betriebssicherheitsverordnung und ein Baugenehmigungsverfahren nach der Landesbauordnung durchzuführen ist. H₂-Stationen sind durch eine eigene Wasserstoffproduktion ausgezeichnet und durchlaufen üblicherweise ein Genehmigungsverfahren nach Bundesimmissionsschutzgesetz [69].

Immissionsschutzrechtliches Genehmigungsverfahren (H₂-Station – H₂-Gasfüllanlage mit eigener Produktion des Wasserstoffs vor Ort im „industriellen Maßstab“)

Ablauf:

Das Verfahren beginnt mit einem Scoping-Termin und der Feststellung, ob eine UVP-Pflicht besteht. Während für die Errichtung und den Betrieb von Wasserstoff-Speicheranlagen mit

einer Lagerkapazität von drei Tonnen und mehr nach Nr. 9.3.3 des Anhang 1 UVPG die Durchführung einer standortbezogenen Vorprüfung genügt, bedarf es ab einer Kapazität von 30 Tonnen und mehr nach Nr. 9.3.2 Anhang 1 UVPG einer allgemeinen Vorprüfung. Ab einer Speicherkapazität von 200.000 Tonnen und mehr ist nach Nr. 9.3.1 der Anlage 1 zum UVPG die Durchführung einer UVP verpflichtend.

Es folgt die Antragstellung durch den Betreiber der Anlage. Es gibt zwei verschiedene Genehmigungsverfahren. Das förmliche Genehmigungsverfahren findet mit ÖB statt (d.h. öffentliche Bekanntmachung, Auslegung der Unterlagen und Erörterungstermin). Das vereinfachte Genehmigungsverfahren ist ohne ÖB. Das Verfahren endet mit der dem Genehmigungsbescheid durch die Behörde. Die Genehmigung kann mit Auflagen und Bedingungen versehen sein, um schädliche Umwelteinwirkungen zu minimieren.

Unterlagen:

Antrag, Anlagenbeschreibung, Standortbeschreibung, Verfahrensfließbilder, Stoffliste, Emissionsquellen und -daten, Lärmgutachten, Schallgutachten, Sicherheitskonzept, ggf. Ausgangszustandsbericht (bei Einstufung als IE-Anlage [59]), ggf. UVP-Bericht

Fristen:

Vollständigkeitsprüfung – 1 Monat, Auslegungsfrist – 1 Monat, Einwendungsfrist – 1 Monat nach Ablauf Auslegungsfrist, Entscheidung über Genehmigungsantrag – 7 Monate nach Antragseingang (ggf. Verlängerung um 3 Monate), Widerspruchsfrist – 1 Monat

Zuständige Behörde: Landesdirektion Sachsen, Referat 44 – Immissionsschutz [60]

Erlaubnis nach Betriebssicherheitsverordnung nach § 18 BetrSichV (H₂-Liefertankstelle – ohne eigene Produktion des Wasserstoffs vor Ort, mit Lagermengen < 3 t)

Ablauf:

Der Ablauf des Verfahrens umfasst die Antragstellung, die Prüfung des Antrags durch die Behörde, die Entscheidung der zuständigen Behörde und die Überwachung der Einhaltung von Auflagen und Bedingungen.

Unterlagen:

Antrag auf Erlaubnis (§ 18 Abs. 3 BetrSichV), Prüfbericht der ZÜS, Gefährdungsbeurteilung, Ex-Schutzdokument, Risikobeurteilung, Erlaubnispflichtige Anlage: zusätzlich Unterlagen nach LV 49 /LAS 17/ des LASI [62]

Fristen: Entscheidung über Antrag – 3 Monate nach Eingang aller Unterlagen

Zuständige Behörde: Landesdirektion Sachsen, Referat 54 – Betriebssicherheit [63]

Baugenehmigung (*H₂-Liefertankstelle – ohne eigene Produktion des Wasserstoffs vor Ort*)

Ablauf:

Der Antragsteller stellt bei der zuständigen Behörde eine Bauvoranfrage zur Entscheidung über die bauplanungsrechtliche Zulässigkeit. Die Behörde übergibt daraufhin einen Vorbescheid zur Bauanfrage. Der Vorhabenträger reicht im Anschluss den Bauantrag inklusive der erforderlichen Unterlagen ein. Die Behörde prüft den Antrag und holt gegebenenfalls Stellungnahmen ein. Falls offene Fragen bestehen, initiiert die Behörde eine Bauverhandlung. Wenn alle erforderlichen Genehmigungen vorliegen, wird die Baugenehmigung erteilt. Der Vorhabenträger gibt eine Baubeginnanzeige bekannt und kann mit dem Bau beginnen. Schließlich erfolgt durch die Behörde eine Bauabnahme.

Unterlagen:

ggf. Bauantragsformular, Baubeschreibung, Betriebsbeschreibung, Bauvorlageberechtigung, topografische Karte, Auszug aus Flächennutzungs- oder Bebauungsplan, beglaubigter Auszug aus der Liegenschafts- oder Flurkarte (vgl. Sächsische Bauordnung [64])

Fristen: Prüfung des Bauantrags durch die Bauaufsichtsbehörde – 2 Wochen; Entscheidung über Antrag – 3 Monate nach Eingang des Bauantrags

Zuständige Behörde: Baugenehmigungsamt [65] (Dienstleistungsportal | Stadt Chemnitz [66])

Planfeststellung (Sonderfall: Eisenbahntankstelle)

Ablauf: nach § 18 AEG i. V. m. §§ 72 bis 78 VwVfG

Der Antragsteller stellt beim Eisenbahnbundesamt einen Antrag zur Planfeststellung. Das EBA gibt den Antrag öffentlich bekannt und stellt die Unterlagen zur Einsicht bereit. Betroffene können innerhalb einer Frist Einwände gegen das Vorhaben einbringen. Das EBA prüft den Antrag und die vorgebrachten Einwände und entscheidet über die Genehmigung. Der Planfeststellungsbeschluss wird dem Antragsteller und den Betroffenen zugestellt. Betroffene haben das Recht, gegen die Entscheidung Widerspruch einzulegen oder Klage zu erheben.

Unterlagen:

Antrag, Planunterlagen nach § 73 Abs. 1 VwVfG, Erläuterungsbericht, Übersichtskarten und Lagepläne, Bauzeichnungen, Stellungnahmen der Träger öffentlicher Belange, ggf. UVP-Bericht, Unterlagen zu wasserrechtlichen Sachverhalten, Grunderwerbspläne,

Grundstücksverzeichnis, Gutachten, spezielle Bauwerkspläne, weitere Unterlagen können je nach Vorhaben von der Behörde verlangt werden.

Fristen: Einwendungsfrist nach Auslegung der Planunterlagen 1 Monat, Planfeststellungsbeschluss 2 Monate nach Stellungnahme der Anhörungsbehörde

Zuständige Behörde: Eisenbahn-Bundesamt [70]

4.9.5 E: Genehmigung von wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen

Die in den vorhergehenden Abschnitten diskutierten, „klassischen“ Genehmigungsverfahren (Planfeststellungsverfahren, Baugenehmigungsverfahren, etc.) sind auf Fahrzeuge nicht anwendbar. Deshalb folgt der Aufbau der folgenden Ausführungen anderen Parametern, namentlich der Aufteilung nach rechtlichen Rahmenbedingungen für Fahrzeuge nach europäischem, nationalem und unterrangigem Recht.

Da theoretisch alle möglichen Fahrzeuge und Fahrzeugarten mit Wasserstoff betrieben werden können, ist es notwendig zunächst den Betrachtungshorizont näher zu definieren. Grundsätzlich ist vorzuschicken, dass aufgrund der sehr geringen Zahl von derzeitig bereits zugelassenen Wasserstofffahrzeugen auf der einen und der Vielzahl der Arten der Wasserstofffahrzeuge auf der anderen Seite, Generalisierungen über Genehmigungs- und Zulassungsverfahren verbieten. Die Erfahrungswerte sind gering und es lässt sich im Wesentlichen hieraus ableiten, dass immer eine Einzelfallbetrachtung erfolgen muss. Für diese Studie wurde eine Betrachtung der beiden, für die Region Chemnitz voraussichtlich am zukünftig relevantesten, Wasserstofffahrzeuge als zielführend erachtet. Hierbei handelt es sich primär um Straßenfahrzeuge, speziell Lkw und Pkw und sekundär um Schienenfahrzeuge, speziell Eisenbahnen.

Schienenfahrzeuge / Eisenbahnen

Für Eisenbahnen ist der Zulassungsweg noch am einheitlichsten definiert. Das 4. Europäische Eisenbahnpaket [71] setzt hier den Rahmen und schreibt den Mitgliedsstaaten ein (mehr oder weniger) einheitliches Zulassungsverfahren für Eisenbahnen vor. In Deutschland ist grundsätzlich das Eisenbahn-Bundesamt [70] für derartige Zulassungen zuständig. Diese richtet sich nach unterschiedlichen Rechtsvorschriften und unter-rangigen Normen, abhängig im Wesentlichen von der angestrebten Nutzungsart. Im Grundsatz ist hier der Güterschienenverkehr und die Personenbeförderung auf der Schiene zu unterscheiden.



Jeder Einzelfall muss im Zweifel geprüft werden und erste Serienzulassungen für Wasserstoffzüge erfolgen gegenwärtig. Die Zulassungsverfahren richten sich nach verschiedenen, individuellen Aspekten, neben der Nutzungsart sind hier die Länge, Maße, Anzahl und Beschaffenheit der Tanks etc. zu nennen. Wesentliche Rechtsvorschriften für das Zulassungsverfahren finden sich in der Eisenbahn-Inbetriebnahme-Genehmigungsverordnung [72] und insbesondere relevant ist hier der Teil 2 der Verordnung z.B. im Hinblick auf die Betriebserlaubnis bzw. die Betriebsbewilligung, welche vom Eisenbahn-Bundesamt erteilt wird [71]. Hierzu können im Einzelfall bestimmte betrieblich-technische Regelwerke relevant sein [73]. Deren Einhaltung muss ggf. überprüft werden.

Straßenfahrzeuge / Lkw, Busse und Pkw

Im Bereich der Straßenfahrzeuge gelten verschiedene Rechtsnormen in Abhängigkeit der individuellen Umstände, namentlich z.B. Maße, Gewicht, Antriebsart des Fahrzeuges, sowie die Nutzung zur Güter- oder Personenbeförderung. Relevante Vorschriften sind auf europäischer Ebene insbesondere Richtlinie 96/53/EG [74], welche in nationales Recht umgesetzt wurde, sowie ggf. Richtlinie 2009/30/EG [75], sowie die Richtlinie 2014/94/EU [76]. Auf nationaler Ebene sind hier insbesondere die Straßenverkehrs-Ordnung [77], die Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung [78], die Fahrzeug-Zulassungs-Verordnung [79] zu nennen. Hinzu kommt, dass ggf. Konformitäts- und Sicherheitsbewertungen durchgeführt werden müssen.

Des Weiteren ist zwischen der Art des Fahrzeuges (über oder unter 3.5 Tonnen) und den Maßen zu unterscheiden. Für Pkw sind im Wesentlichen die gängigen Zulassungsverfahren und Normen einzuhalten, wie für mit fossilen Brennstoffen betriebene Pkw auch. Die rechtlichen Besonderheiten ergeben sich hier im Detail z.B. im Bereich der technischen Anforderungen an Wasserstofftanks und können hier nicht näher betrachtet werden. Ansonsten wird insbesondere auf den vorangehenden Abschnitt 'Tankstellen' verwiesen.

Für Lkw und Busse gelten ggf. besondere technische Regelungen und darüberhinausgehende Voraussetzungen, wie ggf. erforderliche, ergänzende Zulassungen zur Personen- oder Güterbeförderung.

5 Ganzheitliche Erzeugungspotenzial- und Bedarfsanalyse

Neben den bestehenden Wasserstoffanwendungen sind perspektivisch weitere Anwender und Anwendungsgebiete zu erwarten, die sich aus neuen Technologien und der Notwendigkeit zur Emissionsminderung ergeben. Daraus ergeben sich spezifische Anforderungen hinsichtlich Abnahmemenge, Druckniveau, Zielkosten und geforderter Reinheit, die im Rahmen der Studie erfasst und räumlich sowie zeitlich (Etappenziele 2025, 2030 und 2040) klassifiziert wurden.

Der perspektivisch zu deckende H₂-Bedarf muss durch geeignete Technologien bereitgestellt werden. Vor dem Hintergrund des Klimawandels und der Notwendigkeit zur Reduzierung der Emissionen ist emissionsarmen Technologien der Vorzug zu geben. Als wichtigste Technologie wird die Elektrolyse angesehen. Diese erfordert zur Herstellung von grünem H₂ neben entsprechenden Elektrolysekapazitäten auch ausreichend erneuerbare Energien. Deren Verfügbarkeit ist daher essenziell, sodass die Kapazitäten und Potenziale erneuerbarer Energien (insbesondere Windkraft und PV) mit Hilfe von Geoinformationssystemen (GIS) ermittelt wurden. Auf dieser Basis wurden der Ausbaubedarf und die Ausbaumöglichkeiten betrachtet um, Versorgungspotenziale zur ermitteln.

5.1 Übersicht bereits bestehender EE-Anlagen

In einem ersten Schritt wird durch das DBI eine Zusammenstellung der bereits bestehenden Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energien im Untersuchungsgebiet vorgenommen. Einbezogen werden hierbei insbesondere die Kapazitäten aus Wind, Klärschlamm (sonstige Biomasse) und sonstigen erneuerbaren Energien wie Wasserkraft oder Geothermie sowie Photovoltaik. Der Detaillierungsgrad der Daten ist dabei mindestens für eine administrative Auflösung bis auf die Ebene der Gemeinden gewährleistet. Die Qualität der Daten wird im Wesentlichen durch das Marktstammdatenregister der Bundesnetzagentur bestimmt [80]. Im Folgenden werden die Kapazitäten der erneuerbaren Energien kurz dargestellt und anhand von Kartenmaterial bewertet.

Windkraft:

Für die Modellregion kann auf Basis der aktuellen Windenergieleistung eine Gesamtkapazität von 440 MW identifiziert und ausgewiesen werden. Die Verteilung der elektrischen Leistung ist dabei inhomogen über das Gebiet verteilt. Die größten Windparks befinden sich in der Stadt Chemnitz auf dem Galgenberg sowie der Windpark Saidenberg an der Grenze zwischen dem Landkreis Erzgebirgskreis und dem Landkreis Mittelsachsen.

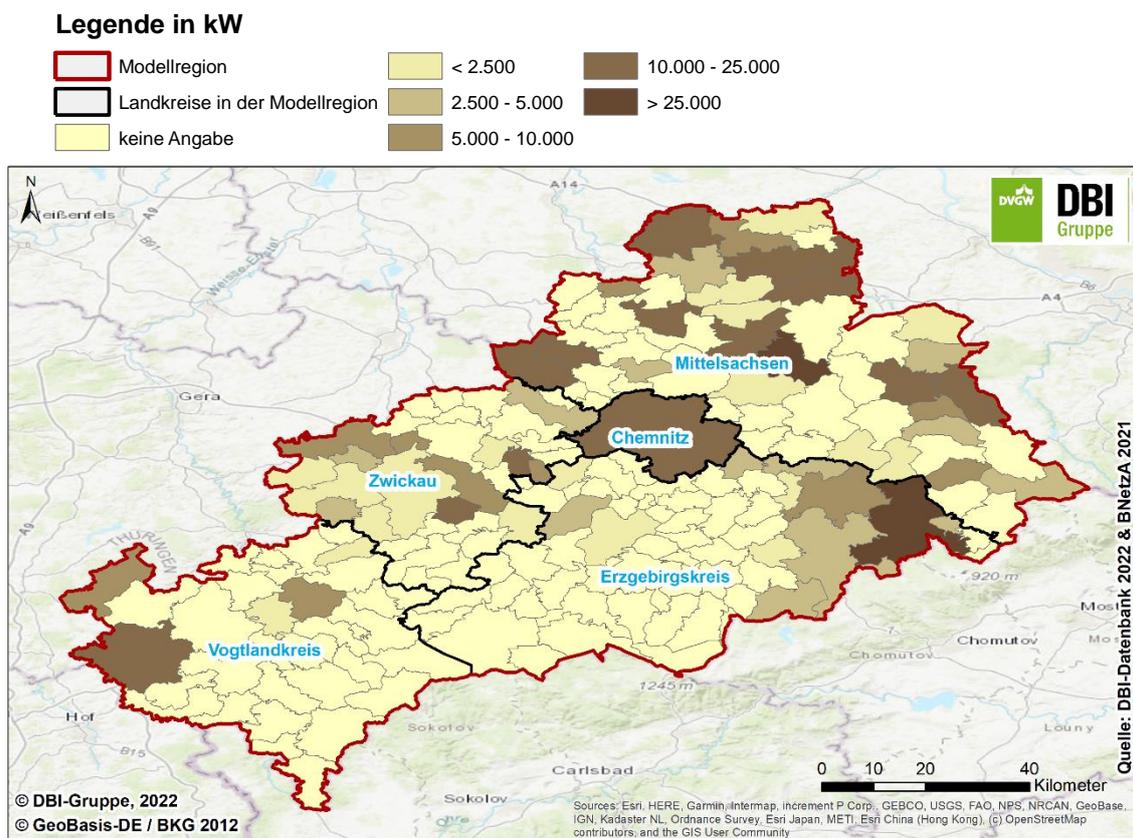


Abbildung 10: bestehende WEA-Kapazitäten in der Modellregion (Angabe in kW) nach [80]

Die Abbildung 10 zeigt, dass viele Gemeinden in der Modellregion keine Windenergieanlagen (WEA) besitzen. In diesem Zusammenhang wird deutlich, dass das Untersuchungsgebiet und Sachsen im Allgemeinen im Windausbau durch die Gesetzgebung eingeschränkt sind. Im Zuge der aktuellen politischen Entwicklungen werden sich die regionalplanerischen Parameter verändern müssen, um die Bundesvorgabe des 2 % Ziels zu erreichen.

Die Windkraft kann einen wesentlichen Beitrag für die regionale Wasserstoffwertschöpfung sein. Aus diesem Grund werden im Kapitel 5.2.1 die regionalen Ausbaupotenziale bestimmt.

Wasserkraft:

Für die Modellregion wird eine Wasserkraftkapazität von insgesamt 67 MW ermittelt und ausgewiesen. Die Verteilung der elektrischen Leistung im Gebiet erfolgt entlang der drei größten Flüsse der Region (Zwickauer und Freiburger Mulde sowie Zschopau).

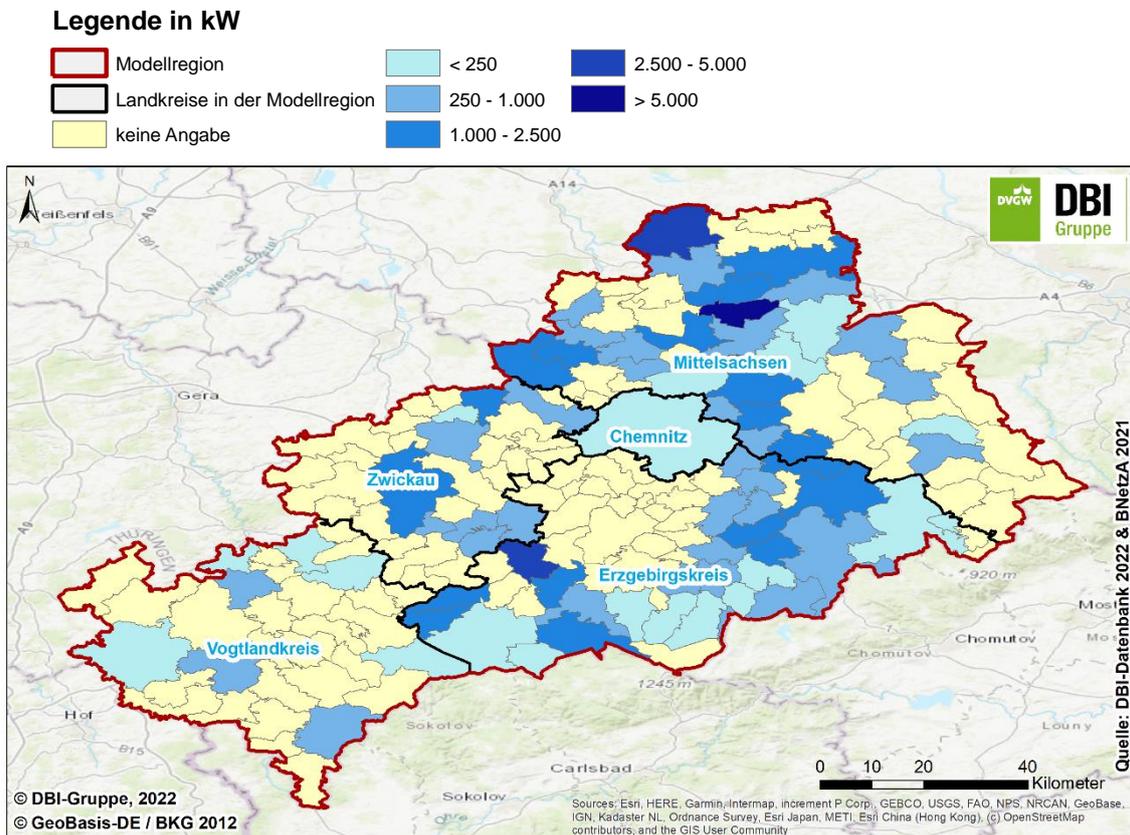


Abbildung 11: bestehende Wasserkraft-Kapazitäten in der Modellregion (Angabe in kW) nach [80]

Die Abbildung 11 visualisiert die gemeindespezifischen Werte der installierten Wasserkraftkapazität. In Summe trägt die Wasserkraft eine untergeordnete Rolle in der EE-Erzeugung der Modellregion ein. Aufgrund der Nähe zum Erzgebirge bringt die Region dennoch ein großes topologisches Potenzial für Talsperren mit und generiert aus diesem Fakt heraus Strom aus der Wasserkraft.

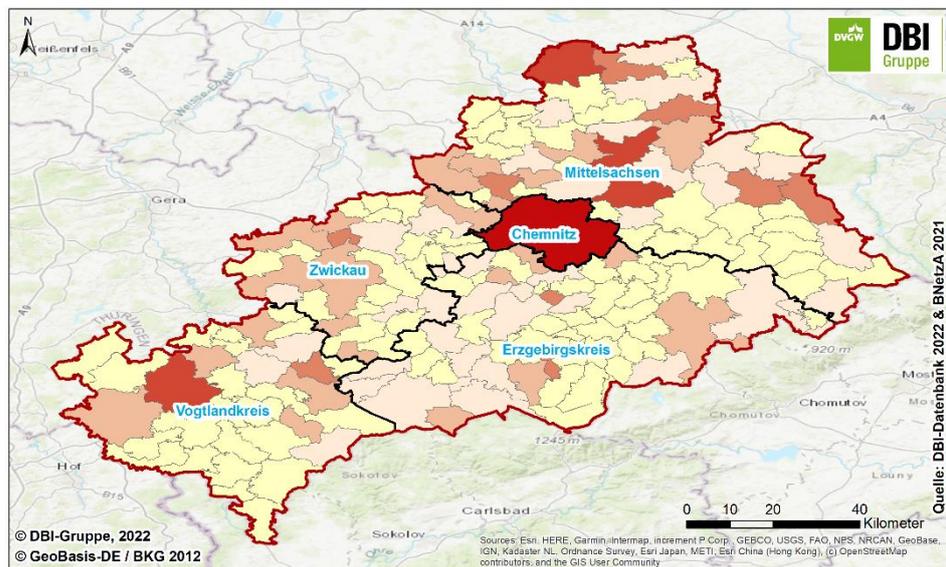
Photovoltaik:

Für die Photovoltaik erfolgt die Auswertung in der Modellregion differenziert nach Freiflächen-PV sowie Dachflächen-PV (inkl. baulicher Anlagen und Plug-In-Systeme). In Summe kann eine PV-Leistung von insgesamt 689 MW ermittelt und in der Modellregion ausgewiesen werden. Die Verteilung der elektrischen Leistung ist dabei zu ca. 68 % durch Dach-PV und zu 32 % durch Freiflächen-PV geprägt. Spitzenreiter mit den größten Kapazitäten ist in beiden Kategorien die Stadt Chemnitz.

Freiflächen Photovoltaik

Legende in kW

	Modellregion		< 1.000		10.000 - 20.000
	Landkreise in der Modellregion		1.000 - 5.000		> 20.000
	keine Angabe		5.000 - 10.000		



Dachflächen, bauliche Anlagen oder Plug-In Systemen

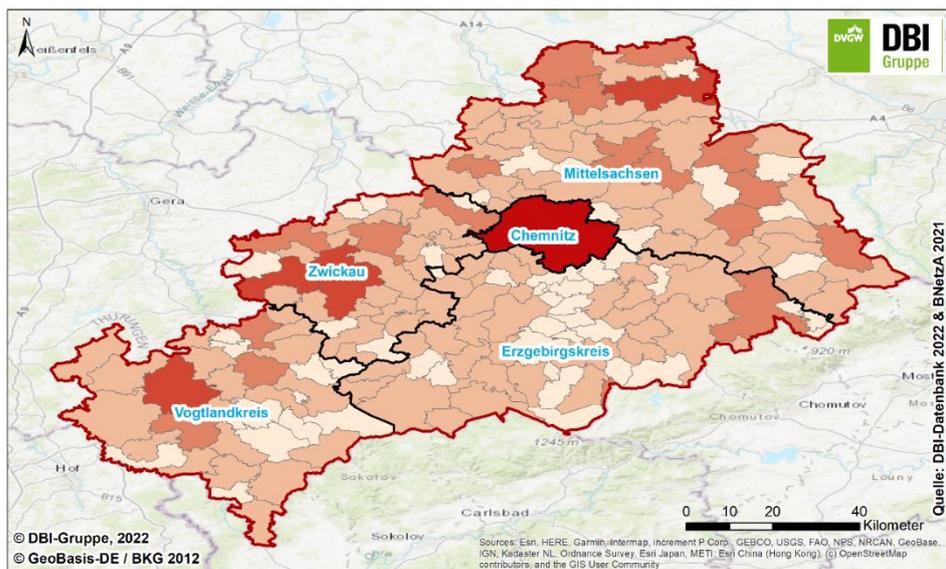


Abbildung 12: bestehende PV-Kapazitäten auf Freiflächen in der Modellregion (oben) sowie auf Dachflächen, bauliche Anlagen oder Plug-In Systeme (unten) in der Modellregion (Angabe in kW) nach [80]

Biogasanlagen:

Zum EE-Strommix der Modellregion Chemnitz trägt auch die Verstromung von Biogas mittels Blockheizkraftwerk (BHKW) aus der Vergärung bei. Insgesamt kann eine Leistung von 43 MW aus Biogasanlagen in der Modellregion Chemnitz identifiziert und ausgewiesen werden. Damit ist der Anteil von Biogas am Strommix am geringsten. Die elektrische Leistung wird überwiegend in den ländlichen Regionen bereitgestellt.

Legende in kW

 Modellregion	 < 250	 1.000 - 2.500
 Landkreise in der Modellregion	 250 - 500	 > 2.500
 keine Angabe	 500 - 1.000	

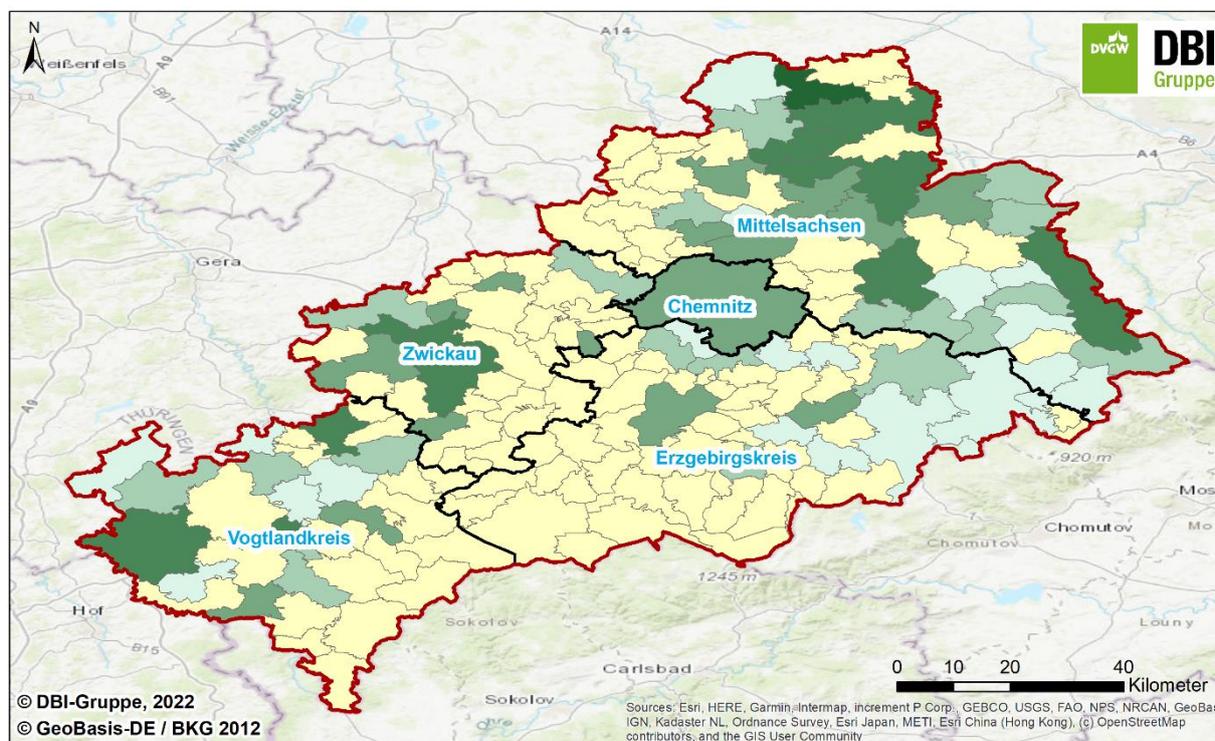


Abbildung 13: Bestehende Biogas-Kapazitäten in der Modellregion (Angabe in kW) nach [80]

Die vorliegende Grafik Abbildung 13 gibt Auskunft über Biogas-Kapazitäten der Modellregion auf administrativer Ebene der Gemeinden. Auffällig dabei ist, dass erneut die Stadt Chemnitz mit großen Anteilen an der Gesamtkapazität ausgewiesen werden kann. An dieser Stelle sei erwähnt, dass der Stadtkreis Chemnitz neben dem städtischen Gebiet auch aus den umliegenden Dörfern besteht und aus diesem Grund im ländlichen Umland Biogasanlagen lokalisiert sind.



Zusammenfassung bestehender EE-Anlagen in der Modellregion Chemnitz

Die vorliegende Zusammenstellung der EE-Anlagen in den verschiedenen Kategorien zeigt, dass in der Modellregion ein breites Spektrum an EE-Technologien zur Verfügung steht. Insgesamt stehen rund 1,2 GW installierte Nennleistung für die EE-Stromerzeugung zur Verfügung. Die Kategorie der Geothermie weist in der Modellregion aktuell gemäß verwendeten Quellen keine verfügbaren Leistungen auf. In einem zweiten Schritt ist es notwendig, die zukünftigen Ausbaupotenziale der erneuerbaren Energien (insbesondere Windkraft und PV) mit Hilfe von Geoinformationssystemen (GIS) zu ermitteln und zu bewerten.

5.2 Wasserstoff-Erzeugungspotenziale

Es benötigt eine genaue Identifikation von Wasserstoff-Erzeugungspotenzialen für eine möglichst große Deckung des Wasserstoffbedarfs aus der Mobilität, der Forschung und des Wärmebedarfs in der Modellregion Chemnitz. Die Vorteile in einem hohen Deckungsgrad sind die Versorgungs- und Planungssicherheit sowie der Aufbau und die Förderung von regionalen Wertschöpfungsketten. Für die Modellierung der Ausbaubedarfe wird sich im Rahmen der Bearbeitung primär auf die Windkraft und die Photovoltaik fokussiert. Die beiden volatilen EE-Technologien sind prädestiniert für die Nutzung der Überschussstromengen durch die Elektrolyse. In einem ersten Schritt werden die Ausbaupotenziale für Windenergieanlagen (WEA) durch eine breit abgestimmte und fundierte Methodik zur Ermittlung von Vorrang- und Eignungsgebiete für die Windkraft mittels Geoinformationssystem (GIS) modelliert. Ferner erfolgt auf Basis dieser Flächenanalyse für die Modellregion die Ermittlung konkreter Neubaustandorte (Anzahl neuer WEA). Dabei wird eine KI-basierte Optimierung für eine bestmögliche Flächennutzung angewendet. Der zweite Arbeitsschritt adressiert die Ausbaupotenziale für die Photovoltaik. Auf Basis frei verfügbarer Geodaten können fundierte Aussagen über den Zubau mittels spezifischer Kennwerte abgebildet werden. In einem letzten Schritt erfolgt darüber hinaus die Modellierung für die Zubaupotenziale für Dachflächen-PV. Mit diesem Arbeitsschritt soll vollständig aufgezeigt werden, welche EE-Strommengen in der Modellregion maximal nutzbar sind, wohlwissend, dass kleine häusliche Anlagen nicht zwingend für den Betrieb eines Elektrolyseurs genutzt werden.

5.2.1 Potenziale zum Ausbau der Windkraft

Die Ermittlung der Potenziale für den Ausbau der Windkraft im vorliegenden Untersuchungsgebiet der Modellregion Chemnitz erfolgt in Anlehnung an bestehender renommierter Literatur wie einerseits die Studie EE100 konkret - Naturverträgliche Ausgestaltung der Energiewende [81] und andererseits die Ausarbeitung des BMWK – Flächenverfügbarkeit für Windenergie an Land post-2030 [82]. In beiden Literaturquellen werden mittels konkreter Flächenverfügbarkeit die Bedeutung und die Potenziale der Windkraft für Deutschland analysieren. Die Modellierung erfolgt anhand einer Untersuchung von Restriktions- und Selektionsflächen auf Basis des Geodatensatz des digitalen Landschaftsmodell (DLM 250). Dabei werden alle Flächenkategorien gemäß den Regionalplänen zur Flächenausweisung in „harte“ und „weiche“ Tabuzonen eingeteilt. Die daraus abgeleitete DBI-Methodik wandelt dieses Vorgehen im Rahmen der Bearbeitung vereinfacht unter Zuhilfenahme eines Geoinformationssystem (GIS) ab.

Für die Modellierung setzt das DBI auf das, vom Geoportal Sachsen zur Verfügung gestellte DLM 50 (Digitales Landschaftsmodell 50) [83]. Der Objektkatalog für die Objektarten, -nummern und -attribute (Stand: 2021) ermöglicht die Einteilung in die obengenannten Tabuzonen. Im GIS werden die Flächen überlagert, um solche Flächen zu identifizieren, für die keine Restriktionen oder Einschränkungen gelten. Solche Flächen im Untersuchungsgebiet können als Potenzialgebiete für Windenergie definiert werden. Bei dieser Verschneidung bzw. Überlagerung entstehen sehr komplexe Geometrien, die unter einem hohen Rechenaufwand erzeugt und ausgewertet werden müssen.

Die Definition der Tabuzonen wird gemäß nachfolgender Erläuterung getroffen:

- „harte“ Tabuzone: tatsächliche oder rechtliche Gründe gegen eine WEA
- „weiche“ Tabuzone: Nutzung im Einzelfall unter Abwägung regionalplanerischer Aspekte
- Potenzialgebiete Wind: verfügbare Fläche, ausgewiesen als Vorrang- und Eignungsgebiet für die Windkraft (VREG Wind)

Das methodische Vorgehen sowie die Einteilung der Flächenkategorien können aus der nachfolgenden Grafik entnommen werden.



Abbildung 14: Schaubild der angewendeten Methodik für die Ermittlung der Potenzialgebiete Wind

Die obenstehende Abbildung 14 visualisiert die ersten Arbeitsschritte der Methodik mit dem Ziel der Ermittlung der VREG Wind, die sich für den WEA-Zubau in der Modellregion eignen. Neben der Einteilung der Flächenkategorien bedarf es für die GIS-basierte Umsetzung der Tabuzonen noch spezifische Modellierungskennwerte, welche von der zu errichtenden WEA abhängig sind. So bildet insbesondere der Rotordurchmesser ein Maß für einen zu gewährleistenden Abstand zusätzlich zur Fläche dar. Um den Einfluss abbilden zu können wird eine modellhafte WEA



definiert, die den aktuellen Entwicklungen der Windkraftbranche Rechnung trägt. In den letzten Jahren haben sich neu errichtete Anlagen sowohl in der Nabenhöhe als auch im Rotordurchmesser vergrößert, was in einem Anstieg der elektrischen Nennleistung mündet. Als Basis der Modell-WEA dient erneut die Studie EE100 konkret des Bundesamts für Naturschutz (BfN) [81]. Die nachfolgende Tabelle fasst die wesentlichen Kennwerte zusammen.

Tabelle 2: Kennwerte der Modell-WEA nach [81]

WEA-Kennwert	Kennwert inkl. Einheit
Nennleistung	7,2 MW
Nabenhöhe	200 m
Rotordurchmesser	127 m

Die Kennwerte in Tabelle 1Tabelle 2 zeigen, dass es sich bei der DBI-Annahme um eine (sehr) große WEA handelt. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt befinden sich an Land noch keine WEA dieser Größenordnung im Bau oder sind bereits an Land installiert. Die technische Entwicklung steigender Anlagenleistungen wird jedoch durch Prognosen gestützt. Ein Beleg für diese Annahme ist der aktuelle Statusbericht (1. Halbjahr 2022) zum Ausbau der Windenergie an Land in Deutschland, der von der Deutschen Windguard erstellt wurde [84]. Aus den Daten geht hervor, dass bereits heute die durchschnittliche Leistung der Anlagen bei mehr als 4 MW liegt. Zudem beträgt der Rotordurchmesser bereits 133 m und die Nabenhöhe 134 m, so dass die Gesamthöhe der Anlagen über 200 m beträgt.

Um eine ambitionierte Bandbreite des WEA-Zubaupotenzials aufzuzeigen, werden in Abstimmung mit der Stadt Chemnitz die WEA-Kennwerte aus obiger Tabelle 2 für die DBI-Modellierung verwendet.

Nachfolgend wird die Flächenklassifizierung der Objektarten des DLM 50 prägnant zusammengefasst und zur Nachvollziehbarkeit vorgestellt.

Flächenklassifizierung:

Die Zuordnung der Daten des DLM 50 in die „Tabuzonen“ ist ein wesentlicher Arbeitsschritt in Vorbereitung der Modellierung. Neben den Rohdaten der Geodaten, müssen weiterhin auch diverse Abstandregelungen zu diesen Flächen im Kontext einer Ausweisung eines Vorrang- und Eignungsgebiet für WEA beachtet werden. Die im Allgemeinen wohl meist diskutierte Abstandsregelung ist die zum Siedlungsbereich. Nach aktueller sächsischer Bauordnung im § 84 Abweichungen von § 35 des Baugesetzbuches wird in Sachsen die Distanz zwischen Wohnbebauung und einer WEA auf 1.000 m festgesetzt. Dieser gesetzliche Rahmen hat auf die Ausweisung der Vorzugsgebiete Wind den wohl größten Einfluss.

Zur Nachvollziehbarkeit folgt eine vereinfachte Auflistung der „Tabuzonen“:

- „harte Tabuzone“:
 - Schutzgebiete (wie Gewässer, Nationalparks, Naturschutzgebiete, Biosphärenreservates usw.)
 - Infrastruktur (wie Straßen, Bahntrassen, Stromleitungstrassen, Seilbahnen, Flugverkehr)
 - Siedlungsbereiche
 - Sport-, Freizeit-, und Erholungsgebiete
 - Industrie- und Gewerbegebiete
 - Wald (Exkurs: eine gesetzliche Regelung, die die Errichtung von Windenergieanlagen im Wald verbietet, besteht nicht.)
- „weiche Tabuzone“:
 - Sport-, Freizeit-, und Erholungsgebiete (Abstand von 1.000 m)

Die Klassifizierung zeigt die wesentliche Einordnung der Objektkategorien. Im Anhang 1 werden die detaillierten Annahmen inkl. der spezifischen Puffer (unter Beachtung der Modell-WEA) aufgezeigt.

Im Rahmen der GIS-Modellierung werden in Abstimmung mit der AG zwei unterschiedliche Beispielrechnungen durchgeführt. Der erste Modelllauf bildet den aktuellen Status quo mit den geltenden rechtlichen Rahmenbedingungen ab. Dabei wird auch der Wald entsprechend dem allgemeinen Verständnis als „harte Tabuzone“ für die Errichtung von WEA eingestuft. Dieser Modelldurchlauf stellt darüber hinaus auch die Grundlage für die Ermittlung der Ausbaupotenziale Wind dar. Da jedoch gemäß dem *Sachlichen Teilregionalplan Wind* [85] des



Planungsverbandes Chemnitz keine eindeutige rechtliche Definition des Waldes vorliegt und in der aktuellen politischen Diskussion im Freistaat Sachsen die Option einer Öffnung der sächsischen Waldflächen diskutiert wird, soll im zweiten Modelldurchlauf genau diese Option adressiert werden.

Die Modellierung folgt dem Prinzip der flächenhaften Überlagerung mittels eines Geoinformationssystems. Auf diese Weise ist eine flächenscharfe Ermittlung der Gebiete möglich, bei denen weder „harte“ noch „weiche“ Restriktionsgründe gegen die Errichtung von Windenergieanlagen sprechen. Abschließend wird eine Bewertung der „weichen“ Tabuzonen vorgenommen, in denen im Einzelfall eine Nutzung im Rahmen der Regionalplanung denkbar sein kann. Diese Flächen bilden in ihrer Gesamtheit das Ausbaupotenzial und Grundlage der weiteren Modellierung.



Im Folgenden werden die Ergebnisse zunächst in tabellarischer Form und anschließend in Form von GIS-Karten dargestellt.

Tabelle 3: Ergebnisse der Flächenmodellierung für die Windenergie in der Modellregion

Fläche Modellregion in m ²	Flächenkategorie	Abstand zu Siedlungen (1.000m)	Anteil in % (1.000m)
6.536.000.000	VREG Wind	34.634.000	0,53 %
	weiche Tabuzone	38.582.000	0,59 %
	Summe	73.216.000	1,12 %

Die Ergebnisse in Tabelle 3 zeigen, dass in der Modellregion unter der Annahme der aktuellen gesetzlichen Regelung der sächsischen Bauordnung (1.000 m Abstand zur Wohnbebauung) nur ca. 1,12 % der Fläche als Windeignungsgebiete ausgewiesen werden können. Im Modelllauf eins werden keine Waldgebiete bzw. Waldflächen einbezogen und es erfolgt keine detaillierte Untersuchung im Kontext von Brutgebieten bzw. gefährdeten Vogelarten. Die Ergebnisse geben im Rahmen der Aufgabenstellung noch keine verbindliche Aussage zur Verfügbarkeit und bedürfen in jedem Fall einer planerischen Einzelfallprüfung.

Vor dem Hintergrund dieser methodischen Einschränkungen zeigen die Daten, dass zur Erreichung des 2 %-Ziels der Bundesregierung für den Ausbau der Windenergie deutlich mehr Flächen benötigt werden. In diesem Fall ist in Zukunft mit hoher Wahrscheinlichkeit eine Reduzierung des Haupteinflusses des Abstandes zu Siedlungsflächen / Wohngebieten oder ggf., wie im zweiten Modelllauf simuliert, die Festlegung weiterer „weicher“ Tabuzonen erforderlich.

Legende

- Untersuchungsgebiet Südsachsen
- Potenzialgebiete Wind (VREG Wind)
- weiche Tabuzonen

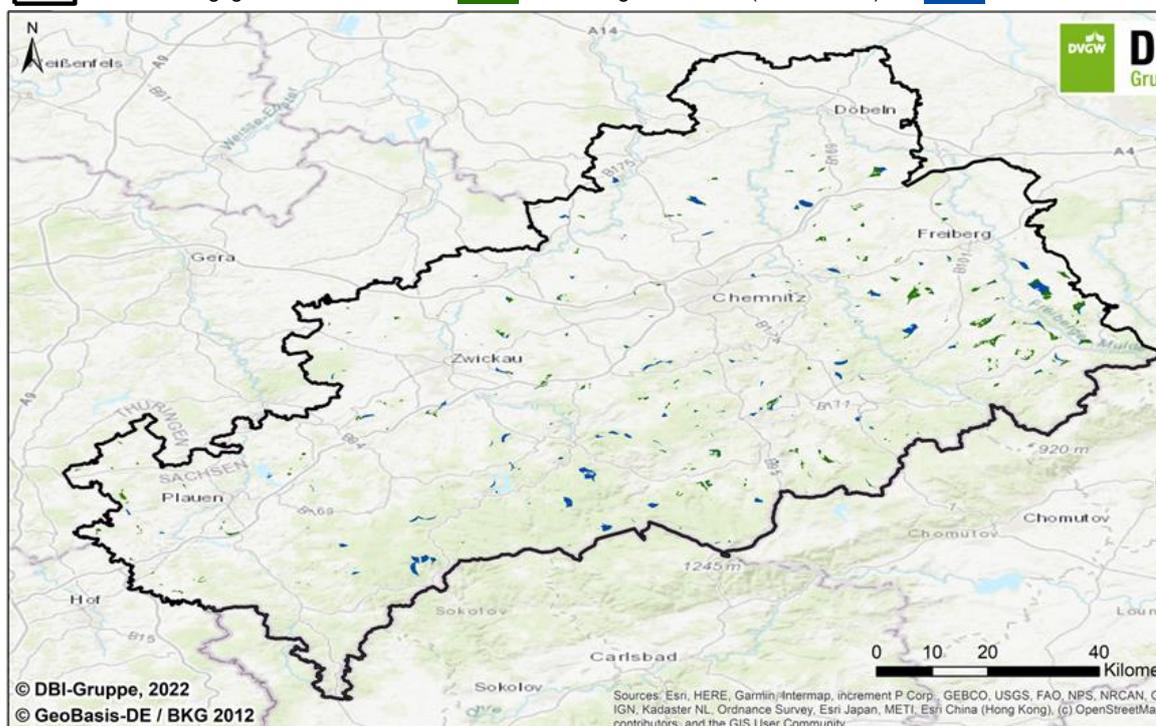


Abbildung 15: Ergebnis Potenzialanalyse für Windeignungsgebiete in der Modellregion (Abstand Siedlung: 1.000 m)

Die in Abbildung 15 dargestellte Karte der Modellregion zeigt das Ergebnis der Modellierung der Vorrang- und Eignungsgebiete Wind sowie der ermittelten „weichen“ Tabuzonen. Die Daten verdeutlichen, dass vor allem im Landkreis Mittelsachsen, insbesondere im südlichen Mittelsachsen, zukünftig die größten Potenziale für den Zubau von WEA bestehen. In diesem Cluster liegen die größten VREG-Flächen (grün). Darüber hinaus zeichnen sich im Landkreis Mittelsachsen, im Vogtlandkreis sowie im Erzgebirgskreis große Flächen „weicher“ Tabuzonen (blau) ab.

In einem nächsten Schritt sollen auf der Grundlage der ermittelten Flächen - unter Berücksichtigung der technisch notwendigen Abstandsregelungen - konkrete Standorte für die Errichtung von Windenergieanlagen (WEA) ermittelt werden. Ziel ist es, die zur Verfügung stehenden Flächen möglichst effizient zu nutzen, um möglichst viele Anlagen errichten zu können. Ausgangspunkt ist eine Auswahl von Flächen nach ihrer spezifischen Größe. Für den Flächenbedarf einer neu zu errichtenden WEA (Fundament, Zuwegung etc.) wird von einer Mindestgröße von ca. 750 m² ausgegangen. Darüber hinaus sind beim Betrieb der Anlagen Abstände in Abhängigkeit vom Rotordurchmesser sowohl in Hauptwindrichtung (HWR) als auch in Nebenwindrichtung (NWR) einzuhalten. Die derzeit gültigen Regelungen sehen in der HWR einen Abstand in Höhe des 5-fachen Rotordurchmessers und in der NWR einen Abstand in

Höhe des 3-fachen Rotordurchmessers vor. Diese Ellipse wird modellhaft als Kreisfläche des 4-fachen Rotordurchmessers angenommen, um die Umsetzung in der Modellpraxis zu vereinfachen. Als Abstand der WEA untereinander wird somit, ausgehend von der in Tabelle 2: Kennwerte der Modell-WEA nach [81] gewählten Modell-WEA, ein Abstand (Kreisradius) von 508 m festgelegt. Im Folgenden werden die einzelnen Schritte der Modellierung in vereinfachter Form anhand der nachfolgenden Grafik dargestellt und im Detail beschrieben.

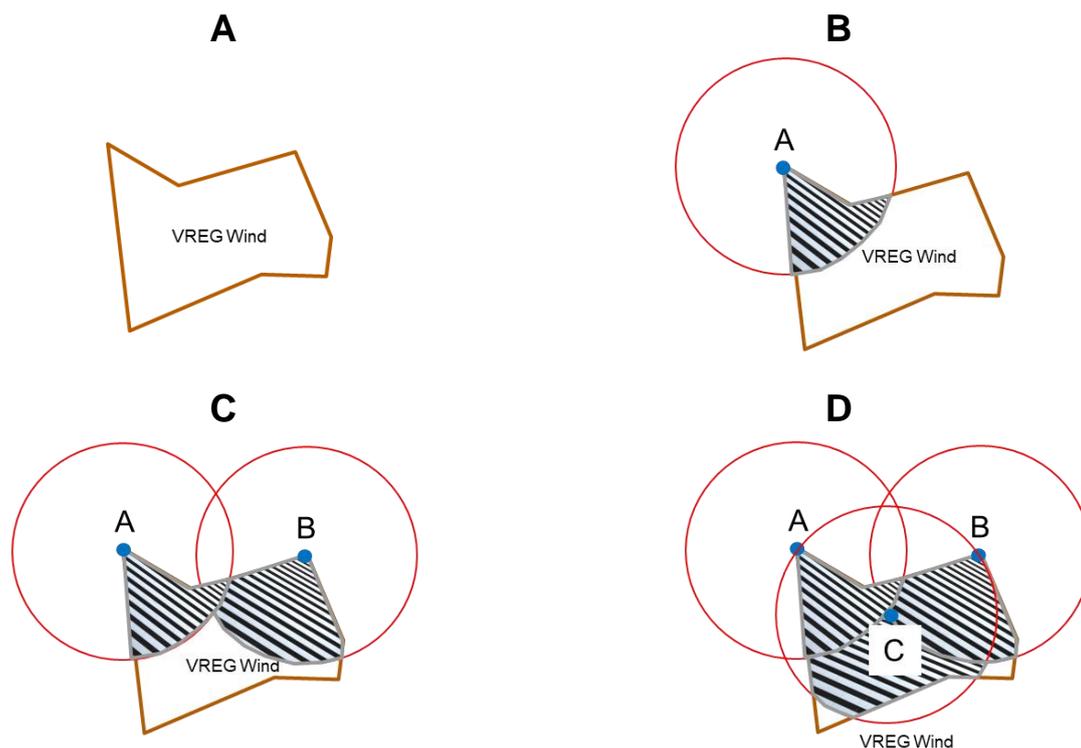


Abbildung 16: Schaubild zur modellhaften Ermittlung konkreter WEA Standorte

Die obige Abbildung zeigt in Bild A eine zufällig bestimmte VREG-Fläche. In einem zweiten Schritt (Bild B) wird ein Eckpunkt (in diesem Fall der nördlichste Punkt) ausgewählt und mit einer WEA belegt. Darauf aufbauend wird die getroffene Annahme der Abstandsregelung umgesetzt und die überstrichene Fläche im weiteren Modelllauf als Ausschlusszone für weitere WEA definiert. Diese Modelllogik setzt sich nun in den Abbildungen C und D fort. In Abbildung D wird deutlich, dass bis zum Ende der Modellierung die VREG-Fläche mit 5 neuen Modell-WEA gefüllt ist.

Diese Methodik wird einheitlich für die gesamte Modellregion Chemnitz angewendet und ausgewertet. Nach erfolgreichem Modelldurchlauf müssen die neuen WEA-Standorte in einem Abgleich mit dem bestehenden Anlagenbestand der Modellregion abgeglichen werden, damit keine bestehende Anlage den WEA-Neubau verhindert. Durch diesen logischen Schritt werden einige wenige Anlagen vom Zubau ausgeschlossen. Als Ergebnis dieses Abgleichs können im

ersten Modellauf 479 Anlagen ermittelt werden. Für die zweite Betrachtung werden neben den ermittelten VREG-Gebieten zusätzlich die "weichen Tabuzonen" berücksichtigt. Damit stehen dem Modell deutlich mehr und auch größere Windenergieflächen für die Neuerrichtung von WEA in der Modellregion zur Verfügung. In diesem Modellauf können bei vergleichbarer methodischer Herangehensweise 847 Modell-WEA in der Region ausgewiesen werden.

Legende

- Untersuchungsgebiet Südsachsen
- Bestandsanlagen Windkraft
- Standorte WEA-Potenzial

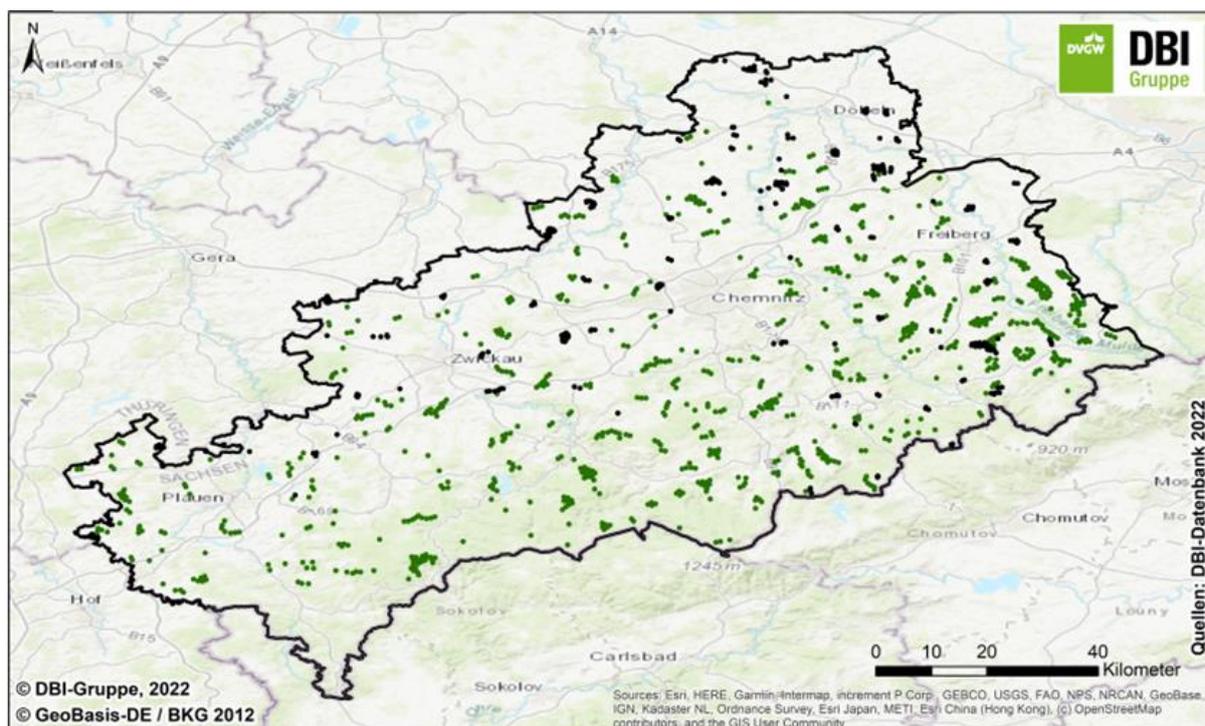


Abbildung 17: Ausbaupotenzial von WEA in der Modellregion (Süd-)Chemnitz unter Verwendung der ermittelten VREG Wind sowie den „weichen Tabuzonen“

In der Abbildung sind die Ergebnisse des zweiten Modellaufs zur Ermittlung des Ausbaupotenzials von 847 neuen Modell-WEA dargestellt. Eingezeichnet sind neben den Standorten für den Neubau auch die Standorte der Bestandsanlagen, wobei die Verteilung innerhalb der Modellregion deutlich wird. Der Landkreis Mittelsachsen kristallisiert sich als zukünftiges Vorzugsgebiet für Windenergie in der Modellregion heraus. Die Errichtung und der Betrieb neuer, großer Windparks sind in dieser Region potenziell möglich. Ausgehend von der konkreten Anzahl für den WEA-Zubau werden in einem letzten Schritt drei verschiedene Ausbauszenarien abgeschätzt, um eine Bandbreite des Potenzials zu definieren. Die in der Modellierung verwendete Modell-WEA ist eine sehr große WEA, die derzeit noch nicht an Land errichtet wird. Die Autoren der Studie gehen jedoch davon aus, dass solche Anlagen technisch



ausgereift und zukünftig einsetzbar sind. Um dennoch Status quo besser Rechnung tragen zu können, wird die ermittelte Anzahl der Anlagen im Rahmen der drei Ausbaustufen mit drei Werten variiert. Die drei Ausbaustufen konservativ, moderat und ambitioniert werden im Folgenden definiert.

Tabelle 4: Definition und Kennwerte der drei Ausbaustufen

Ausbaustufe	durchschnittliche elektr. Leistung in MW	Erklärung	Quelle
konservativ	1,38	durchschnittliche Leistung aller Bestands-WEA in der Region (Süd-)Chemnitz	[80]
moderat	5,10	durchschnittliche Leistung der WEA Zubau im Jahr 2022 in Sachsen	[86]
ambitioniert	7,20	durchschnittliche Leistung der WEA, Annahme DBI (Basis der DBI-Modellierung)	[81]

In Tabelle 4 sind die einzelnen Ausbaustufen der Modell-WEA dargestellt. Zur Beschreibung einer Bandbreite der Ausschöpfung des maximalen Ausbaupotenzials werden alle 3 Leistungsangaben verwendet. Für die Modellregion Chemnitz stellt die getroffene Annahme der großen Onshore-Anlage mit 7,2 MW das ambitionierteste Ziel dar. Die moderate Anlage mit 5,2 MW visualisiert eine Welt, in der der aktuelle Ausbaustand im gesamten Freistaat Sachsen berücksichtigt wird. Der konservative Ansatz verwendet das arithmetische Mittel des Anlagenbestandes. Anzumerken ist an dieser Stelle explizit, dass es sich bei diesen Annahmen um eine vereinfachte Abschätzung des Potenzials handelt. Bei einer Verringerung der elektrischen Leistung der Anlagen (moderate und konservative Ausbaustufe) ändert sich neben der Nabenhöhe auch der Rotordurchmesser. Aus diesem Grund ändert sich die zuvor dargestellte Modelllogik. Tendenziell können mehr Anlagen auf der gleichen Fläche der ermittelten VREG-Gebiete lokalisiert werden. Der Detaillierungsgrad wird in der vorliegenden Betrachtung nicht angestrebt und dient lediglich der Darstellung einer möglichen Bandbreite. Die Ergebnisse des gesamten Ausbaupotenzials in den drei Ausbaustufen sind in der folgenden Tabelle 5 dargestellt.



Tabelle 5: Ergebnisse des WEA-Ausbaupotenzials der Modellregion Chemnitz

Modellierung: 1.000m Siedlungsabstand			Ausbaupotenziale in [MW] (3 Stufen)		
Szenarien	Anzahl der Standorte WEA		konservativ	moderat	ambitioniert
Szenario I (VREG Wind)	479		661	2.443	3.449
Szenario II (VREG + weiche Tabuzone)	847		1.169	4.320	6.098

Die Daten zeigen, dass in der Modellregion Chemnitz je nach Szenario und Ausbaustufe Ausbaupotenziale zwischen 660 MW und 6.000 MW bestehen. In der moderaten Ausbaustufe wird, der aus heutiger Sicht wahrscheinlichste Pfad mit einem Gesamtzubau zwischen 2,4 und 4,3 GW Windenergie in der Region beschrieben. Die landkreisscharfen Werte des Zubaupotenzials können dem H₂-Marktplatz Chemnitz entnommen werden.

Exkurs Waldflächen:

Im Zuge der aktuellen medialen Diskussionen im Freistaat Sachsen rückt die Bedeutung und Öffnung der sächsischen Waldflächen für die Windenergie zunehmend in den Vordergrund. Verschiedene Meldungen zu dieser Problematik sind in den letzten Wochen und Monaten erschienen. Daher soll an dieser Stelle ein kurzer Exkurs zu den Ausbaupotenzialen der Windenergie in den sächsischen Waldgebieten erfolgen. Auf Wunsch des Auftraggebers wurde die bisher vorgestellte Methodik einschließlich der Modelllogik zur Verteilung der tatsächlichen Standorte auch für Waldflächen als "weiche Tabuzone" modelliert. Ein hartes Verbot von WEA im Wald bestand in Sachsen aus regionalplanerischer Sicht zu keinem Zeitpunkt. Bis auf die in der Tabelle im Anhang 1 aufgeführten tatsächlichen Ausschlussgründe ("harte Tabuzonen") liegen bisher keine konkreten regionalplanerischen Vorgaben vor. Vor diesem Hintergrund werden im Folgenden die Ergebnisse der zweiten Modellierung kurz dargestellt. Sofern Waldflächen als WEA-Flächen in die Analysen einbezogen werden, stehen deutlich größere Potenzialflächen zur Verfügung. Im Vergleich zu Tabelle 3 ergibt sich nahezu eine Verfünffachung der zur Verfügung stehenden Fläche (ca. 5 % der Modellregion werden als "weiche Tabuzone" ausgewiesen). Bezogen auf die konkrete Anzahl neuer Modell-WEA (7,2 MW elektrische Nennleistung) können mehr als 2.000 Standorte identifiziert werden. Diese enorme Steigerung (Verdoppelung) lässt sich mit den ausgedehnten Waldflächen in der



Modellregion Chemnitz begründen. Diese Ergebnisse werden im weiteren Projektverlauf nicht berücksichtigt.

5.2.2 Potenziale zum Ausbau von Photovoltaik

Die Ermittlung der Potenziale für den Ausbau der Photovoltaik wird unterteilt in PV-Freiflächen (auf landwirtschaftlichen Flächen und entlang von Bundesautobahnen (BAB) und Schienenwegen) und PV-Dachflächen. In diesem Zusammenhang werden alle Methodiken und Datengrundlagen kurz vorgestellt und in ihrer Gesamtheit bewertet. Im Ergebnis sollen die Potenziale für den Ausbau der Photovoltaik in der Modellregion Chemnitz zur Verfügung stehen.

5.2.2.1 PV (Freiflächen) - auf Agrarflächen

Im vorliegenden Untersuchungsgebiet der Modellregion Chemnitz erfolgt die Ermittlung der Potenziale für den Ausbau der Photovoltaik auf Basis frei verfügbarer Geodaten. Die grundsätzlich verfügbaren Flächen (auf Ackerland und Grünland in benachteiligten Gebieten), die für die Nutzung durch PV-Freiflächenanlagen prädestiniert sind, stellt der Photovoltaik- und Windflächenrechner - Geodaten Potenzialflächen des Reiner Lemoine Instituts (RLI) als Datendownload zur Verfügung [87]. Dabei werden die Daten für die Modellregion Chemnitz extrahiert und für jeden Landkreis die Gesamtfläche ausgewertet. Der Datensatz enthält eine differenzierte Betrachtung der potenziellen Fläche auf Basis des Soil Quality Ratings (SQR), welches die Qualität des Bodens einer landwirtschaftlich genutzten Fläche definiert. Nur Flächen mit sehr geringer und geringer Ertragsfähigkeit (< 40 Punkte) werden als potenzielle PV-Freiflächenstandorte berücksichtigt. Durch diesen Arbeitsschritt werden also keine Flächen umgewidmet, die eine wesentliche Bedeutung für die landwirtschaftliche Versorgung haben. In einem letzten Arbeitsschritt müssen die Flächen noch mit einem Kennwert für die pauschale Flächenleistung verrechnet werden. Da die Module bei Freiflächenanlagen geneigt aufgeständert werden, gilt jedoch nur ein Teil der reinen Modulfläche als Grundfläche. Des Weiteren müssen Abstände zwischen den Modultischen zur Vermeidung gegenseitiger Verschattung vorhanden sein. Darüber hinaus muss Platz für die Zufahrten vorgesehen werden, um die Module zu warten. Als spezifische Flächenleistung wird ein Flächenbedarf von $10 \text{ m}^2/\text{kW}_{\text{peak}}$ bzw. $1 \text{ ha}/\text{MW}_{\text{peak}}$ angenommen [88].

5.2.2.2 PV (Freiflächen) entlang von Bundesautobahnen (BAB) und Schienenverkehrswegen im Abstand von 200 m

Als Datengrundlage für diese Modellierung dienen wiederum die Flächen des Photovoltaik- und Windflächenrechners - Geodaten Potenzialflächen des Reiner Lemoine Instituts (RLI) [87]. Über den Datendownload können die Flächen entlang von Autobahnen oder Schienenwegen in einem Abstand von 200 m abzüglich eines Puffers von 15 m um die Verkehrswege heruntergeladen werden. Acker- und Grünlandflächen innerhalb dieser Korridore werden auch hier nur mit einem SQR von max. 40 als zulässig angesehen. Höherwertige Ackerflächen sind zur Vermeidung von Konflikten mit der Nahrungsmittelproduktion nicht Bestandteil der Flächenkulisse. Als pauschale Flächenleistung wird wiederum ein Wert von $1 \text{ MW}_{\text{peak}} / 10.000 \text{ m}^2$ angenommen [88].

5.2.2.3 PV auf Dachflächen

Insbesondere im urbanen Raum ist ein erhebliches PV-Potenzial auf Dachflächen zu erwarten. Daher soll in der Modellregion ein Schwerpunkt auf die Ermittlung dieser PV-Potenziale gelegt werden. Zu diesem Zweck werden die 3D-Gebäudedaten der DBI-GIS-Datenbank für die Modellierung verwendet. Auf den Gebäuden sind im Wesentlichen die Dachflächen für die Installation von PV-Anlagen geeignet. Für die Analyse stehen am DBI verschiedene bestehende Werkzeuge zur Verfügung. Diese ermöglichen die Ermittlung der relevanten Gebäudeinformationen. In einem ersten Schritt werden sowohl die Ausrichtung (Azimut) als auch die Größe des Daches für jedes Gebäude in der Modellregion ermittelt. Der Azimut beschreibt den Winkel zwischen dem Süden und der Flächennormalen einer Photovoltaikanlage und damit die Ausrichtung der Anlage in Bezug auf den Himmel. Um einen möglichst hohen Ertrag zu erzielen, werden Photovoltaikanlagen auf der Nordhalbkugel nach Süden ausgerichtet. Der Azimut nimmt Werte zwischen -90° und $+90^\circ$ an, wobei 0° die Ausrichtung nach Süden beschreibt.

Weiterhin wird der georeferenzierte Standort verwendet, um die jeweilige jährliche Einstrahlung auf ein PV-Modul gebäudescharf zu berechnen. Diese setzt sich aus der direkten, diffusen und reflektierten Strahlung zusammen. Aus der so ermittelten Einstrahlung und der Größe der zur Verfügung stehenden Dachfläche kann eine potenziell installierbare Leistung der PV-Anlage ermittelt werden. An dieser Stelle wird explizit darauf hingewiesen, dass von der gesamten ermittelten Dachfläche nur ein Teil für die Installation von Photovoltaikanlagen zur Verfügung steht. Für die Modellregion wird pauschal angenommen, dass die verfügbare Dachfläche um ca. 25 % abnimmt. Im Ergebnis wird für jedes Gebäude eine elektrische Leistung für die PV-Anlage auf der bestmöglichen Dachfläche ermittelt.



Tabelle 6: Ergebnisse Zubaupotenziale Photovoltaik in der Modellregion Chemnitz

Name	Administrative Einheit	PV-Freifläche (landw. Nutzfläche) in MW	PV-Freifläche (BAB und Schiene – 200 m) in MW	PV-Dachflächen in MW
Chemnitz	Kreisfreie Stadt	0	61	626
Erzgebirgskreis	Landkreis	842	226	1.457
Mittelsachsen	Landkreis	259	205	1.531
Vogtlandkreis	Landkreis	325	266	1.128
Zwickau	Landkreis	123	37	1.258
Summe	Modellregion Chemnitz	1.549	795	6.000

Die Daten in Tabelle 6 zeigen das gesamte ermittelte Photovoltaik-Zubaupotenzial in der Modellregion Chemnitz, aufgeteilt in die drei Unterkategorien. Der größte Zubau kann über PV-Dachflächen auf Gebäuden realisiert werden. Mit 6 GW elektrischer Leistung stellen diese dezentralen Anlagen eine gute Möglichkeit zur EE-Stromerzeugung dar. Für die Ermittlung der Elektrolysepotenziale werden sie jedoch nicht herangezogen, da die Einspeisung als Regelenergie in das Stromnetz erfolgt. Im Kontext der PV-Freiflächenanlagen kann ein Zubau von über 2,3 GW prognostiziert werden. Dieser kann zu zwei Dritteln durch die Umwidmung ertragsarmer landwirtschaftlicher Flächen realisiert werden. Darüber hinaus können weitere ca. 800 MW entlang von BAB und Schienenwegen in einem Abstand von bis zu 200 m installiert werden. Die landkreisscharfen Werte zeigen, dass in der Summe über alle drei Unterkategorien der Erzgebirgskreis über die größten ermittelten Zubaupotenziale verfügt.

5.2.3 Prognose des EE-Energieüberschusses zur Wasserstoffproduktion

Für die Planung des Aufbaus der Wasserstoffinfrastruktur ist es von Bedeutung, in welchem Umfang die Erzeugung von grünem Wasserstoff in der Modellregion zukünftig möglich sein wird. Eine Möglichkeit ist die Nutzung von Überschüssen aus erneuerbaren Energien (EE) in Elektrolyseuren. Um abzuschätzen, welche Mengen auf diese Weise erzeugt werden könnten, ist eine Abschätzung der EE-Überschüsse in der Modellregion notwendig. Die Abschätzung erfolgt für die Stützjahre 2025, 2030 und 2040.

Die Vorgehensweise ist in Abbildung 18 schematisch dargestellt. Das Vorgehen umfasst die Abschätzung des zukünftigen Jahreslastgangs und des EE-Einspeiseprofiles und durch Differenzbildung daraus die Ermittlung eines Profils der EE-Überschussleistung. Die Abschätzung erfolgt für die Modellregion jeweils stundenscharf für das gesamte Stützjahr. Durch Integration des stündlichen Profils der Überschussleistung wird die Überschussenergie abgeschätzt, mit der in möglichen Wasserelektrolyseuren grüner Wasserstoff erzeugt werden kann. Der aktuelle Netzentwicklungsplan (NEP) der Bundesnetzagentur (BNetzA) enthält eine Prognose des Stromverbrauchs sowie der zukünftig installierten Leistung für die Jahre 2037 und 2045 in drei Szenarien (A, B, C). Die hier vorgenommenen Abschätzungen erfolgen ebenfalls im Rahmen dieser drei Szenarien. Szenario A geht von einer verstärkten Nutzung von Wasserstoff aus, während die Szenarien B und C von einer stärkeren direkten Elektrifizierung ausgehen. Der Hauptunterschied zwischen den Szenarien B und C besteht darin, dass in Szenario C eine schnellere Entwicklung als in Szenario B angenommen wird. Weitere Erläuterungen zum Szenariorahmen finden sich im NEP [89].

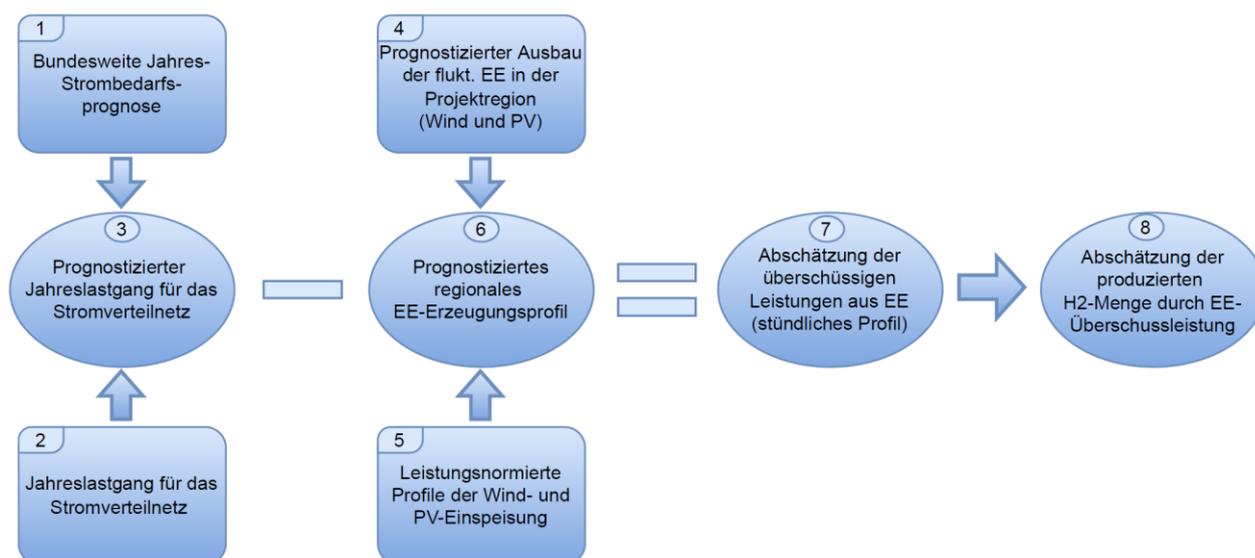


Abbildung 18: Vorgehensweise zur Abschätzung des zukünftigen erneuerbaren Energieüberschusses für die Verwendung in Wasserelektrolyseuren

Die folgenden detaillierten Erläuterungen zur Vorgehensweise beziehen sich jeweils auf die in Abbildung 18 grafisch dargestellten Teilschritte. Für die Prognose der zukünftigen Jahreslastgänge (Nr. 3) wird der aktuelle Jahreslastgang der Projektregion aus dem Jahr 2021 [90] (Nr. 2) verwendet und auf Basis der bundesweiten Stromverbrauchsentwicklung (Nr. 1) auf die Stützjahre hochgerechnet. Die Prognose des bundesweiten jährlichen Stromverbrauchs wird dem NEP entnommen. In allen drei Szenarien des NEP wird die Elektrolyselast separat ausgewiesen [89]. Für die Hochskalierung des Jahreslastgangs auf die Stützjahre wird zunächst der Nettostromverbrauch ohne Elektrolyselast ermittelt und anschließend ein Skalierungsfaktor gebildet. Der Skalierungsfaktor entspricht jeweils dem Verhältnis des prognostizierten Nettostromverbrauchs ohne Elektrolyselast zum aktuellen Nettostromverbrauch ohne Elektrolyselast. Unter der vereinfachenden Annahme einer linearen Entwicklung und einer derzeitigen jährlichen Wasserelektrolysearbeit von 0 TWh/a ergibt sich durch lineare Interpolation der Daten aus dem NEP eine Prognose für die betrachteten Stützjahre. Die verwendeten Werte sowie die Skalierungsfaktoren zur Hochskalierung des aktuellen Jahreslastgangs auf die Stützjahre sind in Tabelle 7 angegeben. Der Skalierungsfaktor ist jeweils innerhalb der Stützjahre für jede Stunde des Jahres gleich.



Tabelle 7: Bundesweiter Jahresstromverbrauch [89]

Szenario und Jahr		Nettostromverbrauch in TWh/a	davon für Elektrolyse in TWh/a	Nettostromverbrauch ohne Elektrolyselast in TWh/a	Skalierungsfaktor
Referenz		484	0**	484	
2025*	A	553	24	529	1,09
	B	565	22	544	1,12
	C	584	17	567	1,17
2030*	A	668	64	604	1,25
	B	701	58	643	1,33
	C	750	45	705	1,46
2037	A	828	120	708	1,46
	B	891	109	782	1,62
	C	982	84	898	1,86
2040*	A	892	165	727	1,5
	B	941	154	787	1,63
	C	1072	114	958	1,89
2045	A	999	240	759	1,57
	B	1025	230	796	1,64
	C	1222	165	1057	2,18

* bestimmt über lineare Interpolation

** vereinfachte Annahme

Für die Prognose des EE-Einspeiseprofiles (Nr. 6) werden bundeslandspezifische (hier: Sachsen) leistungsnormierte Profile der Wind- und PV-Einspeisung [91] (Nr. 5) mit der prognostizierten regional installierten EE-Leistung der Modellregion (Nr. 4) skaliert. PV-Dachanlagen sind in dieser Betrachtung nicht mit einbezogen. Grund für die Nichtberücksichtigung ist, dass von einem hohen Autarkiegrad der privaten Haushalte ausgegangen wird. Dies bedeutet, dass der erzeugte Strom vorrangig für den Eigenverbrauch genutzt wird. Die Zwischenspeicherung der Energie erfolgt über Batteriespeicher. Je höher der Autarkiegrad, desto geringer ist der regionale Lastgang des Verteilnetzes und desto geringer ist die Einspeisung durch PV-Dachanlagen. Beide Effekte wirken sich mit unterschiedlichen Vorzeichen auf die EE-Überschussleistung aus. Die prognostizierte installierte EE-Leistung für Deutschland, Sachsen und die Modellregion ist in Tabelle 8 dargestellt.

Die aktuelle installierte EE-Leistung Deutschlands (2021/2022) sowie die prognostizierte installierte EE-Leistung Deutschlands und Sachsens für die Jahre 2037 und 2045 sind dem NEP [91] entnommen. Die gesamte installierte PV-Leistung in Deutschland wird aufgeteilt in 72% PV-Dachanlagenleistung und 28% PV-Freiflächenleistung, basierend auf dem Verhältnis



Ende 2020/2021 [92, 93] . Aus dem Marktstammdatenregister werden die aktuell installierten EE-Leistungen für Sachsen (2022) und die Modellregion Chemnitz (2022) entnommen [94].

Die Daten der Stützjahre werden durch lineare Interpolation der vorhandenen Daten ermittelt. Für die regional prognostizierte installierte Leistung wird jeweils die gleiche relative Entwicklung wie im Bundesland Sachsen angenommen. Anzumerken ist, dass die erstellten Prognosen Unsicherheiten unterliegen. Das Einspeise- und Lastverhalten sowie die installierte Leistung von EE-Anlagen und Elektrolyseuren sind (regional) schwer prognostizierbar. Zudem stellen die angenommenen linearen Ausbaupfade Vereinfachungen dar, die in der Realität nicht zu erwarten sind.

Tabelle 8: Prognostizierte installierte EE-Leistung in GW [89, 94]

		Deutschland***				Sachsen			Modellregion		
Szenario und Jahr		Wind ON	Wind OFF	PV Dach	PV Freifl.	Wind ON	PV-Dach	PV-Freifl.	Wind ON	PV Dach	PV Freifl.
Referenz		56,1	7,8	42,7	16,6	1,3	1,2	0,9	0,46	0,47	0,22
2025	A	81,6*	18,5*	77,9*	53,0*	2,5*	2,3*	2,2*	0,87**	0,92**	0,53**
	B	81,6*	20,5*	77,9*	53,0*	2,5*	2,3*	2,2*	0,87**	0,92**	0,53**
	C	82,5*	20,5*	77,9*	53,0*	2,6*	2,3*	2,2*	0,89**	0,92**	0,53**
2030	A	113,5*	31,8*	121,8*	98,4*	4,5*	4,2*	4,4*	1,56**	1,66**	1,06**
	B	113,5*	36,3*	121,8*	98,4*	4,5*	4,2*	4,4*	1,56**	1,66**	1,06**
	C	115,4*	36,3*	121,8*	98,4*	4,7*	4,2*	4,4*	1,61**	1,66**	1,06**
2037	A	158,2	50,5	183,4	162	7,4	6,8	7,5	2,53**	2,7**	1,79**
	B	158,2	58,5	183,4	162	7,4	6,8	7,5	2,53**	2,7**	1,79**
	C	161,6	58,5	183,4	162	7,6	6,8	7,5	2,62**	2,7**	1,79**
2040	A	158,9*	57,8*	193,8*	172,5*	7,4*	7,2*	8,0*	2,55**	2,84**	1,90**
	B	158,9*	62,8*	193,8*	172,1*	7,4*	7,2*	8,0*	2,55**	2,84**	1,90**
	C	168,5*	62,8*	202,4*	172,1*	8,1*	7,5*	8,3*	2,79**	2,96**	1,99**
2045	A	160	70	211	189,9	7,5	7,8	8,7	2,57**	3,09**	2,08**
	B	160	70	211	189	7,5	7,8	8,7	2,57**	3,09**	2,08**
	C	180	70	234	189	8,9	8,6	9,7	3,07**	3,41**	2,32**

* Über lineare Interpolation bestimmt

** Annahme gleiche relative regionale Entwicklung wie im Bundesland Sachsen

*** Aufteilung auf PV-Gesamtleistung in 72% PV-Aufdach-Leistung und 28% PV-Freiflächen-Leistung

Es erfolgt eine Differenzbetrachtung zwischen dem regional prognostizierten EE-Erzeugungsprofil und dem regional prognostizierten Jahreslastgang (Nr. 7). Das Ergebnis dieser Betrachtung ist eine Abschätzung der EE-Überschussleistung in Form eines stündlich



aufgelösten Profils. Abbildung 19 zeigt exemplarisch die Differenzbetrachtung für das Szenario B im Jahr 2040 für vier ausgewählte Wochen des Jahres.

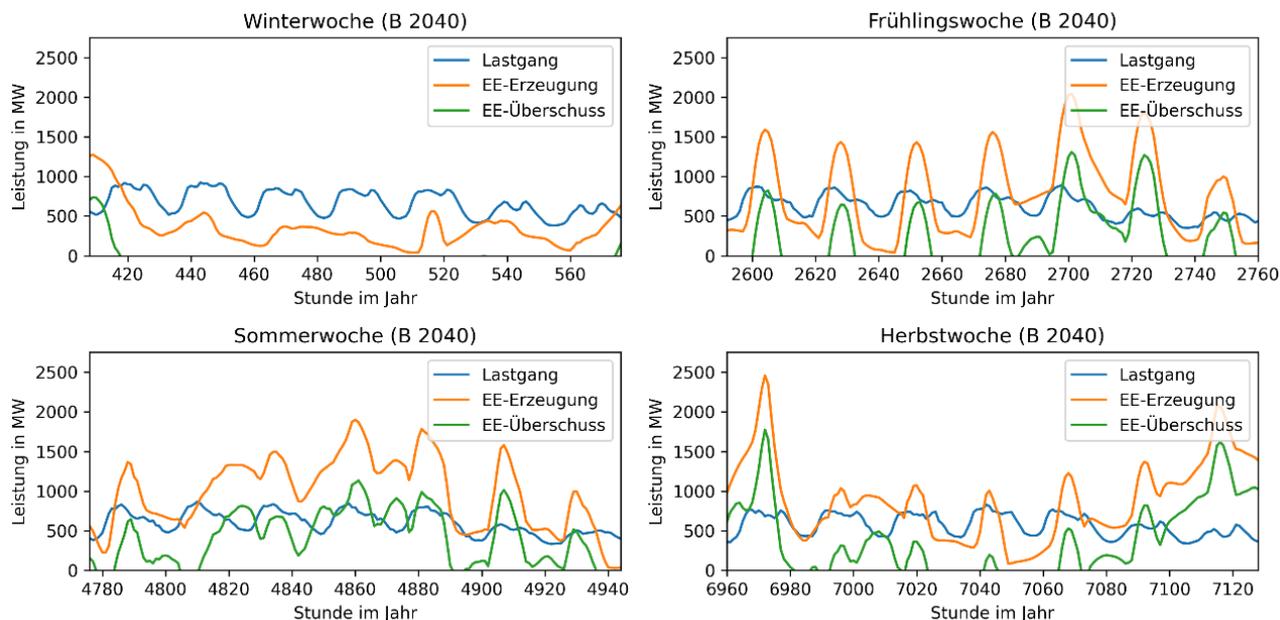


Abbildung 19: Differenzbetrachtung in vier ausgewählten Wochen - Szenario B im Jahr 2040

Durch Integration über alle positiven EE-Überschussleistungen ergibt sich die jährliche Überschussenergie, die in Tabelle 9 für alle Jahre und Szenarien angegeben ist.

Tabelle 9: Jährliche Überschussenergie in GWh/a

	2025			2030			2040		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Jährliche elektr. Überschussenergie	166	152	141	1015	907	806	2990	2747	2562

Wichtig sind Überlegungen, wie Überschussenergie genutzt werden kann. Eine Möglichkeit ist die Speicherung in Pumpspeicherkraftwerken. In der Region gibt es das Pumpspeicherkraftwerk Markersbach mit einer installierten Leistung von 1,05 GW und einem Energieinhalt von 4,12 GWh [95]. Darüber hinaus kann überschüssiger Strom an der Strombörse verkauft werden. In Zeiten hoher EE-Überschüsse ist jedoch mit sehr niedrigen oder negativen Strompreisen zu rechnen. Eine weitere Möglichkeit ist die Nutzung der überschüssigen Energie in Elektrolyseuren zur Erzeugung von grünem Wasserstoff. Andere Energiespeicher sind ebenfalls denkbar. Es ist jedoch davon auszugehen, dass ein Großteil der Überschussenergie für die Wasserstoffproduktion genutzt werden kann. Diese Einschätzung basiert auf der Annahme einer zukünftig gut ausgebauten H₂-Infrastruktur in der Modellregion.

Dabei ist zu beachten, dass die produzierbare Wasserstoffmenge von der installierten Leistung der Elektrolyseure in der Region abhängt und der darüberhinausgehende Überschuss nicht in Wasserstoff umgewandelt werden kann. Aus diesem Grund erfolgt die Bestimmung der produzierbaren Wasserstoffmenge in Abhängigkeit von der installierten Elektrolyseleistung. Bei der Betrachtung wird davon ausgegangen, dass der Stromtransport über das Stromnetz kein limitierender Faktor ist und somit überschüssige Energie in der Region in allen Elektrolyseuren genutzt werden kann.

Zunächst wird auf Basis des EE-Überschussprofils in der Modellregion die Anzahl der möglichen Volllaststunden ermittelt. Anschließend wird die Anzahl der Volllaststunden mit der jeweils angenommenen Elektrolyseleistung der Projektregion multipliziert, um die insgesamt in Elektrolyseuren eingesetzte elektrische Energie zu ermitteln. Mit Hilfe des Wirkungsgrades eines Elektrolysesystems (Annahme: PEM-Elektrolyse mit einem Wirkungsgrad von ca. 70%) wird die chemische Energie des produzierten Wasserstoffs berechnet. Mit dem Heizwert von 33 kWh/kg kann dann die Masse des Wasserstoffs bestimmt werden. Die erreichbaren Volllaststunden in Abhängigkeit von der installierten Elektrolyseleistung sind in Abbildung 20 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass in den Jahren 2025 und 2030 die Volllaststunden in allen Szenarien unter 4.000 h/a liegen. Die erreichbaren Volllaststunden pro Jahr reichen nicht aus, um Elektrolyseure nur mit regionaler Überschussleistung wirtschaftlich betreiben zu können. Im Jahr 2040 werden in allen drei Szenarien Volllaststunden > 4.000 h/a erreicht, so dass die Errichtung von Elektrolyseuren auf Basis der Nutzung von EE-Überschüssen wirtschaftlich sinnvoll wird. Die produzierbaren Wasserstoffmengen in Abhängigkeit von der installierten Elektrolyseleistung sind in Abbildung 20 und Abbildung 21 dargestellt.

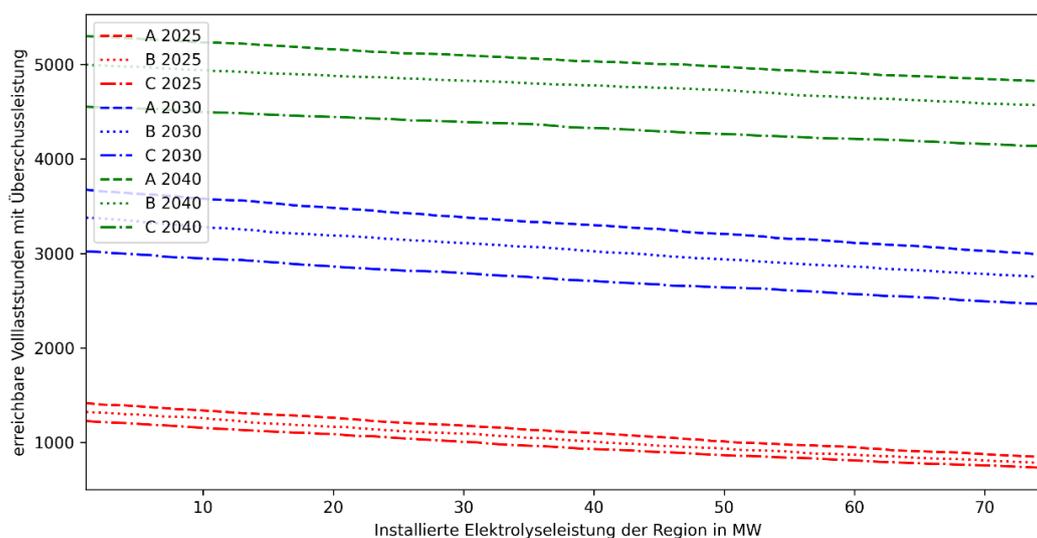


Abbildung 20: Erreichbare Volllaststunden mit EE-Überschussleistung

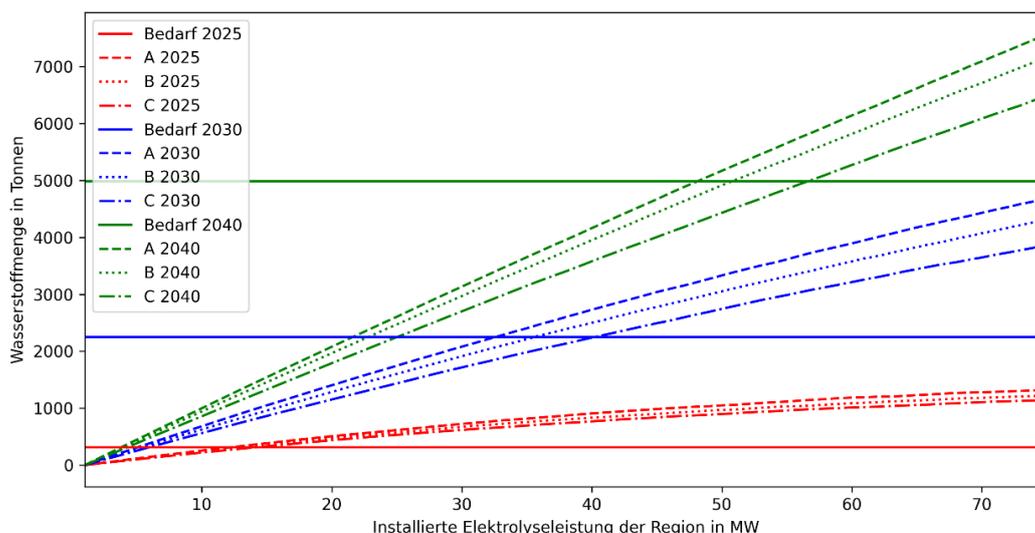


Abbildung 21: Produzierbarer Wasserstoff mit EE-Überschussleistung

Die horizontalen Linien im Diagramm zeigen die Wasserstoffnachfrage in der Region. In den Stützjahren zeigen die Schnittpunkte der Nachfragekurve mit den Erzeugungskurven die installierte Elektrolyseleistung, die zur Deckung der Nachfrage errichtet werden muss. Nach heutigem Prognosestand ist jedoch auf Basis der Nutzung der Überschussleistung von PV-Freiflächenanlagen und Windenergieanlagen erst im Jahr 2040 mit mehr als 4.000 Volllaststunden zu rechnen. Das bedeutet, dass in der Zeit davor der Bau und Betrieb von Elektrolyseuren auf dieser Basis wirtschaftlich nicht attraktiv ist. Daher ist es wichtig, andere Möglichkeiten zur Deckung des Wasserstoffbedarfs zu diskutieren. Eine Möglichkeit ist der Import von Wasserstoff und die Verteilung in der Fläche über ein entsprechend ausgebautes Verteilnetz. Eine weitere Möglichkeit wäre die Schaffung geschlossener Wertschöpfungsketten, bei denen die Elektrolyseure nicht ausschließlich auf ausreichende Überschussenergie angewiesen sind, um produzieren zu können. Denkbar wäre, dass große Elektrolyseure in unmittelbarer Nähe von großen PV- oder Windkraftanlagen errichtet werden, deren erzeugte Leistung teilweise vorrangig für den Betrieb der Elektrolyseure genutzt wird. Hinzukommend kann auch hier der Stromimport über Stromlieferverträge (PPA, Power Purchase Agreement) aus anderen Regionen genutzt werden, um die Auslastung der Elektrolyseure sicherzustellen.

5.3 Wasserstoff-Bedarfe

5.3.1 Methodik der Datenerhebung und Datengrundlage

Die Ermittlung des potenziellen Wasserstoff-Bedarfes im Untersuchungsgebiet erfolgte auf verschiedene Weise, um ein möglichst breites Spektrum potenzieller Wasserstoff-Anwender einzubeziehen. In einem ersten Schritt wurden mittels einer Recherche relevante Akteure identifiziert, welche sich in die folgenden Kategorien einteilen lassen:

- Vermittler:
 - Landratsämter
 - Wirtschaftsförderung / Regionalentwicklung
 - Verkehrsverbände
 - Zweckverbände und Vereine
- Potenzielle Anwender:
 - Öffentliche Dienstleister im ÖPNV / Entsorgung
 - Forschungseinrichtungen
 - Logistikunternehmen
 - Industrielle und gewerbliche Anwender

Die Vermittler gaben zum einen Hinweise auf potenzielle Anwender bzw. ermöglichten die Kontaktaufnahme zu weiteren Akteuren im Untersuchungsgebiet. So konnten 124 Akteure identifiziert werden, deren Interessen im Bereich Wasserstoff im Rahmen einer online-Umfrage erhoben wurden. Diese Umfrage wurde über die Vermittler ebenfalls öffentlich bekannt gemacht, sodass auch eine Beteiligung weiterer Akteure möglich war.

Bedarfe von 45 Akteuren, für die ein potenzieller Wasserstoffbedarf erwartet bzw. über die online-Umfrage ermittelt werden konnte, wurden in persönlichen Gesprächen konkretisiert

Abbildung 22 zeigt die Zuordnung dieser Gesprächspartner in den jeweiligen Branchen. Mit 35 % machen Akteure der Branchen Logistik, Gewerbe und Industrie den größten Anteil unter den Befragten aus. Ein Anteil von jeweils 18 % entfällt auf die im öffentlichen Auftrag handelnden Entsorger und Verkehrsunternehmen sowie die vermittelnden Akteure. Da im Betrachtungsgebiet die 4 Landkreise in Südwestsachsen und die Stadt Chemnitz zusammengefasst sind, ergibt sich hier angesichts der regionalen Akteure ein höherer Anteil. Im Gegensatz hierzu sind Energieversorger überregional und FuE-Einrichtungen nur in einzelnen Regionen aktiv, woraus sich ein geringerer Anteil ergibt.

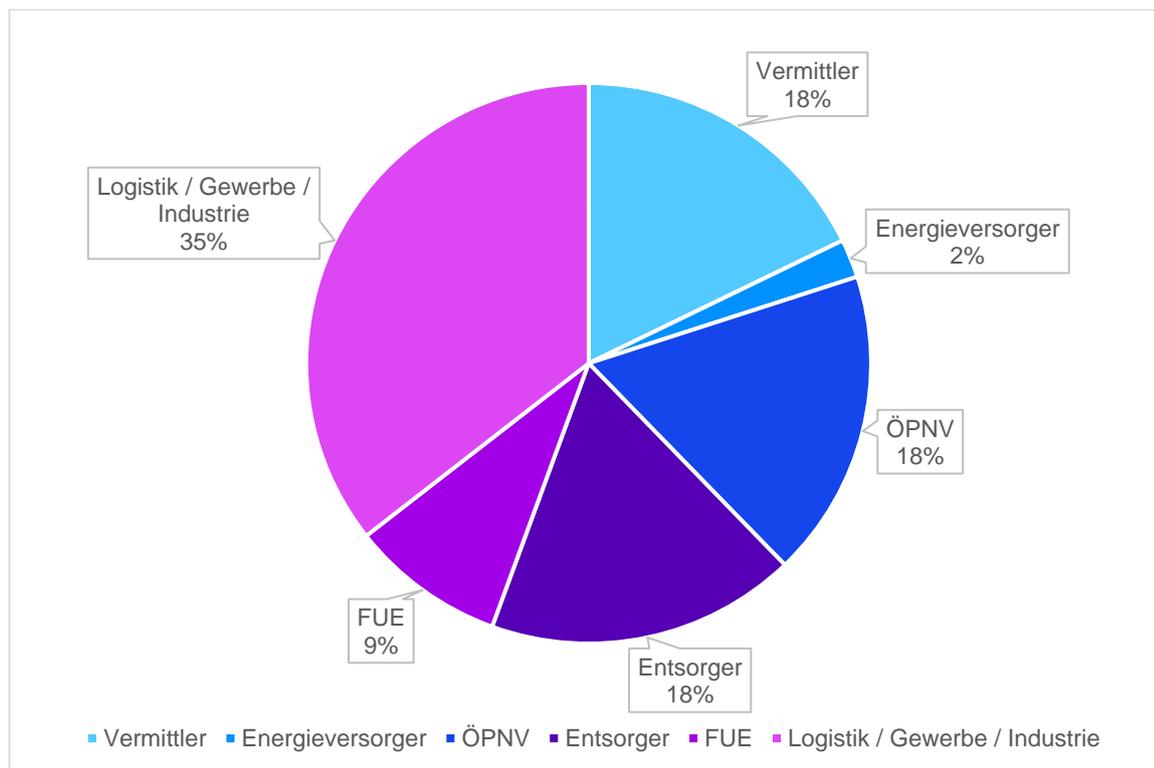


Abbildung 22: Individuelle Kontakte mit Akteuren nach Branche

Aus den erhobenen Daten konnten 39 potenzielle Bedarfsstandorte und 49 potenzielle Anwendungen bestimmt werden. Wie Abbildung 23 zeigt verteilen diese sich auf das gesamte Untersuchungsgebiet und alle darin eingeschlossenen Landkreise. Zu erkennen sind darüber hinaus zwei Schwerpunkte von potenziellen Bedarfsstandorten in der Stadt Chemnitz und im nördlichen Landkreis Mittelsachsen, welche eine Ableitung potenzieller Wasserstoffinseln ermöglichen.

Legende

-  Modellregion
-  Landkreise in der Modellregion
-  potentielle H2-Bedarfsstandorte

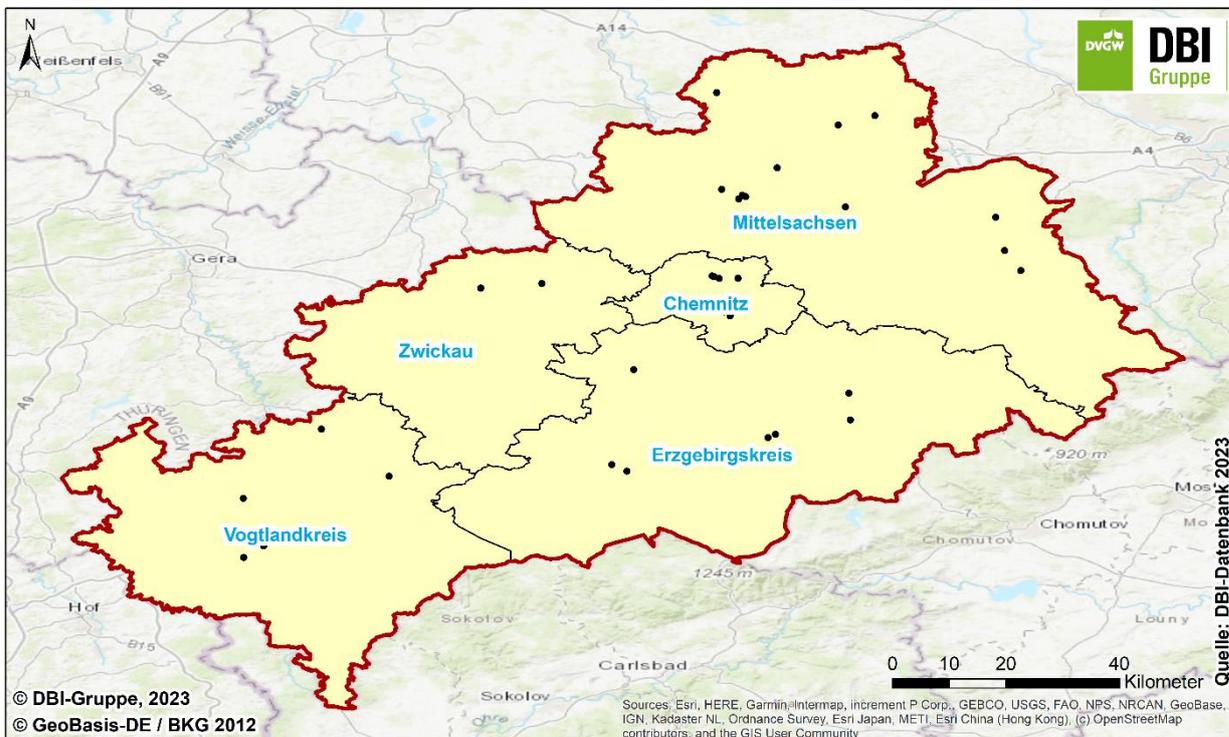


Abbildung 23: Potenzielle Bedarfsstandorte im Untersuchungsgebiet

Um auch die zeitliche Entwicklung der Bedarfe abzubilden, wurden potenzielle Wasserstoffbedarfe für die Stützjahre 2025, 2030 und 2040 ermittelt. Entsprechend der möglichen Verwendung des Wasserstoffes wurden die einzelnen Anwendungen wie folgt gruppiert:

- Personenbeförderung
- Güterbeförderung und gewerbliche Flotten
- Sonderfahrzeuge
- Forschung und Entwicklung
- Energetische Nutzung

Personenbeförderung fasst hierbei den gesamten öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) zusammen. Unter Güterbeförderung und gewerbliche Flotten sind sowohl die potenziellen Bedarfe in Intralogistik und Gütertransport per Lkw enthalten als auch die Nutzung von Firmen- und Dienstfahrzeugen in Industrie, Handel und Gewerbe. Unter Sonderfahrzeuge fallen schwere Nutzfahrzeuge mit spezialisierten Aufgaben wie Abfallsammelfahrzeuge,

Kehrmaschinen und Landwirtschaftsmaschinen. Forschung und Entwicklung umfasst öffentliche und private Forschungseinrichtungen. Unter energetischer Nutzung sind alle Anwendungen zusammengefasst, welche sich auf die Erzeugung von elektrischer Energie und Wärme beziehen.

5.3.2 Ermittelte Wasserstoffbedarfe

Summiert man die erhobenen Wasserstoffbedarfe ergibt sich der in Abbildung 24 dargestellte potenzielle Bedarf. Hierin sind alle Bedarfe der befragten Akteure enthalten, die entsprechende Daten zur Verfügung gestellt haben. Da es sich bei vielen Angaben um erwartete, zukünftige Entwicklungen handelt, sind, abhängig von technologischer, wirtschaftlicher und politischer Entwicklung, Abweichungen von den Ergebnissen dieser Studie möglich.

Während der ermittelte Bedarf im Jahr 2025 bei 313 t/a liegt steigt er bis zum Jahr 2030 auf etwa 2.261 t/a an und erreicht im Jahr 2040 etwa 5.018 t/a. Somit würde sich der potenzielle Bedarf zwischen 2030 und 2040 mehr als verdoppeln.

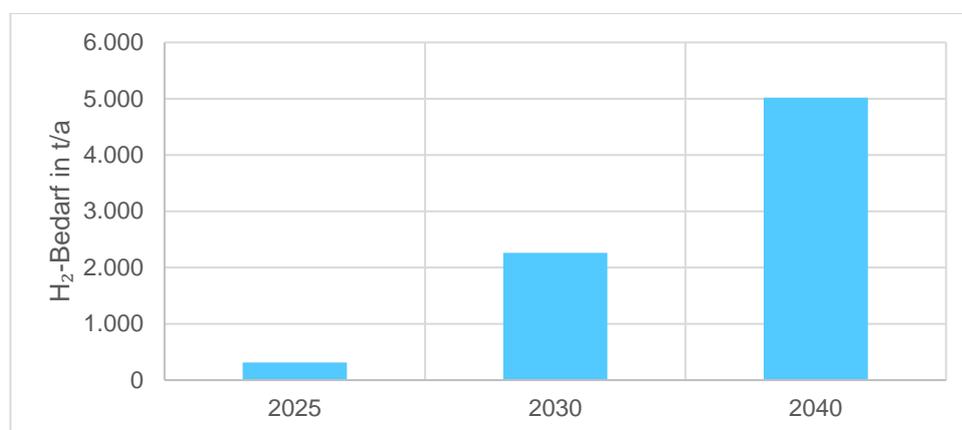


Abbildung 24: Potenzielle Bedarfe im Untersuchungsgebiet basierend auf den Angaben der befragten Akteure

Betrachtet man die Verteilung der potenziellen Bedarfe auf die einzelnen Landkreise bzw. die Stadt Chemnitz, siehe Tabelle 10 und Abbildung 25, zeigt sich, dass, insbesondere im Jahr 2025 die Akteure in der Stadt Chemnitz mit 217 t/a bzw. 69% den höchsten Anteil am ermittelten Bedarf aufweisen. In den späteren Stützjahren gewinnen die Landkreise und die dort befindlichen Akteure mehr an Bedeutung. Zwar weist die Stadt Chemnitz im Jahr 2040 immer noch den größten Bedarf auf, doch beträgt dieser nur noch 36 % des ermittelten Bedarfes.



Tabelle 10: Potenzielle Bedarfe der befragten Akteure im Untersuchungsgebiet, aufgeschlüsselt nach Gebietskörperschaft

	2025	2030	2040
Landkreis			
Stadt Chemnitz	217	948	1.810
LK Mittelsachsen	66	397	929
LK Zwickau	30	242	717
Erzgebirgskreis	1	541	1.028
Vogtlandkreis	0	133	534
Summe	313	2.261	5.018

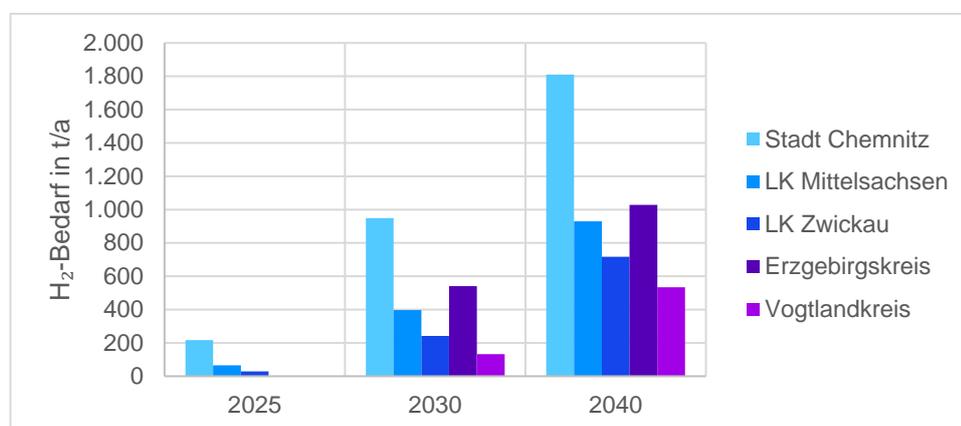


Abbildung 25: Potenzielle Bedarfe der befragten Akteure im Untersuchungsgebiet, aufgeschlüsselt nach Gebietskörperschaft

Die Bedarfe in den einzelnen Anwendungsfeldern für das Untersuchungsgebiet sind in Abbildung 26 dargestellt. Für das Jahr 2025 zeigen die erhobenen Bedarfe das größte Potenzial im Bereich der Forschung und Entwicklung. Weitere Bedarfe liegen im Bereich der Personenbeförderung, Güterbeförderung und der gewerblichen Flotten. Eine untergeordnete Rolle spielen die Sonderfahrzeuge sowie die energetische Nutzung, welche zu diesem Zeitpunkt kein Potenzial aufweist. Für die weiteren Stützjahre hat insbesondere die energetische Nutzung ein höheres Potenzial. So ist bis zum Jahr 2030 ein starker Anstieg in diesem Anwendungsfeld zu verzeichnen. Begründet ist dieser Anstieg vor allem dadurch, dass der spezifische Bedarf möglicher Akteure vergleichsweise hoch ist und somit selbst bei geringer Anzahl von Akteuren signifikante Bedarfe entstehen. Deutlich wird insbesondere für das Jahr 2040, dass die Personenbeförderung als auch die Güterbeförderung und gewerbliche Flotten potenziell eine sehr große Bedeutung haben.

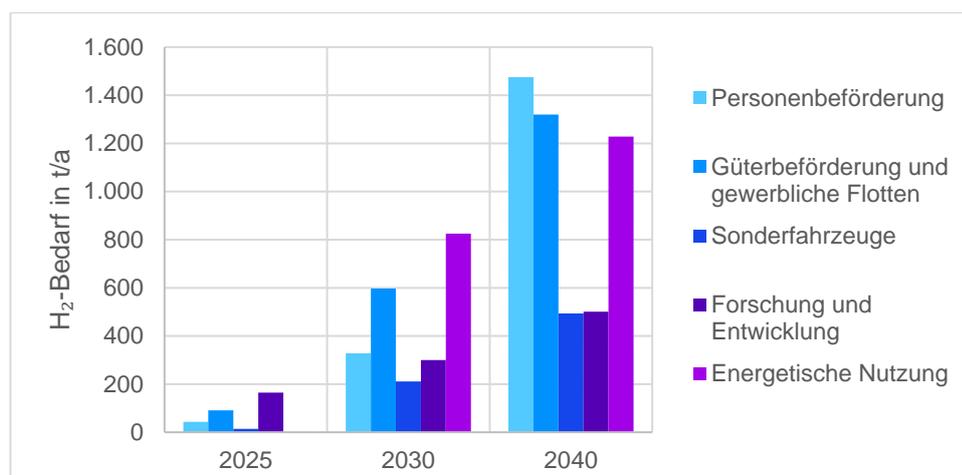


Abbildung 26 Potenzielle Bedarfe im Untersuchungsgebiet aufgeschlüsselt nach Anwendungsfeld

5.3.3 Regionale Wasserstoffbedarfe

Aus Abbildung 25 wird deutlich, dass die erhobenen Wasserstoffbedarfe im Untersuchungsgebiet nicht gleichmäßig verteilt sind, sondern sich zwischen der Stadt Chemnitz und den einzelnen Landkreisen stark unterscheiden. Zu beachten ist, dass diese Unterschiede zum einen durch die Wirtschaftsstruktur in den einzelnen Regionen geprägt ist, als auch durch die nicht repräsentative Verteilung der einzelnen Akteure beeinflusst wird.

5.3.3.1 Stadt Chemnitz

Für die Stadt Chemnitz konnten die höchsten Wasserstoffbedarfe in den jeweiligen Stützjahren festgestellt werden, vgl. Tabelle 10. Vergleichend für die Stützjahre ist in Abbildung 27 die Entwicklung der einzelnen Anwendungsfelder dargestellt. Im Jahr 2025 machen Anwendungen aus dem Bereich der Forschung und Entwicklung den größten Anteil am Bedarf aus, begründet liegt dies insbesondere durch den Bedarf bestehender Forschungseinrichtungen und am im Aufbau befindlichen Hydrogen Innovation Center. Weiteres Potenzial besteht zunächst im Bereich der Mobilität, da ab 2025 erste Testfahrzeuge im ÖPNV, in der Güterbeförderung sowie gewerblichen Flotten und bei den Sonderfahrzeugen im Einsatz sein könnten.

Wie bereits im vorangegangenen Kapitel erläutert, können mit dem Einsatz von Wasserstoff zur energetischen Nutzung bei einzelnen Akteuren entsprechende Bedarfe stark ansteigen. Im Jahr 2030 ist für die Stadt Chemnitz ein Sprung im Bereich der energetischen Nutzung festzustellen, welche für dieses Stützjahr mit 41 % den größten Anteil ausmacht. Bis 2030 verdoppelt sich ebenfalls der potenzielle Bedarf im Bereich der Forschung und Entwicklung, da jedoch auch in den anderen Bereichen signifikante Bedarfe entstehen könnten und der ermittelte Gesamtbedarf stark zunimmt, verkleinert sich der Anteil der F&E jedoch auf 32 %. Im Bereich



der Mobilität ist, bezogen auf den absoluten Bedarf ebenfalls ein großer Anstieg zu verzeichnen, jedoch nimmt hier der Anteil insgesamt nur gering zu.

Eine größere Verschiebung der Anteile am ermittelten Gesamtbedarf in Richtung der drei Anwendungsfelder in der Mobilität ist für das Stützjahr 2040 festzustellen. Bedingt durch eine weitere kontinuierliche Umstellung von Fahrzeugen im Rahmen der Clean Vehicle Directive sind größere Zuwächse insbesondere im Bereich der Personenbeförderung und Sonderfahrzeuge festzustellen. Während Akteure im Bereich der Forschung und Entwicklung sowie der Güterbeförderung und gewerblichen Flotten ebenfalls mit einem bis 2040 ansteigenden Bedarf rechnen, gingen die Befragten im Bereich der energetischen Nutzung von einem potenziell gleichbleibenden Bedarf im Vergleich zu 2030 aus. Dem zugrunde liegt die Annahme, dass diese Akteure eine Umstellung in 2030 größtenteils abgeschlossen haben. Entsprechend nimmt dieser Anteil, wie in Abbildung 27 zu sehen, insgesamt ab. Insbesondere im Bereich der energetischen Nutzung, aber auch in den anderen Bereichen, besteht die Möglichkeit, dass durch das Auftreten weiterer Akteure, Verschiebungen auftreten können.

Für die Stadt Chemnitz wird deutlich, dass insbesondere in den späteren Stützjahren in allen Anwendungsfeldern potenzielle Bedarfe zu erkennen sind. Da die Stadt Chemnitz, vgl. Abbildung 25, potenziell die höchsten Bedarfe aufweist, kann die Stadt als zukünftiger Wasserstoffschwerpunkt angesehen werden.

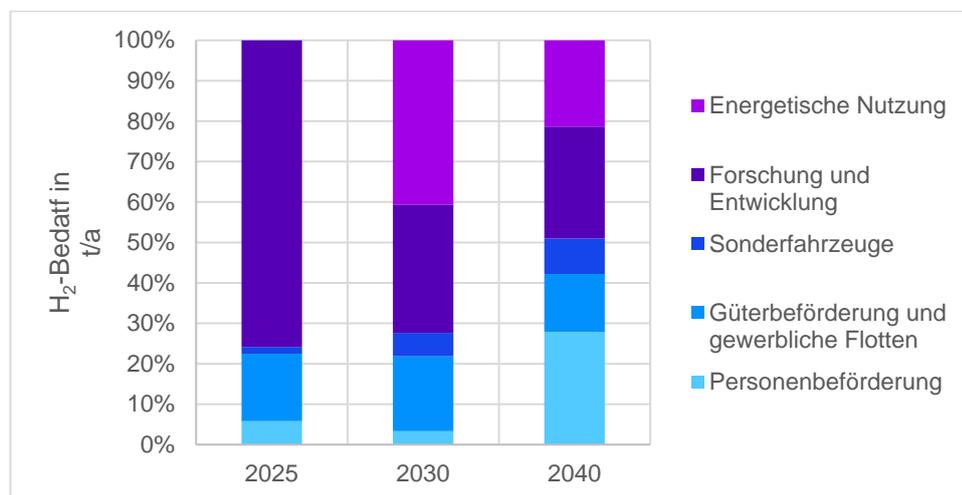


Abbildung 27: Anteile der einzelnen Anwendungsfelder am Wasserstoffbedarf für die Stadt Chemnitz in den einzelnen Stützjahren



5.3.3.2 Landkreis Mittelsachsen

Der Landkreis Mittelsachsen liegt hinsichtlich des ermittelten Bedarfs in den Stützjahren 2025 und 2030 an zweiter Stelle und im Stützjahr 2040 mit 929 t/a an dritter Stelle, vgl. Tabelle 10.

Im Jahr 2025 besteht potenziell Bedarf nur in den drei Anwendungsfeldern der Mobilität. Den größten Anteil macht dabei die Personenbeförderung aus, gefolgt von der Güterbeförderung und den gewerblichen Flotten. Sonderfahrzeuge machen den geringsten Anteil aus. Auch in den weiteren Stützjahren spielt die Mobilität potenziell die größte Rolle. Der Anteil allein für die Personenbeförderung liegt zwischen 44 % und 49 %, was sich daraus ergibt, dass es sich beim Landkreis Mittelsachsen im den zweitgrößten Flächenlandkreis Sachsens handelt und verschiedene Akteure aktiv werden. Der Anteil für die Güterbeförderung und die gewerblichen Flotten nimmt in den späteren Stützjahren stark ab. Für die Gesamtregion ist ein solcher Effekt nicht zu erkennen, vgl. Abbildung 28. Begründet liegt diese Abweichung darin, dass in diesem Anwendungsfeld befragte Akteure nur zurückhaltende oder keine Angaben machten. Die energetische Nutzung ist potenziell ab dem Stützjahr 2030 von Bedeutung und macht hier einen Anteil von 29 % bzw. 33 % aus.

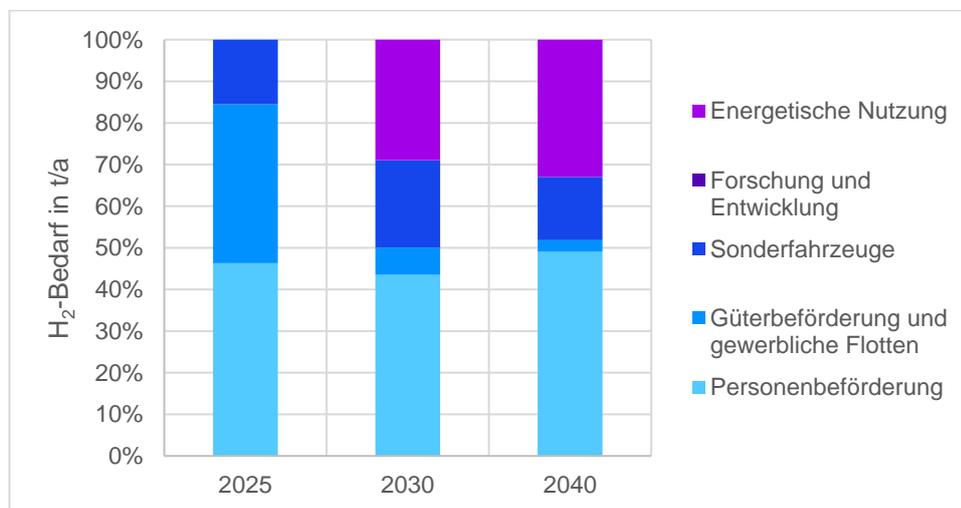


Abbildung 28: Anteile der einzelnen Anwendungsfelder am Wasserstoffbedarf für den Landkreis Mittelsachsen in den einzelnen Stützjahren

5.3.3.3 Landkreis Zwickau

Für den Landkreis Zwickau konnten nur Bedarfe im Bereich der Güterbeförderung und gewerblichen Flotten erhoben werden. Der potenzielle Bedarf ergibt sich 2025 aus ersten Testfahrzeugen und beträgt ca. 30 t/a. Bis zum Jahr 2030 steigt der potenzielle Bedarf auf 242 t/a sowie auf 717 t/a im Jahr 2040. Weitere Bedarfe in anderen Anwendungsfeldern sind zukünftig nicht auszuschließen, jedoch konnten durch die angesprochenen Akteure hierfür keine Angaben gemacht werden.

5.3.3.4 Erzgebirgskreis

Der Erzgebirgskreis zeigt als einzige der Regionen bereits im Jahr 2025 einen Bedarf in der energetischen Nutzung. Hierbei handelt es sich um ein kleinskaliges Blockheizkraftwerk mit entsprechend geringem Potenzial, vgl. Tabelle 10, welches entsprechend der durchgeführten Erhebung in diesem Stützjahr ebenfalls der einzige potenzielle Verbraucher ist. Weitere potenzielle Verbraucher kommen für die energetische Nutzung in den Stützjahren 2030 und 2040 hinzu, und stellen für diese Jahre ebenfalls den größten Anteil am potenziellen Bedarf dar.

Der potenzielle Bedarf im Bereich der Sonderfahrzeuge sowie der Güterbeförderung und gewerblichen Flotten ist erst ab 2030 von Bedeutung und steigert seinen Anteil von 12 % bzw. 28 % leicht auf 17 % bzw. 31 % im Jahr 2040. Im Bereich der Personenbeförderung konnten zum Zeitpunkt der Befragung durch die relevanten Akteure noch keine Angaben gemacht werden, entsprechend sind zum aktuellen Zeitpunkt keine potenziellen Bedarfe in diesem Anwendungsfeld angegeben.

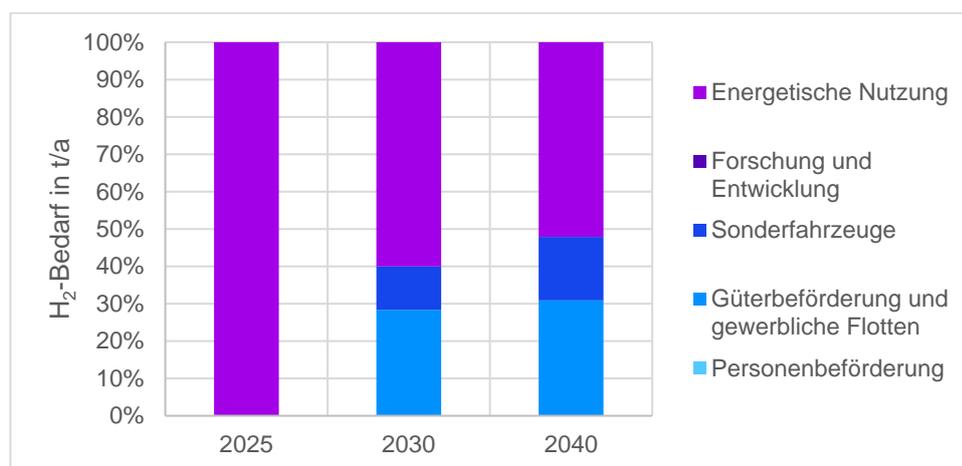


Abbildung 29: Anteile der einzelnen Anwendungsfelder am Wasserstoffbedarf für den Erzgebirgskreis in den einzelnen Stützjahren

5.3.3.5 Vogtlandkreis

Die im Vogtlandkreis befragten Akteure sehen im Stützjahr 2025 noch keine potenziellen Bedarfe. Relevanz könnte die Anwendung von Wasserstoff im Bereich der Sonderfahrzeuge sowie der Personenbeförderung ab dem Stützjahr 2030 finden. Die Personenbeförderung zeigt hierbei mit jeweils über 90 % das größte Potenzial und steigert seinen Anteil bis 2040 auf bis zu 96 %, wobei dies vor allem in einer geringen Zunahme der potenziellen Bedarfe für die Sonderfahrzeuge begründet ist. Insgesamt gesehen konnte im Rahmen der Befragung potenzieller Akteure für den Vogtlandkreis nur ein geringer Bedarf erhoben werden, vgl. Tabelle 10. Jedoch ist sind wie ebenfalls in den anderen betrachteten Regionen weitere potenzielle Bedarfe in diesen und den anderen Anwendungsfeldern nicht auszuschließen.

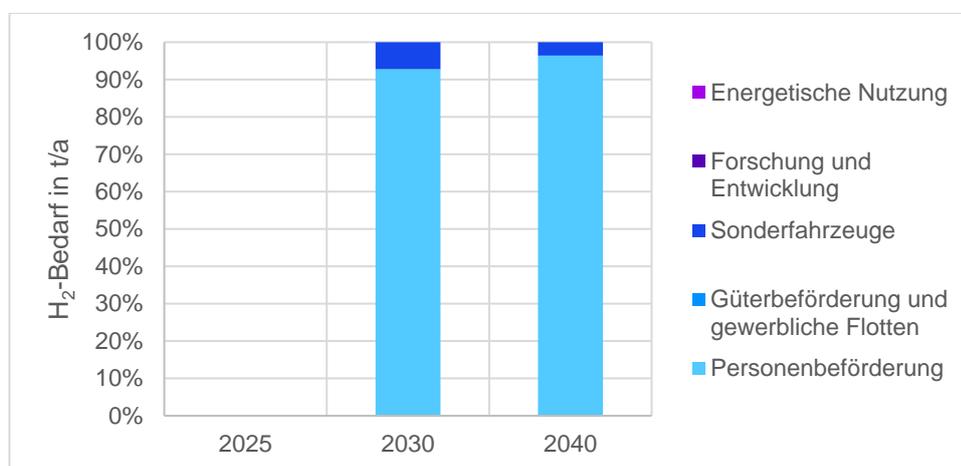


Abbildung 30: Anteile der einzelnen Anwendungsfelder am Wasserstoffbedarf für den Vogtlandkreis in den einzelnen Stützjahren

5.3.4 Statistisch abgeleitete Bedarfe für den Straßenverkehr

Mittels der Befragung relevanter Akteure konnte ein potenzieller H₂-Bedarf der identifizierten Akteure ermittelt werden. Diese bilden nur einen Teil des potenziellen Gesamtbedarfs ab, da angesichts der dynamischen Entwicklungen einerseits der Eintritt weiterer Akteure in die Wasserstoffmobilität und andererseits ggf. auch eine Ausweitung der Flottenumstellung zu erwarten sind. Um eine Einordnung der erhobenen Daten und einen Ausblick auf die theoretischen Potenziale zu geben, soll nachfolgend ein statistischer Ansatz gewählt werden, um potenzielle Bedarfe für den Straßenverkehr abzuleiten.

Grundlage bilden Daten des Kraftfahrtbundesamtes, genutzt wurden die durchschnittlichen Jahresfahrleistungen in km für das Jahr 2019 nach VK1.1 sowie die Fahrzeugbestände nach FZ1.1 bzw. FZ1.2 zum 01.01.2020 [96, 97]. Diese Werte für das Jahr 2019 wurden gewählt, um den ggf. verfälschenden Einfluss der Pandemielage in den Jahren 2020 und 2021 zu umgehen.



Tabelle 11 zeigt die zugrunde gelegten Daten. Deutlich erkennbar sind die Unterschiede in den einzelnen Fahrzeugkategorien hinsichtlich der Regionen, welche hauptsächlich auf die unterschiedlichen Einwohnerzahlen und Wirtschaftsstrukturen zurückzuführen sind.

Tabelle 11: Fahrzeugbestände nach Region [97], durchschnittliche Fahrleistung in Deutschland [96] und angenommene Wasserstoffbedarfe nach Fahrzeugkategorie

		Pkw		Lkw				Sattelzugm.	Busse
		Benzin	Diesel	< 3,5t	> 3,5t < 7,5t	> 7,5t < 20t	> 20t		
Fahrzeugbestand									
Stadt Chemnitz	-	89 883	33 624	8 979	570	478	401	446	140
Erzgebirgskreis	-	145 239	54 549	16 887	1 405	886	621	662	424
LK Mittelsachsen	-	125 440	51 290	15 184	1 308	1061	756	1 071	425
Vogtlandkreis	-	98 197	37 065	11 915	992	625	452	717	235
LK Zwickau	-	135 041	47 744	14 870	1 161	845	996	1 500	302
Summe	-	593 800	224 272	67 835	5 436	3895	3226	4 396	1 526
Fahrleistung, durchschnittlich 2019	km	9 513	18 987	19 343	16 896	38 158	38158	93 136	57 036
H₂-Bedarf	kg/100 km	1	1	2	5	8	8	8	8
H₂-Bedarf je Fahrzeug	t/a	0,10	0,19	0,39	0,84	3,05	3,05	7,45	4,56

Aufbauend auf den Daten aus Tabelle 11 ergeben sich für eine angenommene vollständige Umstellung des Fahrzeugbestandes auf Brennstoffzellenfahrzeuge zusammenfassend sehr hohe H₂-Bedarfe. Summiert über alle Fahrzeugkategorien beträgt dieser H₂-Bedarf 191 361 t/a, von diesen würden 99 071 t/a auf Pkw, 85 327 t/a auf Nutzfahrzeuge, als Summe der Lkw der verschiedenen Gewichtsklassen und Sattellastmaschinen, sowie 6 963 t/a auf die Omnibusse entfallen. Angesichts von Antriebsalternativen wie batterieelektrischen Fahrzeugen ist allerdings keine vollständige Umstellung des Fahrzeugbestands auf H₂-Antrieb in allen Kategorien zu erwarten, vielmehr wird sich eine Mischung von Antriebskonzepten entwickeln. Um dies einzugrenzen wurden verschiedene Studien bzgl. zu erwartenden Anteilen an H₂-Antrieben ausgewertet.



Abgeleitet aus Prognosen der DENA, des Fraunhofer ISI sowie der IEA werden nachfolgend, siehe Tabelle 12, mögliche Umstellraten für einzelne Fahrzeugkategorien sowie die Stützjahre 2030 sowie 2040 definiert [98–100]. Da die Angaben aus der Statistik des KBA detaillierter als die Kategorien in den genutzten Studien sind, werden diese nochmals zusammengefasst. Neben der Summe der Pkw bezieht sich dies vor allem auf die Lkw und Sattellastmaschinen, diese werden entsprechend ihrer Gewichtsklasse zugeordnet: leichte Nutzfahrzeuge (INFZ) als Lkw < 7,5 t, mittlere Nutzfahrzeuge (mLFZ) im Bereich 7,5 t – 20 t sowie schwere Nutzfahrzeuge (sNFZ) Lkw > 20 t inkl. Sattelzugmaschinen. Während insbesondere im Bereich der Pkw die angenommenen Umstellraten moderat sind, wird für die schweren Nutzfahrzeuge sowie die Omnibusse mit höheren Umstellraten gerechnet.

Tabelle 12: potenzielle Umstellungsbereiche für Fahrzeugbestände im Bereich der Mobilität

Umstellungsbereich	2030		2040	
	von	bis	von	bis
Pkw (Benzin & Diesel)	0,2%	0,9%	2,5%	11,0%
INFZ (Lkw < 7,5 t)	0,2%	1,7%	5,0%	12,0%
mNFZ (Lkw > 7,5 t ... < 20 t)	0,4%	2,0%	7,0%	14,0%
sNFZ (Lkw > 20 t, Sattellastm.)	0,4%	3,4%	21,3%	40,0%
ÖPNV (Bus)	2,6%	3,9%	10,0%	20,0%

Auf Grundlage dieser Annahmen ergibt sich für beide Stützjahre ein möglicher Bereich für den H₂-Bedarf in der Mobilität, welcher jeweils aufgeteilt nach Gebietskörperschaft in Abbildung 31 und Abbildung 32 dargestellt ist. Für das Stützjahr 2030 wurde ein potenzieller H₂-Bedarf im Bereich von 591 – 2 686 t/a abgeleitet welcher sich unterschiedlich auf die einzelnen Landkreise verteilt. Den mit 76 – 339 t/a potenziell geringsten Bedarf weist, bedingt durch die geringen Fahrzeugbestände, die Stadt Chemnitz auf. Mit Ausnahme des Vogtlandkreises liegt der untere Wert für die Landkreise bei ca. 140 t/a während der obere Wert von 600 t/a im Erzgebirgskreis bis 673 t/a im Landkreis Zwickau reicht. Unterschiede insbesondere bei den oberen Werten ergeben sich aus der Zusammensetzung des Fahrzeugbestandes, der besonders hinsichtlich der Lkw größere Unterschiede aufweist.

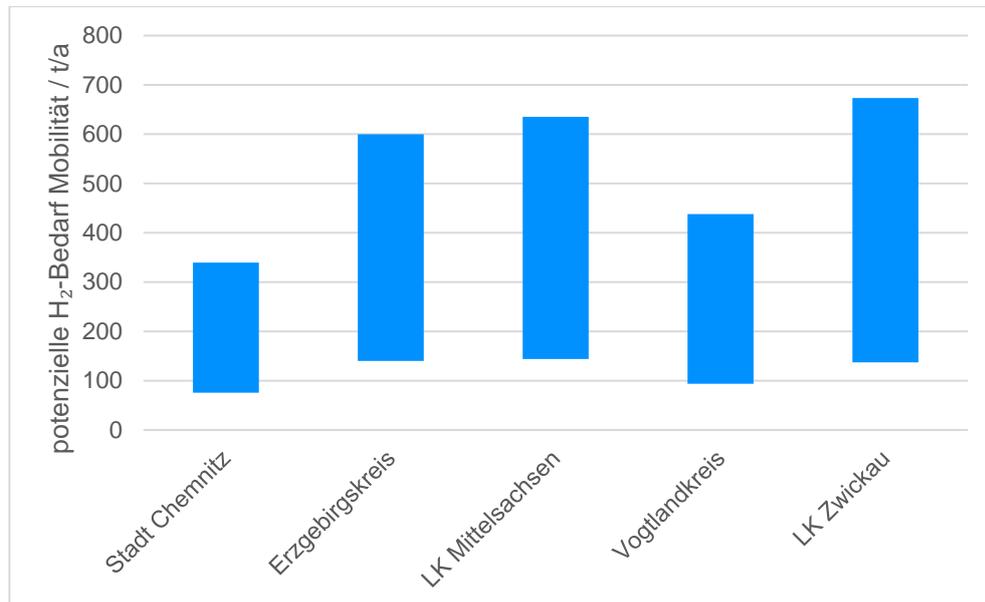


Abbildung 31: Bereich des potenziellen Wasserstoffbedarfes bei Umstellung der Bestandsfahrzeuge nach Tabelle 12 für das Jahr 2030

Für das Stützjahr 2040 ergibt die Betrachtung einen potenziellen H₂-Bedarf im Bereich von 7 877 – 22 966 t/a. Verteilt auf die Gebietskörperschaften ergibt sich ein ähnliches Bild wie für 2030. Die Stadt Chemnitz weist wiederum die geringsten potenziellen H₂-Bedarfe im Bereich von 986 – 3023 t/a auf, während die Landkreise, mit Ausnahme des Vogtlandkreises, weit höhere potenzielle Bedarfe im Bereich von 1 748 t/a (Erzgebirgskreis) bis zu 5 617 t/a (LK Zwickau) aufweisen.

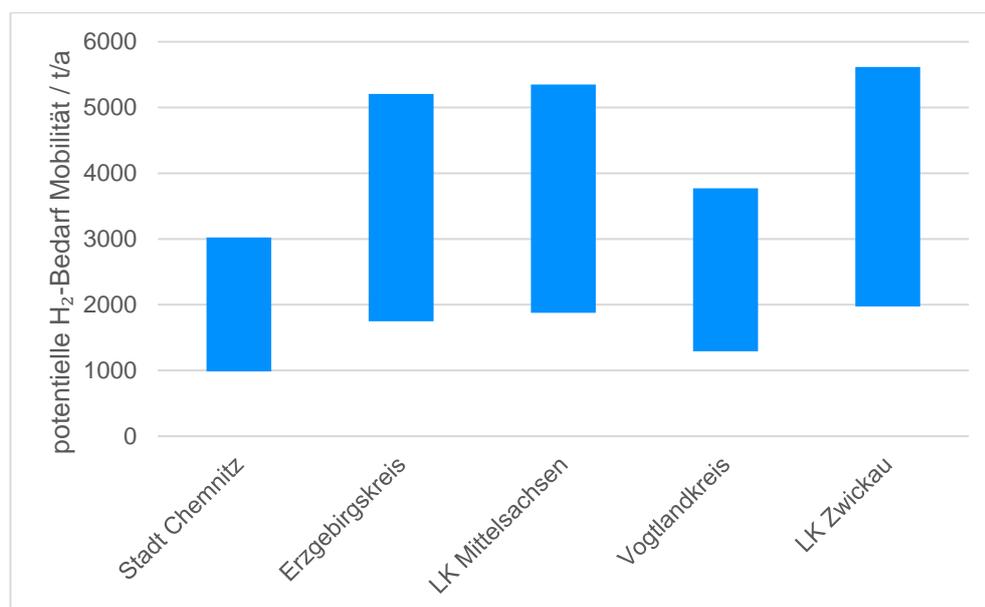


Abbildung 32: Bereich des potenziellen Wasserstoffbedarfes bei Umstellung der Bestandsfahrzeuge nach Tabelle 12 für das Jahr 2040

Vergleicht man die aus der Statistik abgeleiteten möglichen Bedarfe mit den erhobenen Daten und potenziellen Bedarfen in der Mobilität, siehe Abbildung 31 bzw. Abbildung 32, zeigen sich potenziell signifikante zusätzliche Bedarfe.

5.3.5 Mögliche Wasserstofftankstellen in der Projektregion

Die Positionierung von Wasserstofftankstellen erfordert eine sorgfältige Planung und Analyse, um sicherzustellen, dass sie effektiv in ein bestehendes oder zukünftiges Wasserstoffinfrastrukturnetzwerk integriert werden. Unter Berücksichtigung von wirtschaftlichen, technischen und regulatorischen Faktoren und mit einer engen Zusammenarbeit mit verschiedenen Interessengruppen handelt es sich dabei um einen langwierigen und aufwendigen Entscheidungsprozess.

Im Rahmen der Studie wurden mögliche Tankstellenstandorte anhand der vorausgegangenen statistischen Bedarfserhebung für die Stützjahre 2030 und 2040 identifiziert (Abbildung 33). Dabei stehen vor allem aktuelle Infrastruktur-Knotenpunkte und eine bedarfsgerechte Standortwahl im Vordergrund.

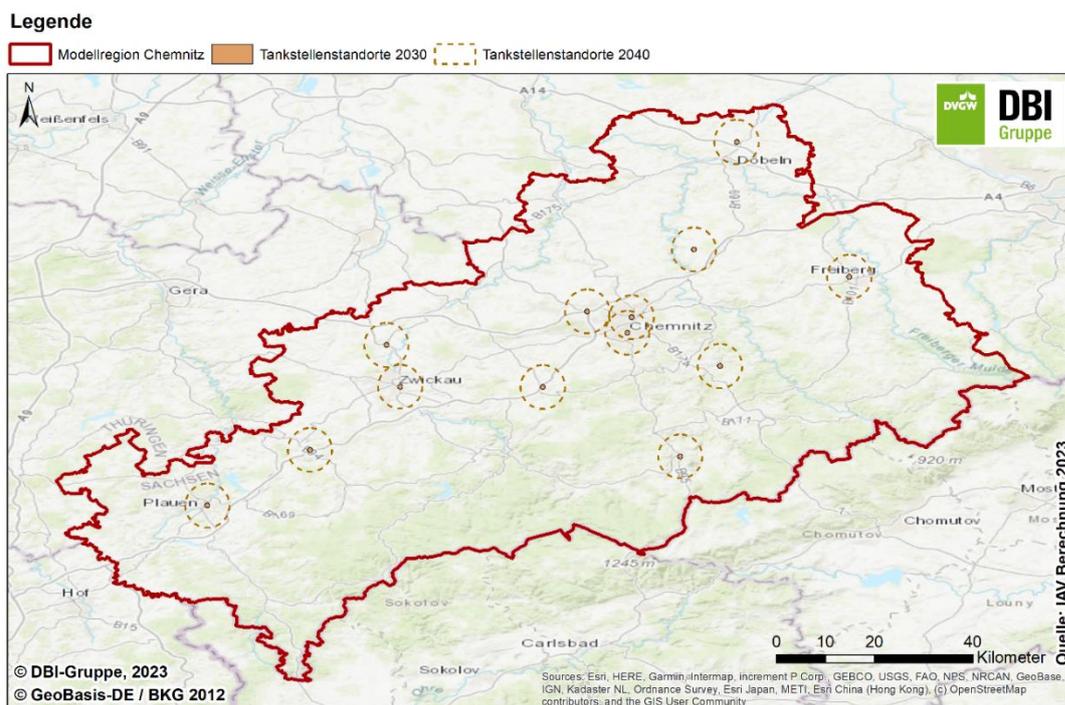


Abbildung 33: Mögliche Tankstellenstandorte anhand statistischer Bedarfserhebung für die Stützjahre 2030, 2040

Es ist erkennbar, dass sich der Bedarf in der Projektregion bezogen auf die Stützjahre 2030 bis 2040 deutlich erhöht – gekennzeichnet wird das durch einen vergrößerten Kreis rund um die Markierung. Aus der statistischen Bedarfserhebung lässt sich für jeden Landkreis in der Projektregion ein Faktor 9 (Maximalszenario) ableiten.

Für die Erweiterung einer bestehenden Tankstelleninfrastruktur ist es essenziell, eine ausreichende Wasserstoffversorgung sicher zu stellen. Dies kann den Ausbau von Wasserstoffproduktionskapazitäten oder den Zugang zu größeren Lieferanten einschließen. Bei steigendem Bedarf ist perspektivisch eine Pipeline-Versorgung mit Hydrogen Backbone Anschluss unabdingbar.

5.3.6 Weitere potenzielle regionale Bedarfe

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurden überwiegend H₂-Anwendungen im Bereich der Mobilität identifiziert, aber auch in Bereichen wie der energetischen Nutzung, bestehen weitere signifikante Potenziale. Dieses Anwendungsfeld ist stark von wirtschaftlichen und politischen Randbedingungen abhängig und entwickelt sich dynamisch. Akteure interessieren sich insgesamt zunehmend für Wasserstofftechnologien, verbunden mit zunehmenden Akteurszahlen und H₂-Bedarfen.

So konnten im Sommer 2023 in einer nicht repräsentativen Umfrage durch die IHK Chemnitz 15 Unternehmen mit H₂- Bedarf, die teilweise auch in der vorliegenden Studie betrachtet wurden, identifiziert werden. Diese sind insbesondere den Branchen der Metallverarbeitung und Hüttenwesens, der Halbleiterindustrie und der Energieversorgung zuzuordnen und gehören damit zu den energieintensiven Betrieben, sodass potenziell signifikante Wasserstoffbedarfe bestehen. Würde ein Großteil der befragten Unternehmen bis einschließlich 2030 ihren Energiebedarf über Wasserstoff decken, könnte, über die bereits im Rahmen der Studie erhobenen Bedarfe hinaus, ein zusätzlicher Bedarf von ca. 3442 – 4556 t/a entstehen, einerseits durch zusätzliche Akteure, andererseits aber auch durch geänderte Planungen (höherer Bedarf, weitere Anwendungen) bei den bekannten Akteuren. Abbildung 34 zeigt die Verteilung dieses Potenzials auf die Stadt Chemnitz bzw. die betrachteten Landkreise. Die höchsten zusätzlichen Bedarfspotenziale liegen demnach mit über 1500 t/a im Landkreis Mittelsachsen sowie dem Erzgebirgskreis, während im Vogtlandkreis ca. 638 t/a hinzukommen, während der Wert für die Stadt Chemnitz etwa 315 t/a und für den Landkreis Zwickau ca. 102 t/a beträgt. Bis Mitte der 2030er Jahre rechnen Befragte nur in der Stadt Chemnitz mit einem weiteren Bedarfsanstieg auf ca. 38 071 t/a, während für die anderen Landkreise keine Daten vorliegen.

Diese Werte zeigen, dass in Südwestsachsen ein sehr großer Wasserstoffbedarf entstehen kann, eine Ausweitung und fortlaufende Aktualisierung der Erhebung ist empfehlenswert. Darüber hinaus unterstreicht die Dimension dieser potenziellen Bedarfe die Notwendigkeit der Schaffung einer entsprechenden Versorgungsinfrastruktur, zum einen für die Stadt Chemnitz als auch für die betrachteten Landkreise.

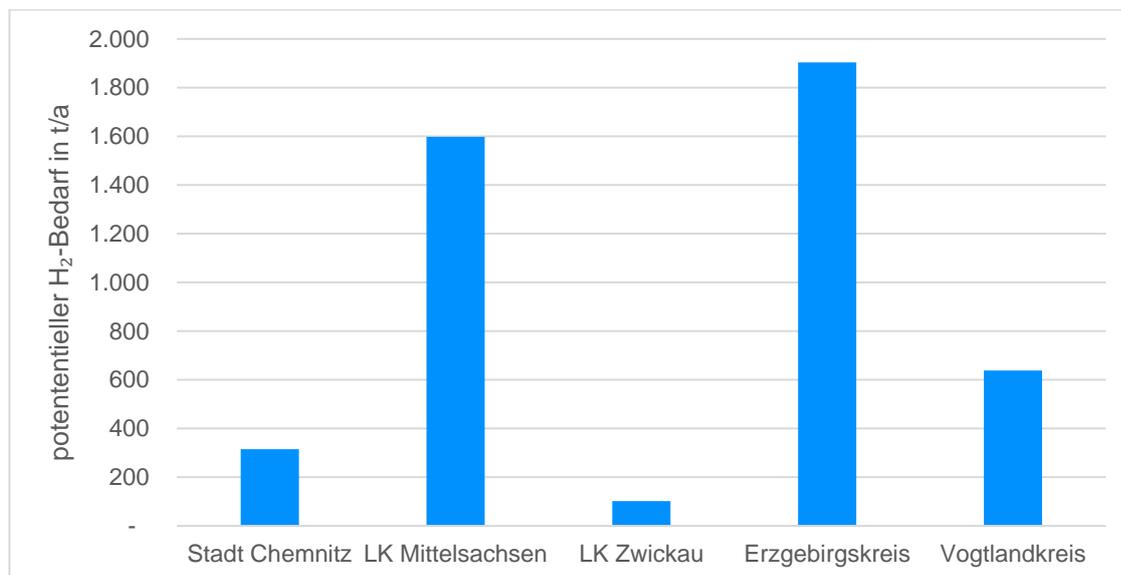


Abbildung 34: Zusätzliches regionales Bedarfspotenzial im energetischen Bereich bis einschließlich 2030, basierend auf einer Erhebung der IHK Chemnitz

5.4 Auswertergebnisse zur Umfrage zur Wasserstoffmodellregion Chemnitz

Auf Basis eines in Zusammenarbeit mit dem Auftraggeber erstellten Fragebogens wurde eine Umfrage unter Unternehmern in der Region durchgeführt. Dabei wurden Meinungen und die Motivation zur Auseinandersetzung mit dem Thema Wasserstoff untersucht.

In diesem Berichtsteil soll ein ausgewählter Teil der Fragestellungen der Umfrage näher untersucht und analysiert werden. Dies kann dabei helfen ein besseres Verständnis für die Ausrichtung der Unternehmen und deren aktuelle Problemstellungen mit Blick auf eine zukünftige Wasserstoffwirtschaft schaffen. Ausdrücklich zu beachten ist, dass es sich bei der Umfrage um eine nicht repräsentative Stichprobe handelt. Antworten wurden durch freiwillige Angaben von interessierten Unternehmen generiert. Dabei wurde nicht von allen Unternehmen der gesamte Fragebogen ausgefüllt. Zur Verdeutlichung der Größe der Stichprobe wird daher die Anzahl der Antworten jeweils mit aufgeführt. Die Ansprache der Unternehmen erfolgte vorrangig über den HZwo e.V. und das Netzwerk des DBI, sowie ergänzend über die Landkreise in der Region und die IHK.

Eine zu Beginn der HyExperts-Studie wichtige Fragestellung war, welches Interesse bei den Teilnehmern der Umfrage besteht. Die Ergebnisse der Fragestellung werden in Abbildung 35 dargestellt. Ersichtlich ist dabei, dass den Unternehmern vorrangig der Austausch und der weitere Ausbau des Netzwerkes im Wasserstoffkontext, sowie auch die Bereitstellung von Informationen für die Studie ein Anliegen war.

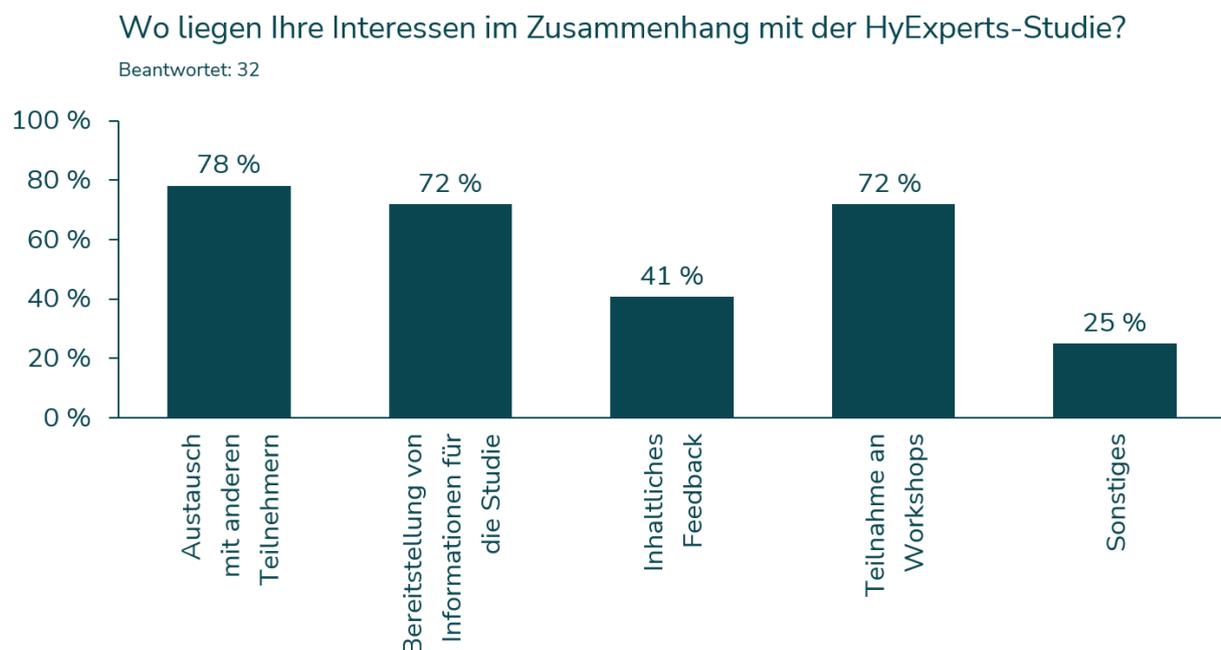


Abbildung 35: Umfrageergebnisse- Interessen im Zusammenhang mit der HyExperts-Studie



Um das Potenzial für den Einsatz von Wasserstoff in der Region zu untersuchen ist es wichtig einen Überblick zu erlangen in welchen Bereichen der Einsatz von Wasserstoff für die befragten Unternehmen in Frage kommt. Eine Übersicht der Antworten ist in Abbildung 36 dargestellt. Auffällig ist der eindeutige Fokus auf den Bereich der Mobilität, dieser wird von allen antwortenden Unternehmen genannt. Dabei sind neben kleinen Flotten in Teilen auch Flottengrößen von über 100 bis zu 250 Fahrzeugen zu verzeichnen. Für den Einsatz in der Mobilität wird von all diesen Unternehmen der Einsatz von grünem Wasserstoff geplant. Als zweiter großer Bereich ist die thermische Nutzung von Wasserstoff zur Erzeugung von Strom geplant. Einen geringen Teil machen die Forschung und Entwicklung sowie sonstige Einsatzgebiete aus.

Welche Bereiche kommen für den Einsatz von Wasserstoff bei Ihnen im Unternehmen in Betracht?

Beantwortet: 19

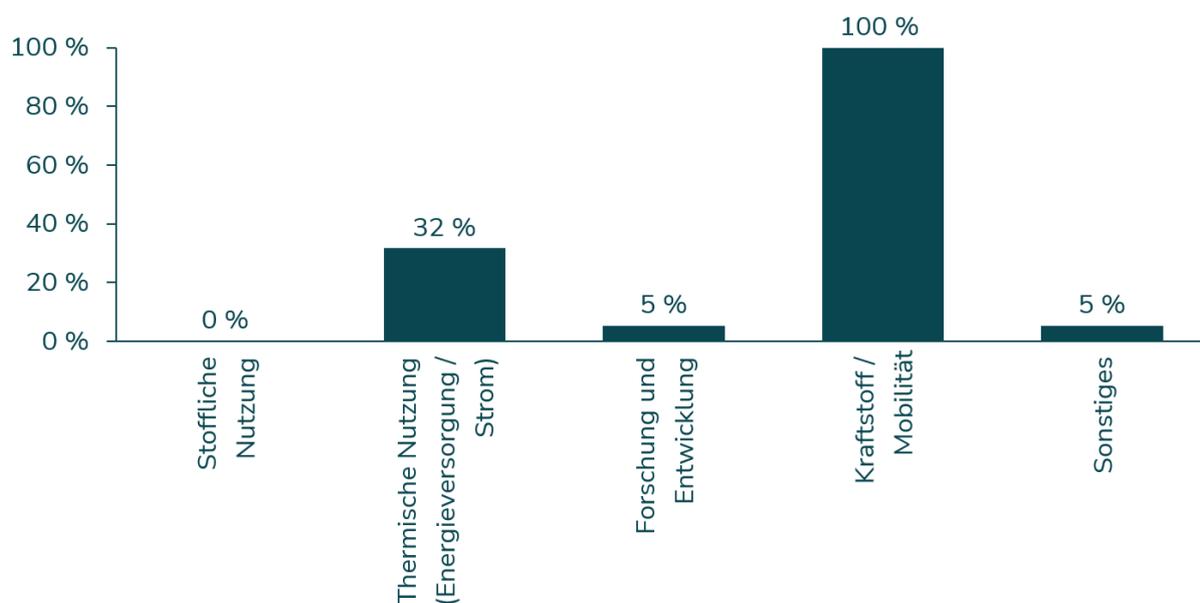


Abbildung 36: Umfrageergebnisse - Einsatzbereiche von Wasserstoff



Wo sehen Sie Herausforderungen bei der Einführung von Wasserstoff-Technologien bzw. welche Gründe gibt es, eine Nutzung von Wasserstoff nicht in Betracht zu ziehen?

Beantwortet: 31

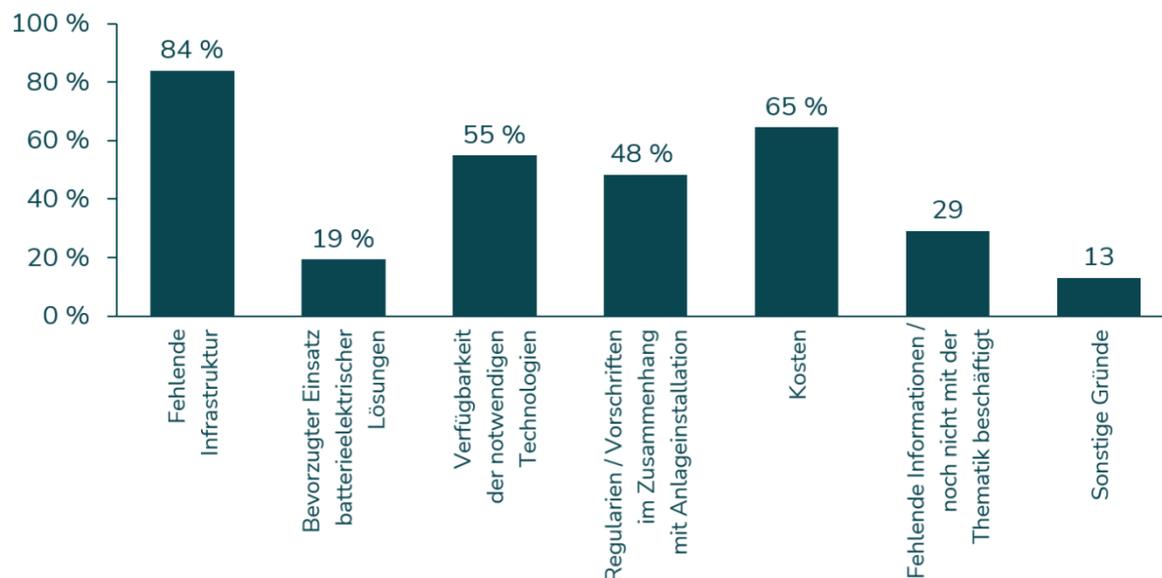


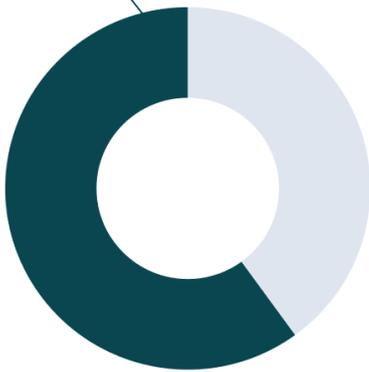
Abbildung 37: Umfrageergebnisse: Herausforderungen für den Einsatz von Wasserstoff

Um die aktuellen Herausforderungen der Unternehmen für den Einsatz von Wasserstoff zu verstehen, ist eine Betrachtung der sich ergebenden Herausforderungen essenziell. Diese werden in Abbildung 37 dargestellt. Die Hauptfaktoren ergeben sich hier im Bereich der fehlenden Infrastruktur, der Verfügbarkeit der notwendigen Technologien, sowie den Kosten. Der hohe Wert bei der Kenntnis von Regularien und Vorschriften zeigt, dass ebenfalls noch Potenzial bezüglich spezifischen Wissens besteht. Dies wird durch die Einschätzung des Wissenstandes zur Anwendung und Erzeugung von Wasserstoff verdeutlicht (Abbildung 38). Um diese Werte zu verbessern, wurden im Projektverlauf verschiedene Stakeholder betreut und spezifische Vorschläge für den Einsatz oder die Erzeugung von Wasserstoff erarbeitet. Außerdem wurde bei diversen Veranstaltungen spezifisches Wissen zur Wasserstoffwirtschaft vermittelt.

Wie schätzen Sie den Wissensstand in Ihrer Organisation über die Möglichkeiten der Anwendung von Wasserstoff ein

Beantwortet: 32

Durchschnittliche Bewertung
6/10



Wie schätzen Sie den Wissensstand in Ihrer Organisation über die Möglichkeiten der Erzeugung von Wasserstoff ein

Beantwortet: 32

Durchschnittliche Bewertung
5/10

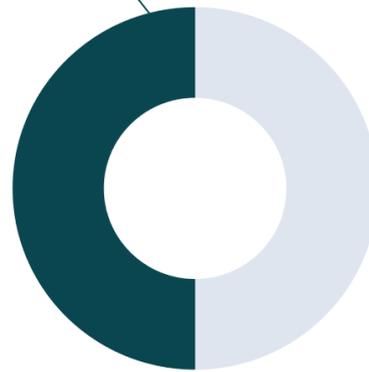


Abbildung 38: Umfrageergebnisse - Wissensstand Wasserstoff Anwendung und Erzeugung

5.5 Erstellung einer interaktiven Karte zur Verbildlichung der Potenzial- und Bedarfsanalyse

Um die Vernetzung der Akteure für die gesamte Wasserstoff-Wertschöpfungskette zu verbessern, wurde eine interaktive Karte bereitgestellt. Anbieter und Abnehmer von H₂-Produkten oder Dienstleistungen können auf diesem digitalen Marktplatz ihre Projekte vorstellen und konkrete Gesuche und Gebote platzieren. Zusätzlich können verfügbare Informationen, beispielsweise zu H₂-Qualitäten, Druck oder Preisen, abgerufen werden. Die Einträge werden georeferenziert als Landkarte gezeigt.

Das Front- und Backend dieser Darstellung ist auf eine seit 2018 bewährte IT-Plattform der RLI-Schwester-Firma Localiser aufgebaut. Dadurch ist ein stabiler Betrieb sichergestellt und im August 2023 waren bereits mehr als 400 Unternehmen im Marktplatz registriert. Die Registrierung ist kostenfrei über folgende Adresse möglich:

<https://www.localiser.de/h2-marktplatz>

Von der interaktiven Karte bis zur Funktionalität eines H₂-Marktplatzes

Das bereitgestellte interaktive Werkzeug bietet zwei Grundfunktionen (siehe Abbildung 39):

- Verortung von Erzeugern, Verbrauchern und anderen Infrastrukturelementen (Kreise und Pin's in der Karte)
- Darstellung von georeferenzierten Informationen (hier Digitalatlas genannt, links)

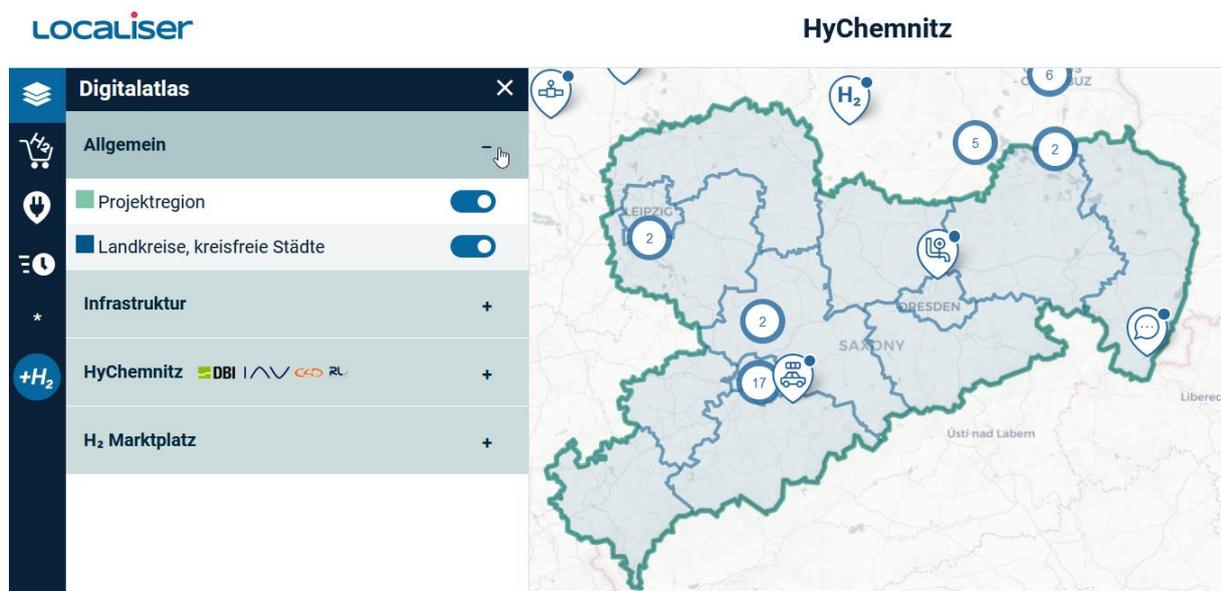


Abbildung 39: Darstellung der interaktiven Karte der Projektregion

Beschreibung der Verortung von Erzeugern, Verbrauchern und anderen Infrastrukturelementen

Ein Alleinstellungsmerkmal des Marktplatzes ist, dass sich die H₂-Akteure eigenständig eintragen können. Somit werden H₂-Erzeuger und H₂-Verbraucher sowie Infrastrukturelemente und Transportmöglichkeiten entlang der gesamten Wertschöpfungskette für grünen Wasserstoff eingetragen. Zusätzlich können Dienstleistungen (Kompetenzzentren, fachspezifischen Dienstleistern, Fortbildungseinrichtungen), Genehmigungen, Bauflächen sowie Anlagen und Produkte eingetragen werden.

Die Registrierung sowie Anleitungen, Tutorials und eine Änderungshistorie sind über das Menü (siehe Abbildung 40) als auch über die Adresse <https://www.localiser.de/hilfe-und-support-h2> erreichbar. Außerdem kann aus den Sprachen Deutsch und Englisch gewählt werden. Eingaben können weltweit getätigt werden und Angebote sowie Gesuche in Sachsen sind demnach auch international sichtbar.

Wie können Nutzende neue Einträge tätigen? Nach erfolgreicher Registrierung kann mit einem einfachen Rechtsklick auf der Karte ein neuer Eintrag vorgenommen werden – siehe Abbildung 41.

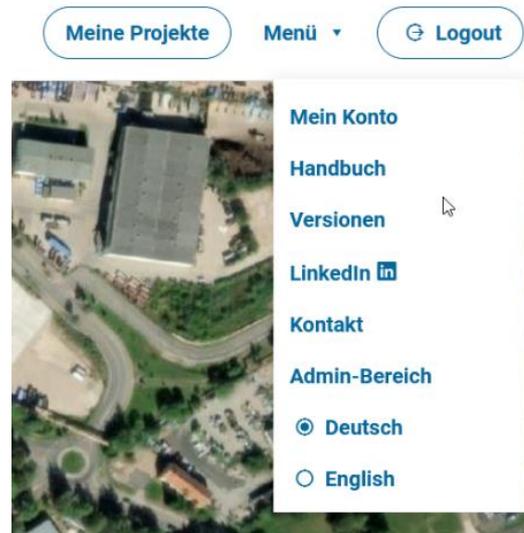


Abbildung 40: Menüansicht mit Zugang zum „Handbuch“ sowie zur Änderungshistorie („Versionen“)

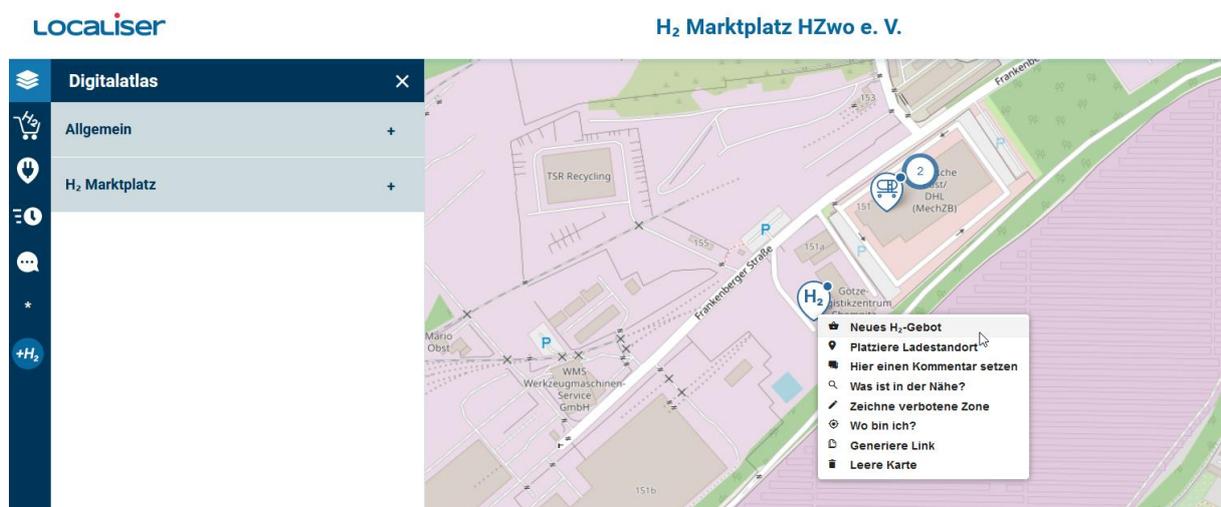


Abbildung 41: Webansicht für neue Einträge in den H₂-Marktplatz

Jedes Unternehmen kann sich je Eintrag einem Element der Wertschöpfungskette für grünen Wasserstoff zuordnen. Eine Pflichteingabe ist dabei außerdem die Angabe, ob es sich um ein

Angebot („Ich suche“) oder ein Gebot („Ich biete“) handelt. In Abbildung 42 sind die Elemente der Wertschöpfungskette für Wasserstoff, die im Marktplatz eingegeben und gesucht werden können aufgelistet. Jede Kategorie enthält weitere Unterkategorien.

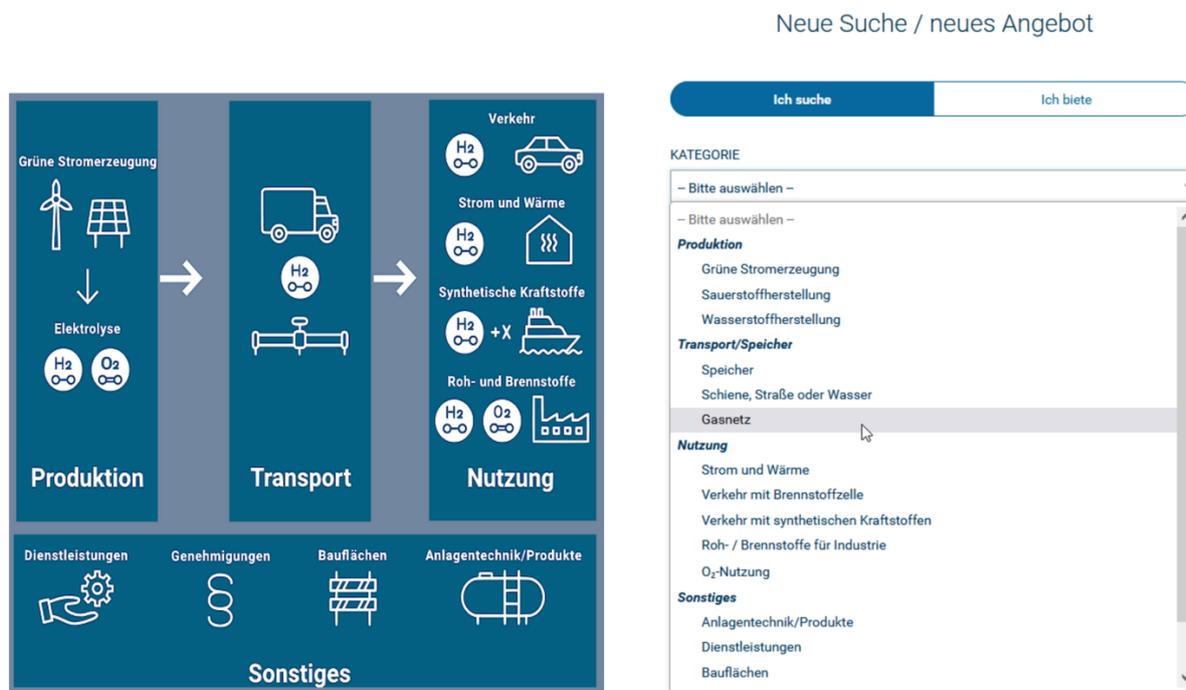


Abbildung 42: Elemente der Wertschöpfungskette für Wasserstoff

Neben technischen Angaben können auch individuelle Geometrien eingegeben werden. Diese Möglichkeit eignet sich besonders für den Verlauf von Gasleitungen oder die Markierung von vertraulichen Standorten (Abbildung 43 und Abbildung 44).

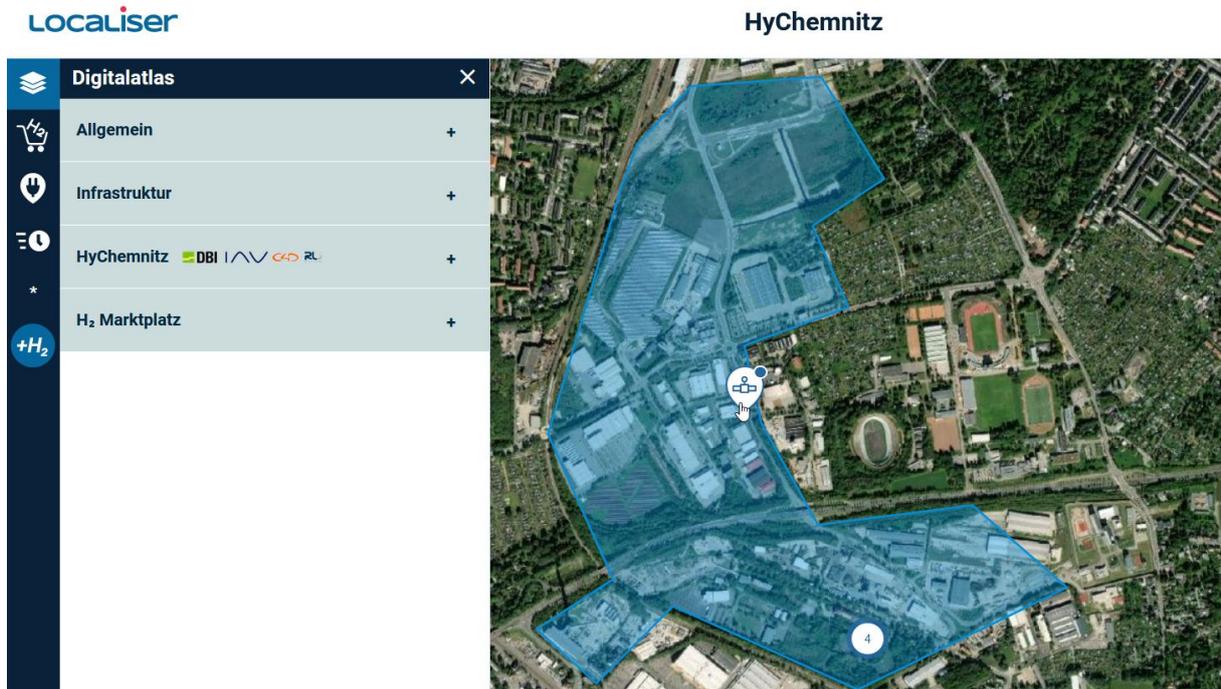


Abbildung 43: Darstellung eines geplanten H₂-Arealgasnetzes in Chemnitz durch die eins energie in sachsen GmbH & Co. KG

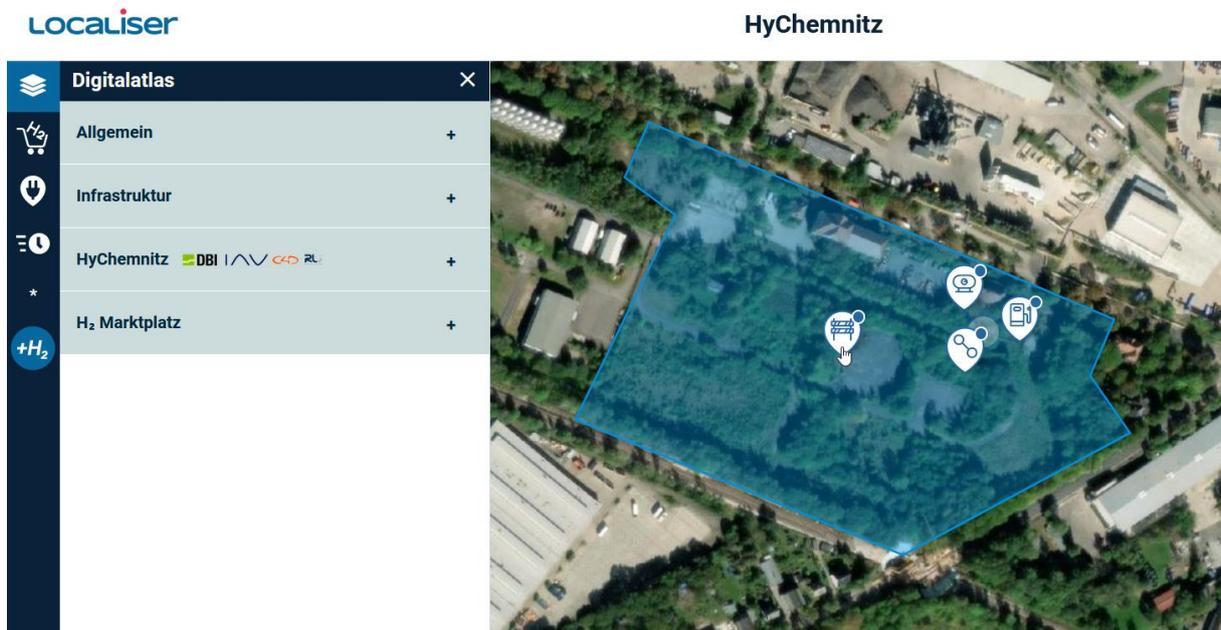


Abbildung 44: Darstellung einer geplanten Baufläche durch die eins energie in sachsen GmbH & Co. KG

Alle Einträge können neben der Kartendarstellung auch in tabellarischer Form eingesehen werden. Der Vorteil ist: Mit einem Klick auf den Tabellenkopf können alle Eingaben sortiert werden (z.B. nach Aktualität oder Produkt). Außerdem stehen auf der linken Seite Filterfunktionen zur Verfügung (Abbildung 45).

Match	Datum	Typ	Kategorie	Unterkategorie	Produkt	Unternehmen
Mein Eintrag	2023-08-16	Biete	Sonstiges	Dienstleistungen	Beratung	HZwo e. V.
	2023-08-15	Biete	Sonstiges	Dienstleistungen	Planung	ICEPS CTC BONN
	2023-08-09	Biete	Sonstiges	Dienstleistungen	Beratung	Wirtschaftsförderung Brandenburg
	2023-08-01	Biete	Sonstiges	Genehmigung	Genehmigung	ECI EnviroConsult Ingenieurbüro Dr. Lux e.K.
	2023-07-26	Biete	Sonstiges	Anlagentechnik/Produkte	Druckbehälter	VDL Delmas GmbH
	2023-07-14	Biete	Produktion	Wasserstoffherstellung	Wasserstoff	-
	2023-07-14	Biete	Produktion	Wasserstoffherstellung	Wasserstoff	-
	2023-07-10	Suche	Produktion	Grüne Stromerzeugung	Wind	N.R.Aquafarm Brandenburg GMBH
	2023-07-04	Biete	Sonstiges	Dienstleistungen	Beratung	Localiser
	2023-07-03	Biete	Sonstiges	Dienstleistungen	Sonstiges	Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Energie (MWA) Branden

Abbildung 45: Tabellarische Darstellung aller Einträge in den Marktplatz

Wird ein Eintrag eines Unternehmens ausgewählt können alle Eingaben eingesehen werden. Beispielsweise ist in Abbildung 46 dargestellt, dass das Unternehmen eins energie in sachsen GmbH und Co. KG eine Wasserstoffherstellung (>800 t im Jahr 2035) mit einem 5 MW-Elektrolyseur anbietet. Die Kontaktdaten können außerdem angefragt werden.

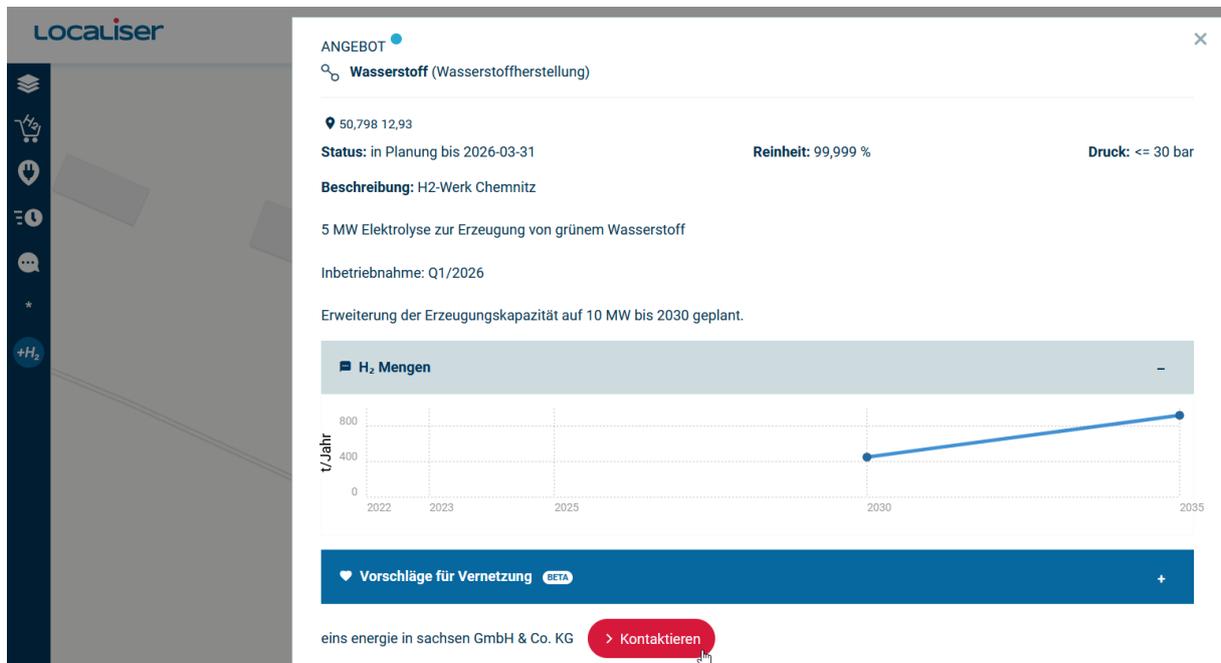


Abbildung 46: Exemplarischer Eintrag des Unternehmens eins energie in sachsen GmbH und Co. KG

Bei einer Kontaktaufnahme wird automatisch ein Text mit den eigenen Einträgen in den Marktplatz sowie der eigenen Signatur erzeugt. Dieser Text kann durch die Nutzenden verändert und ergänzt werden. Erst wenn die angefragte Person der Anfrage zustimmt, können die Kontaktdaten eingesehen werden. Unternehmen, die sich erfolgreich vernetzt haben, werden wiederum dritten Unternehmen als vertrauenswürdige Unternehmen angezeigt.

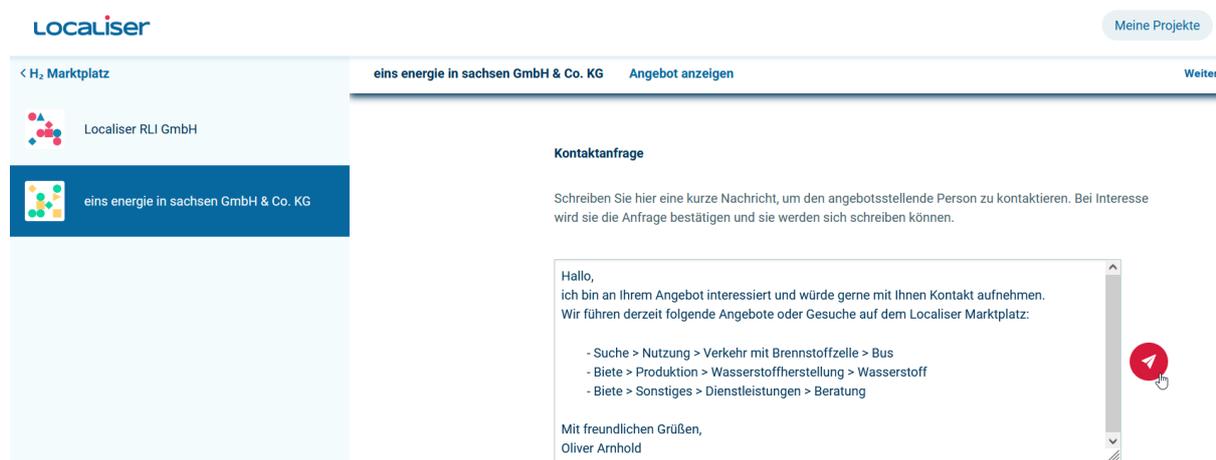


Abbildung 47: Formular zur Kontaktanfrage

Darstellung von georeferenzierten Informationen (hier Digitalatlas genannt)

Die zweite Grundfunktion ist die Darstellung von georeferenzierten Informationen. Diese Informationen werden in der Regel durch Localiser eingefügt. Es gibt die Möglichkeit regelmäßige Updates auch automatisiert zu organisieren.

Nachfolgend werden die in diesem Projekt erarbeiteten Ergebnisse als Layer dargestellt. Die Methodik wird jeweils in den entsprechenden Abschnitten des Berichtes beschrieben. In Abbildung 48 ist das H₂-Netz dargestellt, welches in der Studie „Wasserstoffnetz Mitteldeutschland“ im Auftrag des HYPOS Hydrogen Power Storage & Solution East Germany e.V. im Jahr 2022 erarbeitet wurde. Diese Daten sind nicht Teil Projektumfangs, stellen jedoch die Anschlussfähigkeit des Vorhabens rund um Chemnitz dar.

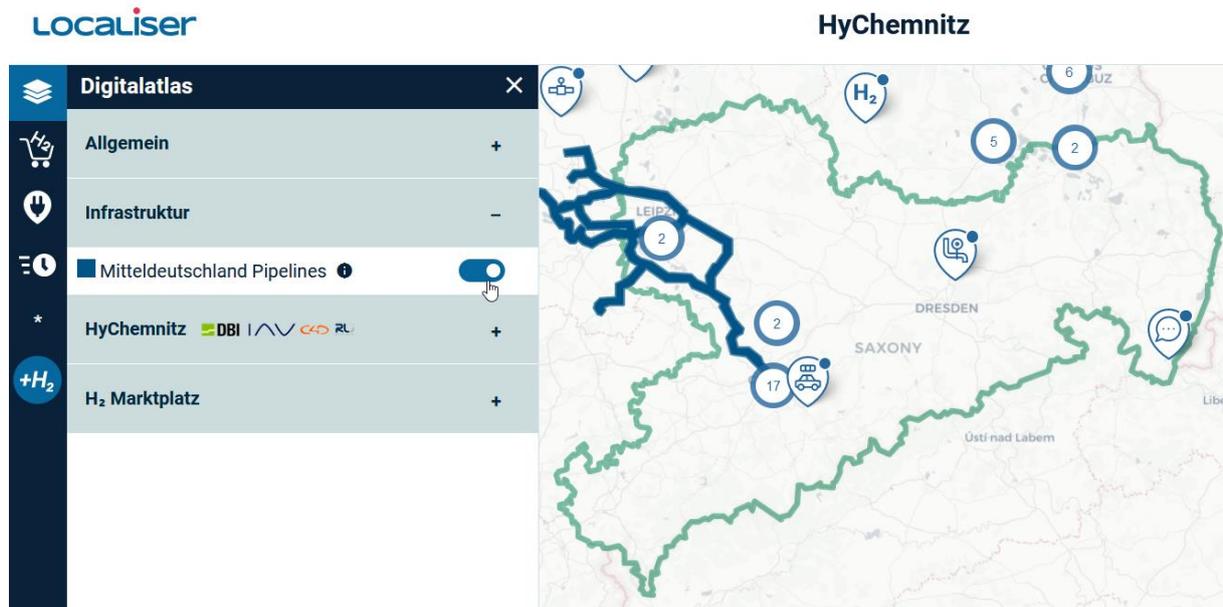


Abbildung 48: H₂-Netz aus der Studie „Wasserstoffnetz Mitteldeutschland“ im Auftrag des HYPOS Hydrogen Power Storage & Solution East Germany

Der Digitalatlas zeigt im Abschnitt „HyChemnitz“ ausgewählte Ergebnisse des HyExperts-Projektumfangs. Die folgende Abbildung 49 stellt die Summe der H₂-Bedarfe in und um Chemnitz dar. Wie bereits im Kapitel 5.3.3 beschrieben, wurden diese Bedarfe durch Befragungen potenzieller Akteure ermittelt.

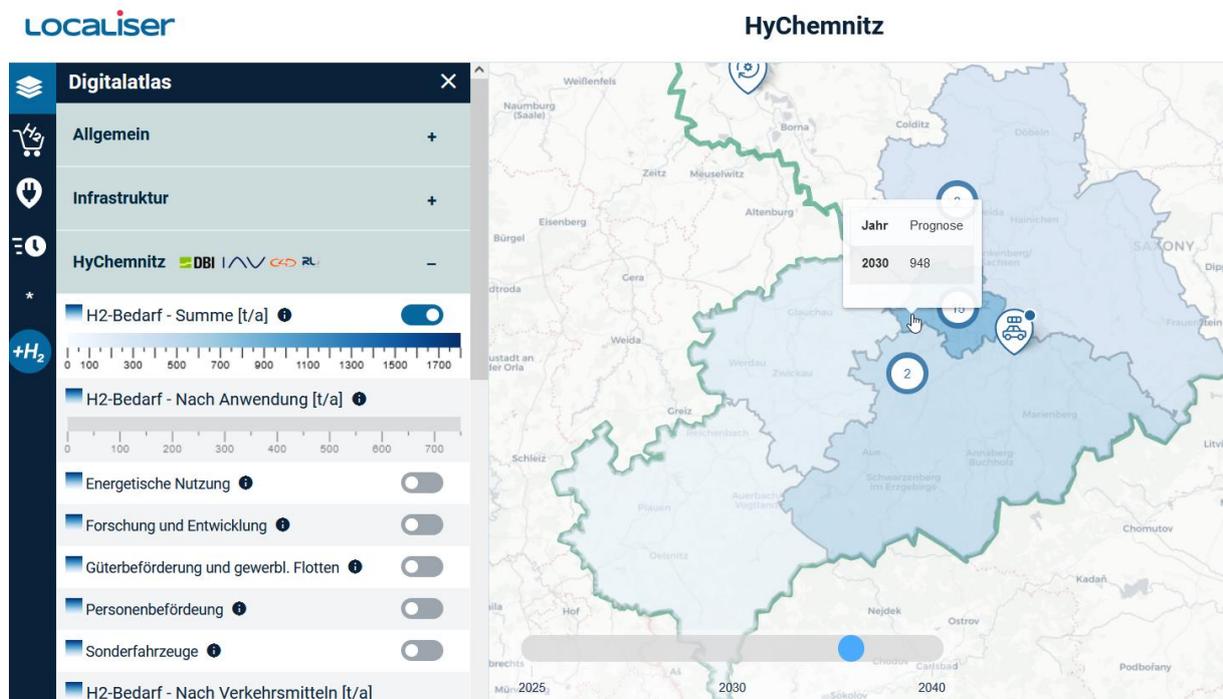


Abbildung 49: Darstellung der Summe potenzieller H₂-Bedarfe.

Diese Bedarfe können auch nach der Anwendungsart und nach Verkehrsmitteln unterschieden werden (Abbildung 50).

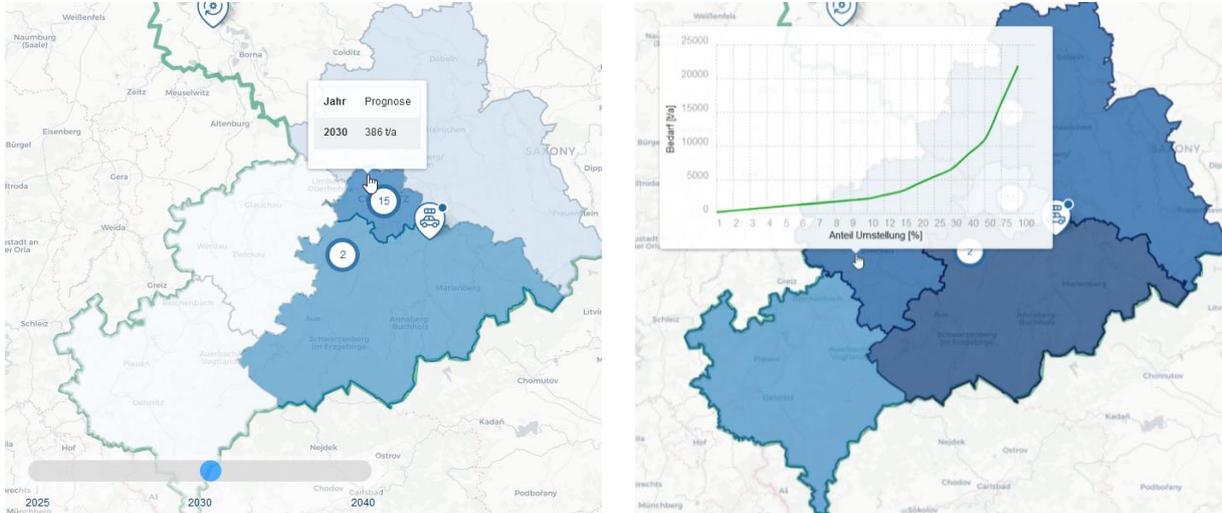


Abbildung 50: Darstellung der potenziellen H₂-Bedarfe, links nach Anwendungsart (hier Energetische Nutzung im Jahr 2030), rechts nach Verkehrsmittel

Die nachhaltige Produktion des Wasserstoffs kann teilweise lokal erfolgen und die regionale Wertschöpfung steigern. Die Potenziale für den Ausbau Erneuerbarer Energien sind ebenfalls im Marktplatz dargestellt (Abbildung 51). So beträgt das Potenzial von Photovoltaikanlagen an Bundesautobahnen (BAB) und Schienenwegen allein im Erzgebirgskreis mehr als 220 MW.

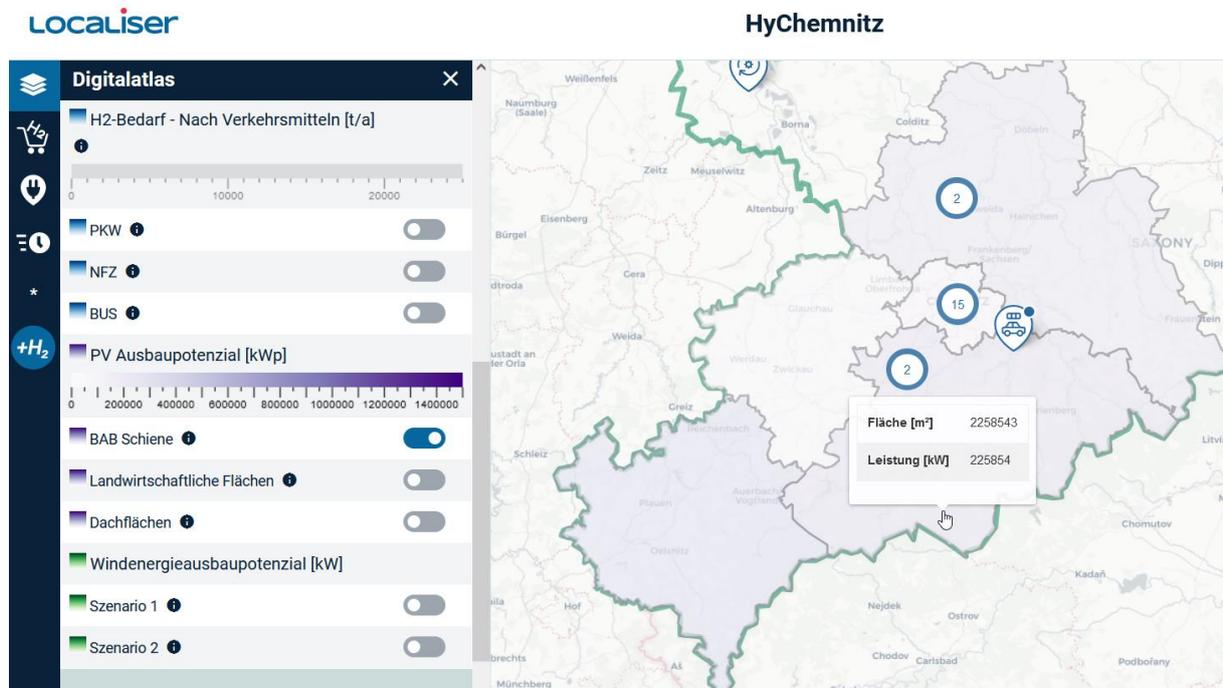


Abbildung 51: Darstellung der Erzeugungspotenziale von Photovoltaikanlagen an Verkehrswegen, landwirtschaftlichen Flächen und auf Dachflächen

In Abbildung 52 ist das Potenzial von Windenergieanlagen in zwei Szenarien mit jeweils drei unterschiedlichen Parametersätzen (Bandbreite von konservativen, moderaten und ambitionierten Annahmen) dargestellt. Das Potenzial reicht in den dargestellten Landkreisen von ca. 73 MW bis 2.297 MW.

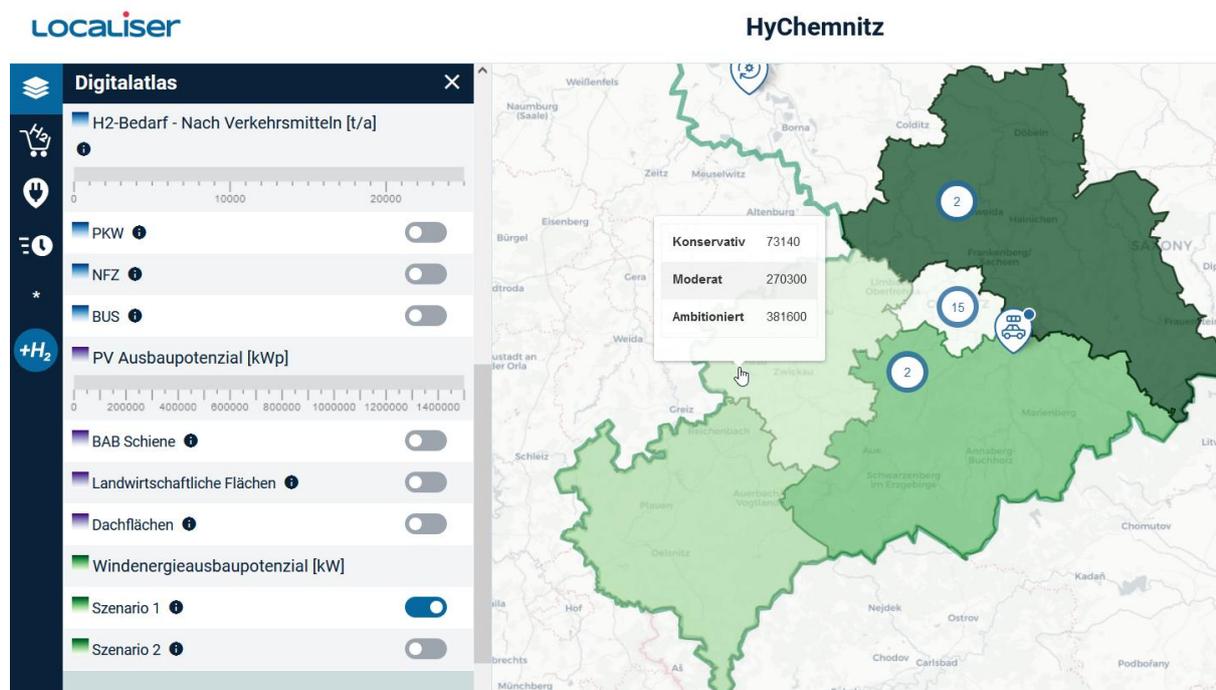


Abbildung 52: Darstellung der Erzeugungspotenziale von Windenergieanlagen in zwei Szenarien mit unterschiedlichen Annahmen

6 Transport und Verteilung, Importbilanz

6.1 Entwicklung eines Versorgungskonzepts

Ein Logistikkonzept für die Belieferung mit Wasserstoff muss verschiedene Aspekte der Versorgungskette berücksichtigen, um einen effizienten, zuverlässigen und nachhaltigen Transport von Wasserstoff zu gewährleisten. Nur so kann eine nahtlose, effiziente und sichere Wasserstoffversorgung gewährleistet werden. Nachfolgend werden einige generische Schritte und Fragestellungen diskutiert, welche in der Planungsphase eines solchen Konzept enthalten sein können.

Wasserstoffproduktion

- Findet die Wasserstoffproduktion am gleichen Standort (on-site) oder an einem anderen Standort (off-site)? Wie groß sind die Entfernungen?
- Die Planung von Transportrouten unter Berücksichtigung von Entfernungen, Verkehrsbedingungen und Sicherheitsaspekten ist entscheidend, um Transportkosten zu minimieren und die Effizienz zu steigern.

Speicherung

- Welche Speichertechnologie kommt in Frage? Abhängig von der Menge wird der produzierte Wasserstoff verdichtet oder verflüssigt und in geeigneten Containern oder Tankfahrzeugen gelagert.
- Besonders interessant sind Multiple Element Gas Container (MEGC). Diese Behälter sind speziell für Speicherung und Transport von komprimiertem Wasserstoffgas bei hohem Druck entwickelt worden.
- Je nach Art des Transports kann eine Zwischenspeicherung des Wasserstoffs vor der Weiterverteilung in regionalen oder zentralen Zwischenlagern notwendig sein, um die Versorgungskontinuität sicherzustellen.

Transport

- Wasserstoff kann mit spezialisierten Tankfahrzeugen, Pipeline-Systemen oder sogar durch den Einsatz von Wasserstoff-Brennstoffzellen-Zügen oder -Schiffen transportiert werden, je nach den räumlichen Gegebenheiten und den Mengen, die befördert werden müssen.
- Der Pipeline-Transport kommt bei Großverbraucher mit kontinuierlichem Abnahmeprofil in Frage. Es werden große Mengen Wasserstoff auf lange Entfernungen transportiert und sind diesbezüglich sehr kosteneffektiv. Perspektivisch werden sie daher auch als



wichtige Komplementär-Technologie für das Stromnetz eingesetzt werden, weil sie eine mindestens ähnliche Transportkapazität (Massenströme $> 1 \text{ kg/s}$ bzw. $> 120 \text{ MW}$ sind selbst für kleinere Rohrleitungen ohne Weiteres erreichbar) bei geringeren Investitionskosten erreichen.

- Bei den bislang in der Region Chemnitz diskutierten Erzeugungs- und Bedarfsmengen ist der Lkw das Transportmittel der Wahl. Hier existieren verschiedene Varianten, die sich v.a. durch Drücke und Mengen unterscheiden. Sämtliche gängigen Lösungen sind als Sattelaufleger ausgeführt, so dass nahezu beliebige Zugmaschinen verwendet werden können.

Allgemein gilt, dass die Art des Transports des erzeugten Wasserstoffs auch für die Auswahl der am Erzeugungs- und Zielort benötigten Speicher von enormer Relevanz ist. Nur eine ganzheitliche Betrachtung inkl. Speicherung, Transport, Erzeugungs- und Bedarfsprofilen führt zu einer kostenoptimalen Lösung.

Verteilung

- Die Verteilung kann über Tankstellen, stationäre Wasserstofftanks oder direkte Lieferung an industrielle Kunden erfolgen
- Weitere wichtige Faktoren wie die geografische Lage, verfügbarer Platz, Zugänglichkeit für Fahrzeuge (Abnahme und Belieferung) und potenzielle Kunden sowie Verfügbarkeit von Wasserstofflieferanten und behördliche Vorschriften müssen berücksichtigt werden.
- Durchführung einer konkreten Analyse des Bedarfsprofils. Es wird die erwartete Nachfrage über einen bestimmten Zeitraum hinweg betrachtet, um sicherzustellen, dass ausreichend Wasserstoff zur Verfügung steht.
- Für einen kontinuierlichen Betrieb insbesondere in Zeiten hoher Nachfrage muss häufig eine Back-to-Back-Fähigkeit³ gewährleistet sein. Relevant ist das für die Auslegung der entsprechenden Komponenten (z.B. Booster-Verdichter).

Sicherheit:

- Wasserstoff ist leicht entzündlich und erfordert besondere Sicherheitsvorkehrungen während Produktion, Transport und Lagerung. Geeignete Sicherheitsprotokolle und -ausrüstungen müssen implementiert werden

³Durchführung eines nahtlosen Wasserstoffbetankungsprozesses und ohne längere Unterbrechungen

Überwachung und Kontrolle:

- Sensorik und Überwachungssysteme können eingesetzt werden, um den Zustand und den Transport des Wasserstoffs in Echtzeit zu überwachen und bei Bedarf sofort zu reagieren

Nachhaltigkeit:

- Die Auswahl der Transportmittel und -wege sollte nachhaltige Prinzipien berücksichtigen, um die Umweltauswirkungen zu minimieren und den CO₂-Fußabdruck zu reduzieren

Skalierung und Flexibilität:

- Das Konzept sollte auf zukünftiges Wachstum und technologische Weiterentwicklungen vorbereitet sein und die Flexibilität aufweisen, um sich den sich ändernden Anforderungen anzupassen

Am Beispiel der Tankstelle Chemnitz Furth wird nachfolgend ein mögliches Versorgungskonzept mit MEGC-Containern vorgestellt. Es sollen ca. 450 Tonnen Wasserstoff pro Jahr getankt werden können. Der Wasserstoffbedarf versorgt die Müllfahrzeuge der ASR, Lkw für nahegelegene Speditionen und Brennstofftransporte von eins energie in sachsen GmbH sowie die umgestellte Servicefahrzeugflotte von eins / inetz. Die Tankstelle wird inklusive einer 700 bar Lkw-Betankungstechnologie geplant. Für die Umsetzung der Tankstelle wurde ein Förderantrag (Förderauftrag der NOW GmbH für Wasserstofftankstellen für Schwerlastfahrzeuge) im Namen von MoviaTec eingereicht und positiv entschieden.

MEGC-Container können mit unterschiedlichen technischen Spezifikationen je nach Größe, Nenndruck und damit Kapazität erworben werden. Die typischen Nenndrücke rangieren zwischen 300 und 500 bar; die Container verfügen damit über hydraulische Volumina von 16 m³ (20 Fuß / 500 bar) bis 40 m³ (40 Fuß / 300 bar) und Nennkapazitäten von 400 kg (20 Fuß / 300 bar) bis 1100 kg (40 Fuß / 500 bar; jeweils brutto). In jüngster Zeit sind auch MEGC-Container mit 640 bar Nenndruck verfügbar, bei einem 20-Fuß-Container liegt die Brutto-Kapazität dann bei > 600 kg. Die netto verfügbaren Kapazitäten hängen – wie bei allen Druckspeichern – vom gewählten, minimalen Restdruck ab, der innerhalb gewisser Grenzen variiert werden kann. Generell gilt jedoch: Je niedriger der gewählte Restdruck, desto größer ist die jeweilige Belastung und desto geringer sind die zulässigen Befüll-Zyklen.



Wird beispielhaft für die Tankstelle Chemnitz Furth ein jährlicher Wasserstoffbedarf von ca. 450 Tonnen umgerechnet auf 225 Betriebstage, so sind es im Mittel durchschnittlich 2 Tonnen / Tag, zu Spitzenzeiten sicher 2,5 - 3 Tonnen pro Tag. Für eine Versorgung mit 40 ft MEGC-Containern, mit einer Bruttokapazität von 1100 kg (netto max. 950 kg = 87% bei 50 bar Restdruck, realistisch eher 850 kg) sind somit 2 - 3 Fahrten pro Tag nötig. Wenn die Versorgung mit 20 ft Containern geplant ist, verdoppelt sich die Anzahl der Fahrten pro Tag.

Die logistische Umsetzung bringt mit steigender Zahl der zu tauschenden MEGC-Container große Herausforderungen mit sich. Bei steigendem Bedarf ist perspektivisch eine Pipeline-Versorgung mit dem Hydrogen Backbone Anschluss sinnvoll.

6.2 Entwicklung eines H₂-Netzes

6.2.1 Aktuelle Projekte zum H₂-Backbone

Aktuelle Projekte zur Planung und Errichtung eines H₂-Backbones (Abbildung 53) auf Transportnetzebene zeigen, dass die hier betrachtete Modellregion zukünftig über das H₂-Backbone mit Wasserstoff versorgt werden kann.

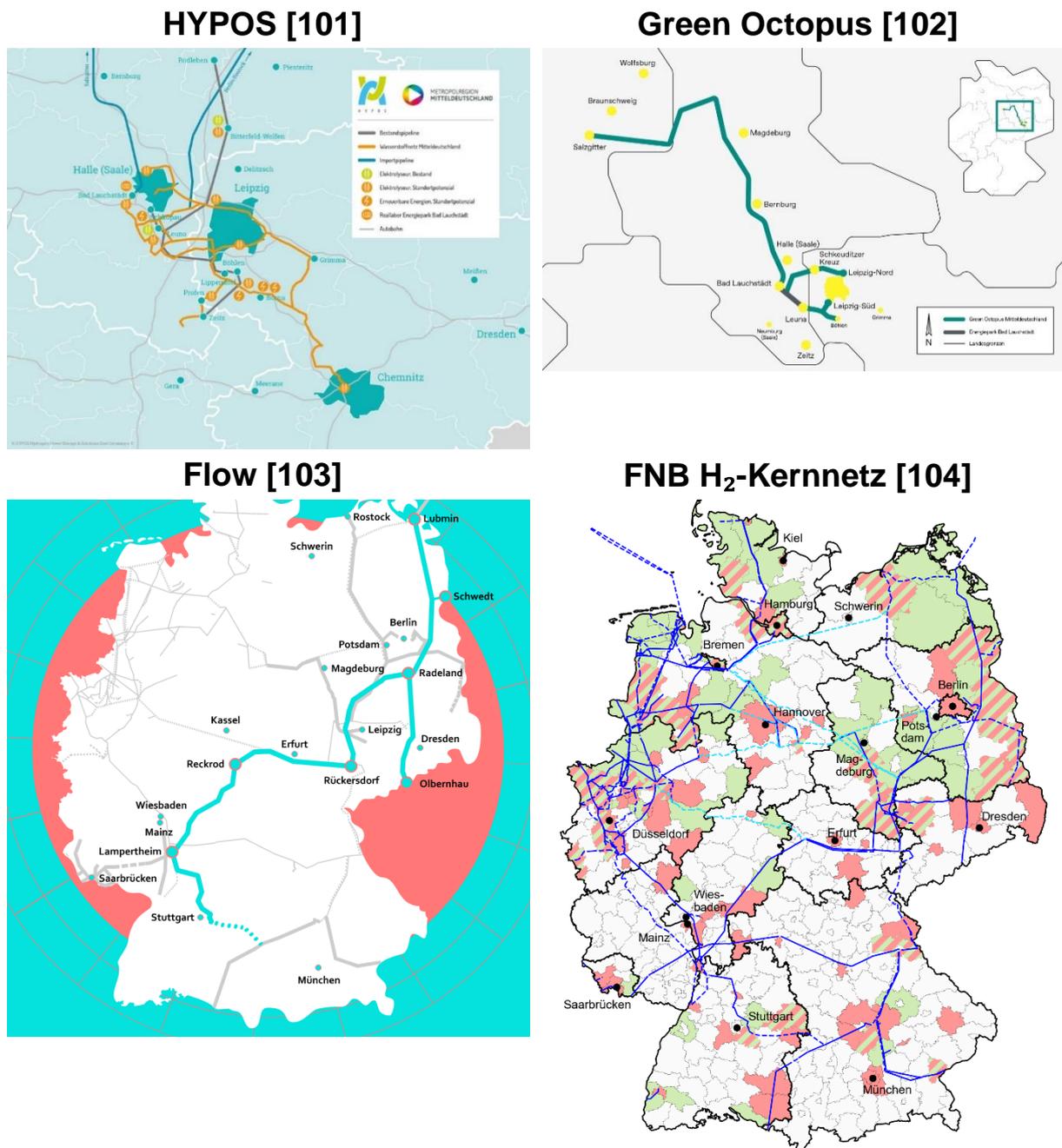


Abbildung 53: Übersicht H₂-Backbone-Projekte (Auswahl)

Die sich daraus ergebenden, möglichen Anschlusspunkte an ein zukünftiges H₂-Backbone-Netz werden in Abbildung 54 zusammengefasst.

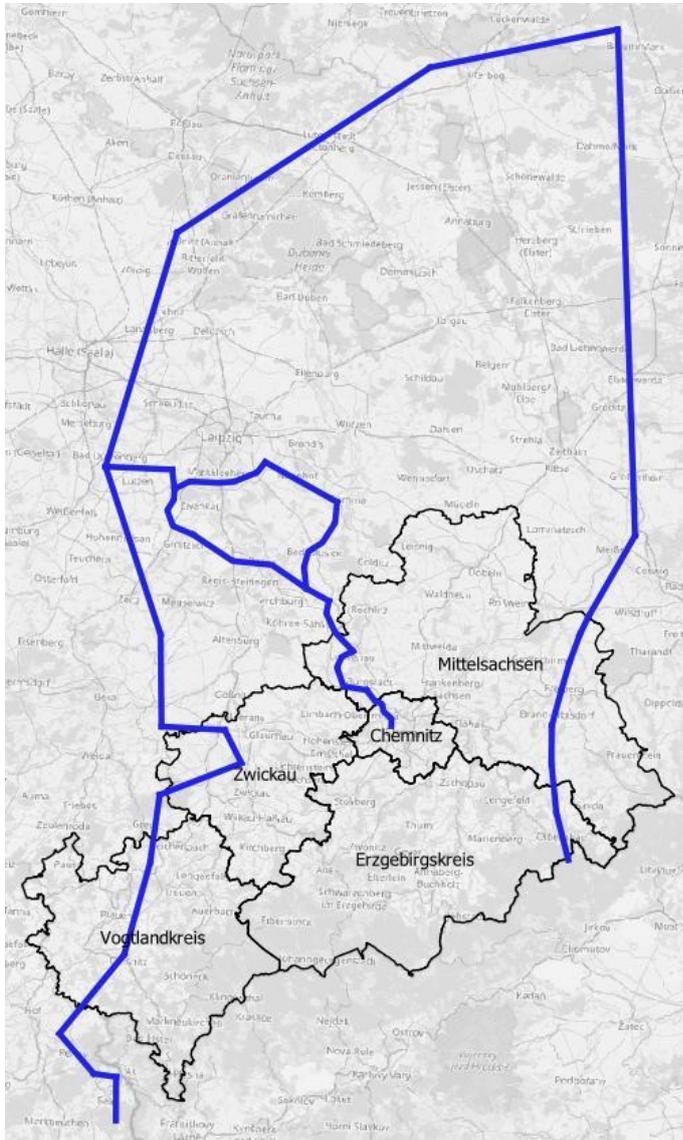


Abbildung 54: Mögliche H₂-Backbone-Anschlüsse in der Modellregion

6.2.2 Mögliche Struktur eines H₂-Netzes in der Modellregion

Entsprechend der in Kapitel 5.3 ermittelten H₂-Bedarfe (Abbildung 23) für die Jahre 2025, 2030 und 2040 wurden, ausgehend von den H₂-Backbone-Anschlüssen, mögliche Verläufe für zukünftige H₂-Leitungen eines regionalen Hochdruck-Verteilnetzes in der Modellregion bestimmt (Abbildung 55 bis Abbildung 57).

Bis 2025 würden ca. 69 km H₂-Leitungen zum Anschluss der ermittelten Verbrauchsschwerpunkte an das H₂-Backbone benötigt werden (Abbildung 55).

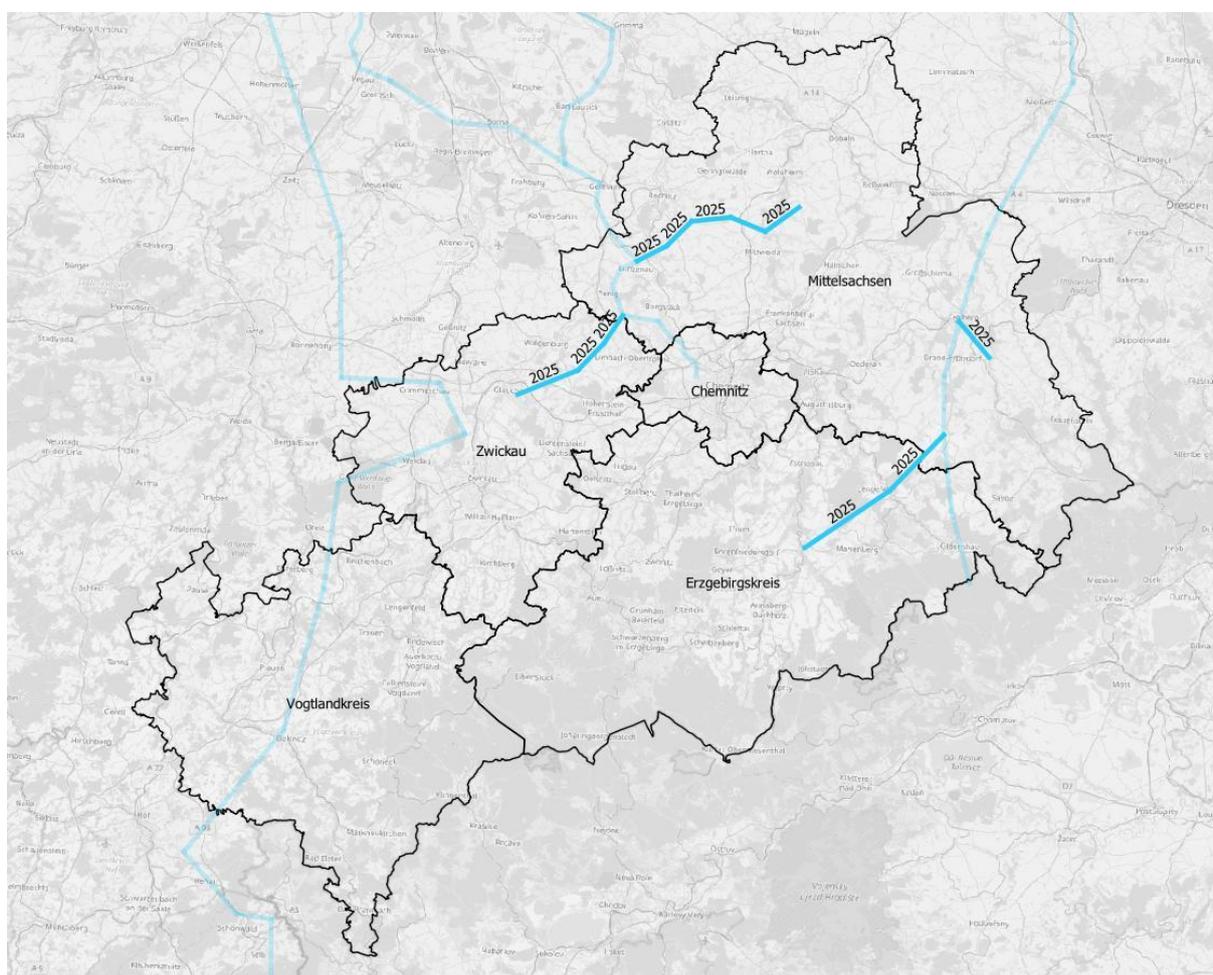


Abbildung 55: H₂-Leitungen 2025

Bis 2030 würden ca. 122 km weitere H₂-Leitungen benötigt werden (Abbildung 56).

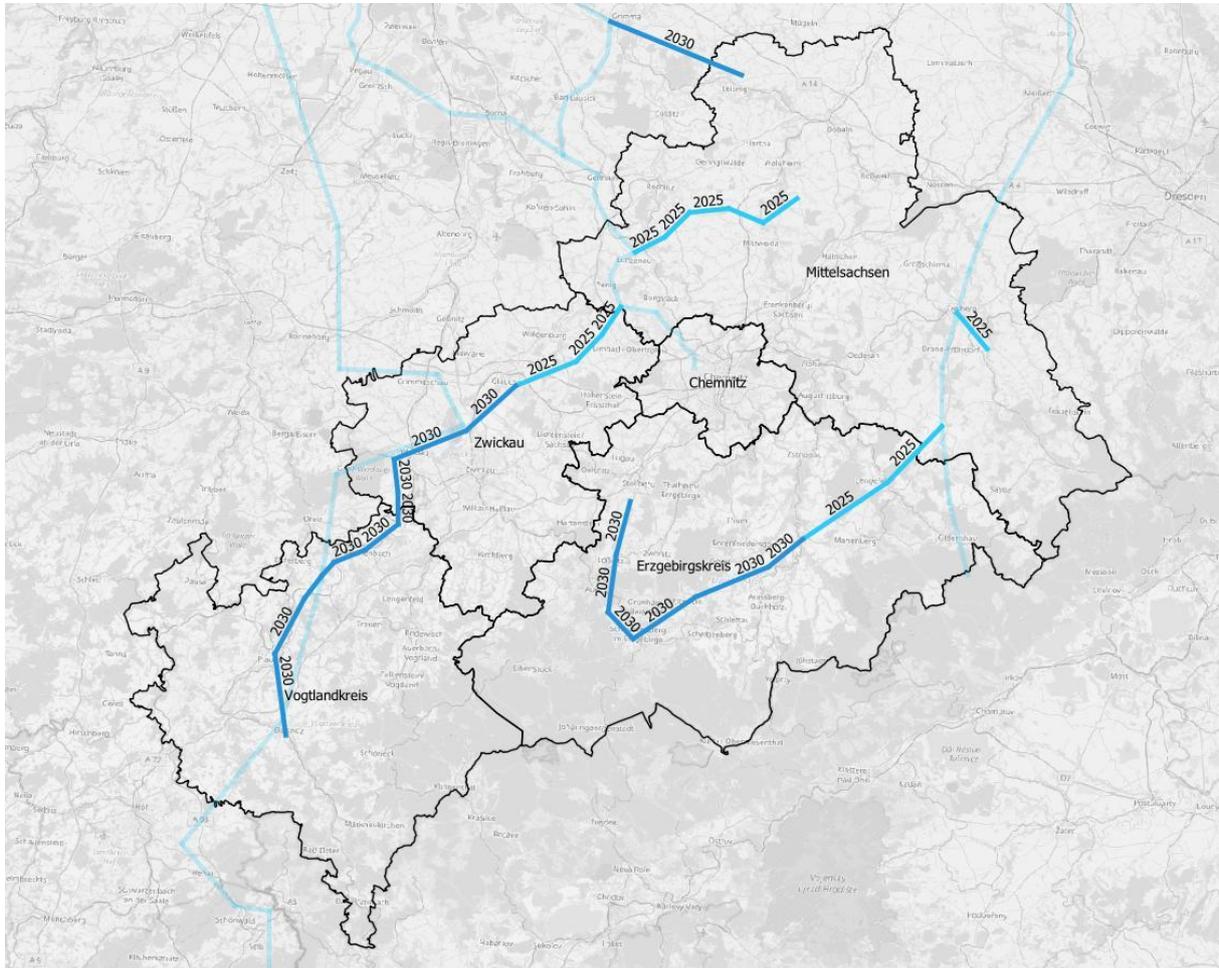


Abbildung 56: H₂-Leitungen 2030

Bis 2040 würden, ergänzend zu den ca. 69 km aus 2025 und den ca. 122 km aus 2030, ca. 91 km weitere H₂-Leitungen benötigt werden. Dies summiert sich bis 2040 beim gezeigten Trassenverlauf auf ca. 282 km H₂-Leitungen zur Verteilung des Wasserstoffs in der Region.

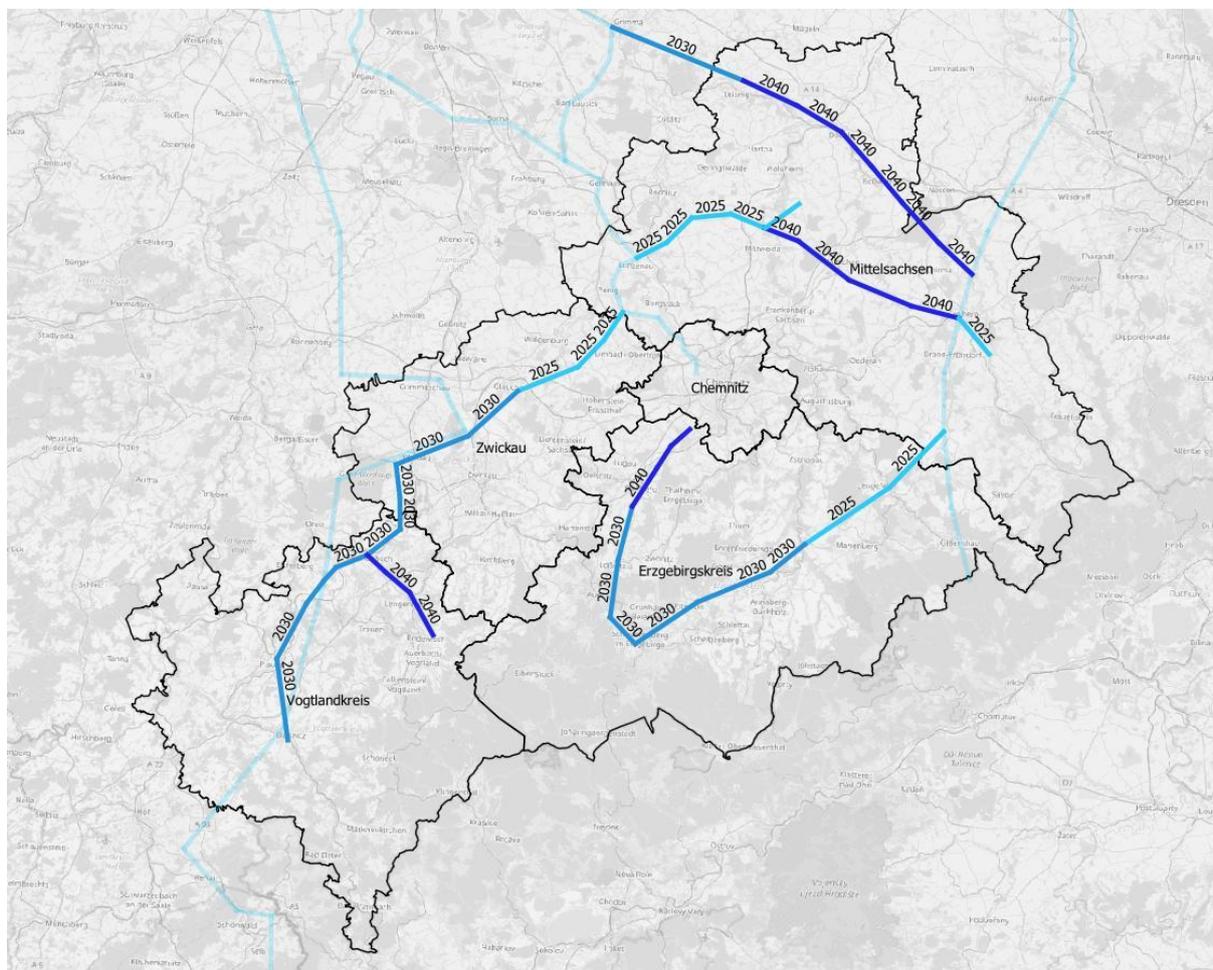


Abbildung 57: H₂-Leitungen 2040

Die H₂-Leitungen können sowohl neu errichtet werden als auch durch Umstellung bestehender Gasleitungen dem Wasserstoffsystem hinzugefügt werden. Die Umstellung bestehender Leitungen ist in der Regel deutlich günstiger als die Neuerrichtung, erfordert aber neben dem Prozess der Umstellung an sich, dass Leitungen aus dem bestehenden System herausgelöst werden können, ohne die Versorgung mit Erdgas einzuschränken.

Ein Abgleich mit bestehenden Hochdruckleitungen von Verteilnetzbetreibern in der Region zeigt, dass es möglich wäre, mindestens Teile des Trassenverlaufs der H₂-Leitungen durch Umstellung vorhandener Erdgasleitungen zu ermöglichen (Abbildung 58). Der Umfang einer

möglichen Umstellung auf Wasserstoff muss mit den Netzbetreibern vor Ort detailliert abgestimmt werden.

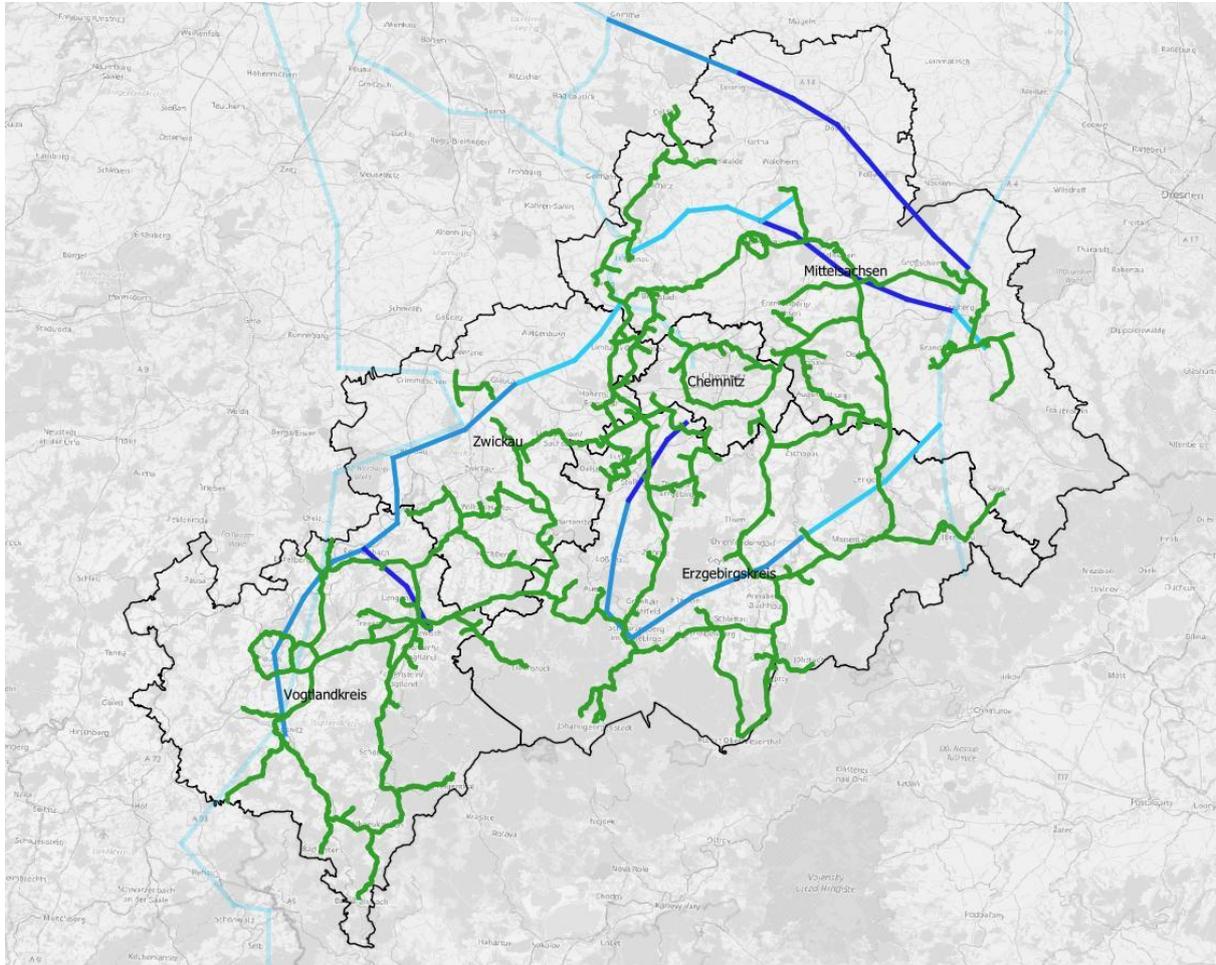


Abbildung 58: H₂-Leitungen & Bestandsnetze

6.2.3 Umstellung von Leitungen auf Wasserstoff

Bevor ein Teilstück des bestehenden Erdgasnetzes umgestellt und in ein H₂-Netz integriert werden kann, müssen zuvor immer mehrere Fragen einzeln geprüft werden, um sicherzustellen, dass die Umstellung auch umsetzbar ist:

- Ist die Leitung grundsätzlich H₂-ready?
- Sind alle, an der umzustellenden Leitung angeschlossenen, Kunden bereits H₂-ready?
- Kann der Betrieb des übrigen Erdgasnetzes nach der Umstellung des Teilstückes weiterhin sichergestellt werden?
- Sind ggf. Parallelstrukturen von Erdgas- und H₂-Leitungen notwendig, um alle Kunden weiterhin versorgen zu können?

6.2.4 Speicher und nachgelagerte Netze

Neben dem regionalen Hochdruck-Verteilnetz ist dann noch eine unterlagerte Verteilnetzstruktur erforderlich, zur Verteilung des Wasserstoffs in der Fläche, analog zu den heutigen Gasverteilnetzen – allerdings angepasst an die zukünftigen Wasserstoffbedarfsstrukturen. Darüber hinaus sind auch andere Konzepte zur Versorgung von Kunden mit Wasserstoff verfügbar, z.B. die Versorgung über Trailer, die per Lkw oder Bahn angeliefert werden (siehe Kapitel 4.4).

Des Weiteren sind, zur Sicherstellung einer bedarfsgerechten Gasversorgung bei volatiler H₂-Einspeisung, Speicher im Wasserstoffsystem unerlässlich. Analog zum heutigen Gassystem können Speicher grundsätzlich in allen Netzebenen zum Einsatz kommen. Üblich, und für Wasserstoff auch teilweise schon im H₂-Kernnetz berücksichtigt, sind H₂-UGS (Untergrundgasspeicher). Über die Anschlüsse an ein zukünftiges H₂-Backbone-Netz wird auch die Anbindung an überregionale Untergrundgasspeicher ermöglicht, wie z.B. den Kavernenspeicher im nächstgelegenen Bad Lauchstädt [105].

Möglich wären darüber hinaus kleinere Zwischenspeicher, direkt an den H₂-Erzeugeranlagen, zur untertägigen Strukturierung der Wasserstoffeinspeisung.

7 Beschreibung der konkreten Wasserstoffaktivitäten in der Region

Dieses Kapitel soll einen Überblick zu den konkreten Aktivitäten in der Region liefern. Ausgehend von den Erkenntnissen aus den Themenfeldern Erzeugung, Bedarf, Speicher und Verteilung wird außerdem ein positionierungsvorschlag hinsichtlich des Wasserstoffportfolios gegeben.

Gemeinsam mit regionalen Stakeholdern konnten zwei spezifischen Wasserstoff-Inseln entwickelt werden. Für diese wurden sowohl die Erzeugung, die praktische Anwendung in regionalen Flotten, sowie Speicher- und Verteilkonzepte betrachtet, um eine gesamtheitliche Wirtschaftlichkeit der Vorhaben zu ermöglichen.

7.1 Positionierungsvorschlag für die Region hinsichtlich Wasserstoffportfolio

Die strategische Positionierung der Modellregion Chemnitz im Wasserstoffsektor erfordert eine zielgerichtete Ausrichtung, die sowohl eine kurzfristige als auch eine langfristige Zeitschiene betrachtet. Dabei werden die vorhandenen Ressourcen und Stärken der Region genutzt, um eine nachhaltige Wasserstoffwirtschaft aufzubauen.

Kurzfristig sollte der Fokus, auf den in der Entwicklung bereits fortgeschrittenen Pilotprojekten liegen. Dies bedeutet eine klare Ausrichtung der Ressourcen auf die im weiteren Verlauf des Kapitels noch beschriebenen Wasserstoffinseln. Vorteil ist die Abdeckung der gesamten Wertschöpfungskette von Erzeugung bis Bedarf, womit diese Pilotprojekte eine Reallabor für die Wasserstoffwirtschaft im Großen darstellen können.

Während die kurzfristige Positionierung auf die vorhandenen Projekte fokussiert, erfordert die langfristige Perspektive eine strategische Herangehensweise an die Herausforderung des wachsenden Wasserstoffbedarfs, der aus der regionalen Erzeugung nicht gedeckt werden kann. Daher sollte bereits frühzeitig eine Ausrichtung gewählt werden, die den Import von Wasserstoff in Erwägung zieht und die notwendigen Vorbereitungen trifft. Dabei sollten beispielsweise sowohl nationale als auch internationale Partnerschaften geschlossen werden, um eine zuverlässige und nachhaltige Wasserstoffversorgung sicherzustellen.

Vor dem Hintergrund der Energiesicherheit sollte die langfristige Positionierung außerdem darauf abzielen, das Wasserstoffportfolio der Region zu diversifizieren. Dies kann durch den Ausbau unterschiedlicher Wasserstoffquellen, einschließlich Import, verstärkter Erzeugung erneuerbarer Energien und effizienter Nutzung von grünem Wasserstoff erreicht werden.

Im Folgenden werden die konkreten Wasserstoffinseln vorgestellt und kurzfristige Maßnahmen aufgezeigt, die zur Realisierung dieser getroffen werden müssen.

7.2 Wasserstoffinsel - Stadt Chemnitz

Die spezifische Wasserstoff-Insel rund um den Standort Chemnitz setzt die gesamte Wertschöpfungskette – von Produktion über Verteilung / Transport und Abnahme – regional um. Chemnitz kann somit eine Musterregion für grünen Wasserstoff in Sachsen werden. Schematisch sind die Hauptakteure der Wertschöpfungskette in Abbildung 59 dargestellt.

Die eins energie in sachsen GmbH & Co. KG (nachfolgend eins) plant den Bau eines Elektrolyseurs (ca. 4,5 - 6 MW) mit passenden Verdichter- und Speicheranlagen am historischen Standort Altes Gaswerk III auf der Saydaer Straße in Chemnitz (H₂-Werk Chemnitz).

Um den regional erzeugten grünen Wasserstoff den entsprechenden Abnehmern zur Verfügung zu stellen, wurde ein flexibles H₂-Verteilssystem zu mehreren Tankstellenstandorten konzeptioniert. Zusätzlich befindet sich ein H₂-Verteilnetz (H₂-Startnetz) von eins / inetz in der Vorplanung. Somit kann auch ein kurzfristig stark steigender Wasserstoffbedarf gedeckt werden.

Als Abnehmer kommen die ansässigen Verkehrs- und Logistikunternehmen in Frage. Darüber hinaus wird ein weiterer Großabnehmer des Wasserstoffs, das Hydrogen Innovation Center (HIC) sein, welches mit einem Schwerpunkt auf Forschungs- und Entwicklungsleistungen fungiert.

Durch das HyExperts-Projekt konnten die Hauptakteure zusammengebracht und erste Modellrechnungen durchgeführt werden, welche zeigen, dass es grundsätzlich möglich ist, eine für alle Teilnehmer wirtschaftlich vorteilhafte Wertschöpfungskette von der Erzeugung bis zur Nutzung aufzubauen.

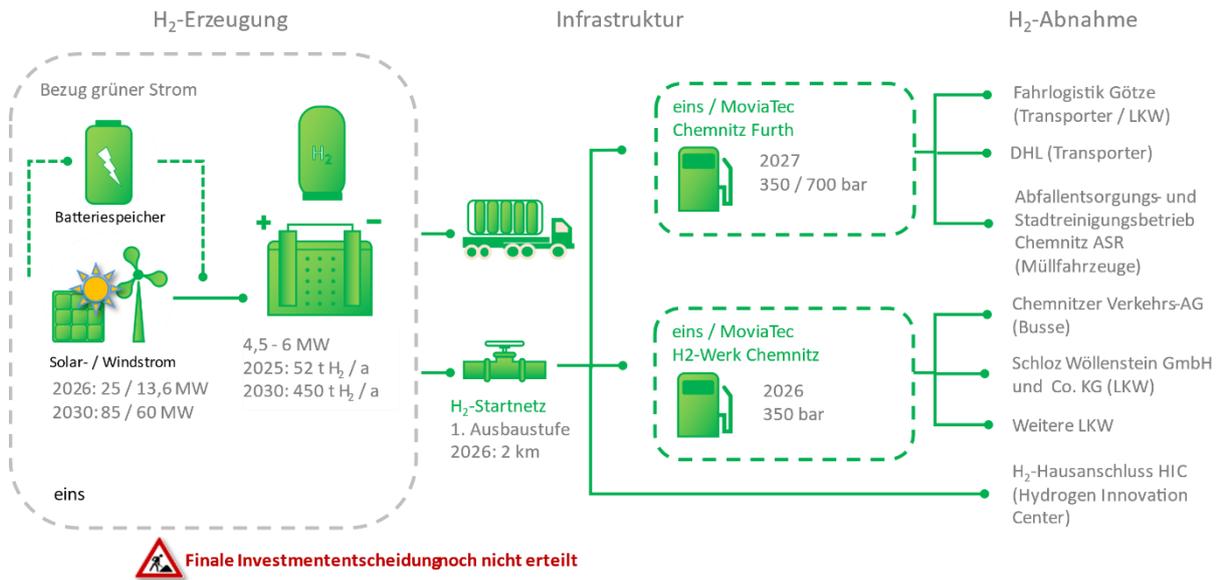


Abbildung 59 Spezifische Wasserstoff-Insel Standort Chemnitz (eigene Darstellung von eins)

Erzeugung

Der erforderliche grüne Strom für den Betrieb des Elektrolyseurs wird von Onshore-Windanlagen und Photovoltaik-Anlagen aus dem Portfolio der eins bereitgestellt, welche gemäß des Zusätzlichkeitskriteriums nach DA RED II bis 2027 entwickelt werden. Darüber hinaus gehende Grünstrommengen werden am Markt beschafft.

Der geplante Elektrolyseur ist mit einer installierten Leistung zwischen 4,5 und 6 MW veranschlagt. Ergänzend befindet sich ein Großbatteriespeicher mit 30 - max. 50 MW in der Vorplanung, welcher die Fahrweise des Elektrolyseurs netzdienlich unterstützt.

Zusätzlich zur Wasserstoffproduktion kann die Abwärme des Elektrolyseurs im Chemnitzer Fernwärmenetz genutzt werden. Die Nutzung der Abwärme verbessert zudem die Wirtschaftlichkeit und stellt eine weitere Einnahmequelle für den Betreiber des Elektrolyseurs, eins, dar. Vor allem aber verdrängt diese Abwärme fossil erzeugte Fernwärme und ermöglicht damit eine zusätzliche Emissionsreduktion.

Speicher / Verteilung

Der regional erzeugte grüne Wasserstoff wird durch ein flexibles H₂-Verteilssystem bestehend aus Multi Element Gas Containern (MEGC) CO₂-neutral zu mehreren Tankstellen transportiert. Die Grundlage ist ein Trailer-Belieferungskonzept für unterschiedliche Tankoptionen. Dafür plant eins am Standort H₂-Werk Chemnitz eine H₂-Abfüllanlage zur Befüllung von vier MEGC pro Tag mit einer Größe von bis zu 40 ft und einem Druck von 500 bar. Die Anlage soll perspektivisch über das H₂-Startnetz an den H₂-Backbone angeschlossen werden.

Im gleichen Stadtteil Altchemnitz befindet sich das H₂-Startnetz. Dieses Startnetz wird das HIC, die CVAG (kommunales Verkehrsunternehmen) und weitere Verbraucher an das H₂-Werk Chemnitz anbinden. Zudem bieten umliegende Industrieunternehmen ein großes Potenzial. Das Startnetz soll auch an den H₂-Backbone angeschlossen werden.

Tankstellen

Es gibt unterschiedliche Wasserstofftankoptionen, insbesondere in Bezug auf den Druck, weil verschiedene Anwendungen und Nutzungsszenarien unterschiedliche Anforderungen an die Speicherung von Wasserstoff haben.

Dabei sind 350 bar und 700 bar die beiden gängigsten Druckniveaus für Wasserstofftanks. Ein Druckniveau von 350 bar wird häufig bei größeren Anwendungen wie Wasserstoffbussen und Lkw verwendet. Ein Druckniveau von 700 bar wird häufig bei Müllsammelfahrzeugen und auch kleineren Anwendungen wie Wasserstoffautos (Pkw) verwendet, künftig auch bei schweren Lkw. Allerdings erfordert die Speicherung von Wasserstoff bei 700 bar eine auf die höhere Druckanforderung ausgelegte Dimensionierung, welches zu einem höheren Preis der Tanks führt. Ein dazugehöriges Tankstellenlayout inklusive einer 700 bar Tankoption ist mit Zusatzkosten bei der Investition verbunden (bspw. für die Kühleinheit), sowie auch bei dem Betrieb (höhere Stromkosten für die Verdichtung).

Tankstelle Altchemnitz

Am Standort H₂-Werk Chemnitz plant eins gemeinsam mit dem Projektpartner MoviaTec eine 350 bar Tankstelle zur Bus- und Lkw-Betankung mit einem initialen Jahresdurchsatz von ca. 80 t. Die Tankstelle soll zwei Back-to-Back Betankungen ermöglichen und ist direkt an das H₂-Werk angeschlossen. Die Tankstelle soll in erster Linie die CVAG und nahegelegene Speditionen beim H₂-Hochlauf unterstützen und gemeinsam mit dem H₂-Werk Ende 2026 in Betrieb gehen. Mit der Substitution von Diesel-Kraftstoff durch die entsprechende Menge Wasserstoff können jährlich etwa 1.500 Tonnen CO₂ eingespart werden.

Tankstelle Chemnitz Furth

Am Standort Chemnitz Furth am Heizkraftwerk Nord planen die Projektpartner eins und MoviaTec eine Tankstelle, welche pro Tag 2 Tonnen H₂ zur Verfügung stellen kann. Diese soll den Abfallentsorgungs- und Stadtreinigungsbetrieb Chemnitz (ASR) und nahegelegene Speditionen versorgen. Weiterhin sollen hier auch die Lkw für die Brennstofftransporte zum nahegelegenen Biomasseheizkraftwerk von eins betankt werden. Die Tankstelle dient weiterhin als entscheidender Baustein für die Defossilisierung der Servicefahrzeugflotte von eins / inetz, welche auch im Krisen- und Schwarzfall vollumfänglich einsatzbereit sein muss.

Die Tankstelle wird mit 700 bar Lkw-Betankungstechnologie geplant. Die Inbetriebnahme soll bis Mitte 2027 abgeschlossen sein. Für diese Vorhaben wurde ein Förderantrag (Förderaufruf der NOW GmbH für Wasserstofftankstellen für Schwerlastfahrzeuge) im Namen von MoviaTec eingereicht und zugesagt. Langfristig soll die Anbindung an den H₂-Backbone erfolgen. Der Standort könnte außerdem schon heute über die Schiene beliefert werden. Hervorzuheben sind die jährlichen CO₂-Einsparungen von etwa 8.000 Tonnen durch die Substitution von Diesel-Kraftstoff mit 450 Tonnen Wasserstoff pro Jahr.

Ein möglicher Ausweichstandort der Tankstelle befindet sich nahe der Anschlussstelle Chemnitz Süd (A72/A4).

Bedarf

Der ÖPNV bietet ein gutes Potenzial einer der Vorreiter für den Einsatz von wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen zu werden. Begründet liegt dies in verschiedenen Randbedingungen, die sich sowohl aus den Reichweiten-Anforderungen als auch aus der geltenden Rechtslage ergeben. Als direkter Anreiz zur Umstellung auf CO₂-neutrale Lösungen dient hier ein konkreter Rechtsrahmen, welcher eine Mindestquote von sauberen Fahrzeugen im Rahmen von Neubeschaffungen fordert (Gesetz über die Beschaffung sauberer Straßenfahrzeuge). Demnach wird der Wasserstoffbedarf des kommunalen Flottenbetreibers Chemnitzer Verkehrs-AG (CVAG) stetig wachsen. Anfänglich sollen zwei H₂-Busse je nach Verfügbarkeit ab 2025 / 2026 im Linieneinsatz in Chemnitz eingesetzt werden. Danach soll der H₂-Fuhrpark stetig wachsen und alte Dieselfahrzeuge ersetzen.

Neben dem ÖPNV bieten auch Sonder- und Kommunalfahrzeuge ein großes Potenzial zur Umrüstung auf eine wasserstoffbetriebene Flotte – sie stellen besondere Anforderungen an den H₂-Antriebsstrang. Die zur Verfügung stehende Leistung dient dabei nicht allein dem Vortrieb, sondern wird weiterhin für den jeweiligen Aufbau (bspw. Müllsammelfahrzeug) benötigt. Auch hier fordert der geltende Rechtsrahmen die Einhaltung einer Mindestquote. Zwei H₂-Abfallsammelfahrzeuge sollen bei ASR Chemnitz ab 2025 auf einer Tagesstrecke von 50-70 km / Fahrzeug eingesetzt werden. Ab 2026 wächst der H₂-Fuhrpark jährlich an.

Weiterhin bietet der Logistiksektor ein großes Bedarfspotenzial für die Umrüstung der Flotte auf Wasserstoff. Dies liegt darin begründet, dass eine große Menge an Gütern auf der Straße transportiert wird. Im Sinne der Erreichung der Klimaziele sollte auch in diesem Anwendungsbereich, der sich von kleinen Nutzfahrzeugen bis zum Sattelschlepper erstreckt, eine Umrüstung angestrebt werden. Zu nennen sind exemplarisch in diesem Zusammenhang folgende Akteure:

- Schloz Wöllenstein GmbH & Co. KG plant zwei 40 t-Lkw auf H₂-Brennstoffzellenantrieb umzurüsten, um diese an gewerbliche Kunden zu vermieten.
- Das Unternehmen Fahrlogistik Götze plant die Nutzung eines auf H₂-Brennstoffzellenantrieb umgerüsteten 40 t-Lkw für Logistik- und Transportdienstleistungen.
- Die Weber Gruppe plant die Umrüstung eines 40 t-Lkw auf H₂-Brennstoffzellenantrieb, um diesen für Logistik- und Transportdienstleistungen einzusetzen. Die H₂-Flotte kann um voraussichtlich 3 H₂-Lkw pro Jahr erweitert werden.
- Die eins energie in sachsen GmbH & Co. KG plant die Errichtung eines Biomasseheizkraftwerkes und Umrüstung des Braunkohleheizkraftwerkes zur Verwertung von Klärschlamm und Siedlungsabfällen. Der Brennstofftransport soll mit H₂-Lkw erfolgen.
- Die Sander Fördertechnik GmbH plant den Einsatz eines in Chemnitz stationierten H₂-Lkw für den Reifenservice und Mietservice. Zusätzlich wird ein leichtes H₂-Nutzfahrzeug in der Serviceflotte in Chemnitz eingesetzt.
- Die Friweika eG plant die Nutzung eines auf H₂-Brennstoffzellenantrieb umgerüsteten 40 t-Lkw für Logistik- und Transportdienstleistungen. Die H₂-Flotte kann um voraussichtlich 6 H₂-Lkw pro Jahr erweitert werden.
- Die eins energie in sachsen GmbH & Co. KG und die inetz GmbH planen eine Umstellung der gesamten Flotte von ca. 230 Servicefahrzeugen im Rahmen der Transformation des Energieversorgungssystems hin zur Klimaneutralität im Jahr 2045.

Einen kontinuierlichen Bedarf an grünem Wasserstoff von ca. 60 Tonnen H₂ pro Jahr hat das HIC Hydrogen Innovation Center als Teil des ITZ (Nationales Innovations- und Technologiezentrum), welches per Hausanschluss versorgt werden soll.

Kurzfristige Maßnahmen zur Umsetzung der Wasserstoff-Insel Chemnitz:

- (rechts-)verbindliche Absprachen zu Abnahmemengen und Preisen (Investitionssicherheit für die H₂ – Infrastruktur)
- Unterstützung bei der Akquirierung von Fördermitteln durch Landkreis, Land Sachsen und Bund vor allem für Fahrzeugneubeschaffung der Flottenbetreiber
- Ggf. Erweiterung der Inseln durch zusätzliche Abnehmer, um Risiken in Hochlaufphasen zu minimieren
- Strategie des Landkreises zum Thema Sektorenkopplung

7.3 Wasserstoffinsel - Mittweida / Erlau

Auch für die Region Mittweida wurde eine spezifische Wasserstoff-Insel für die gesamte Wertschöpfungskette entwickelt. Die entsprechenden Akteure sind in Abbildung 60 dargestellt.

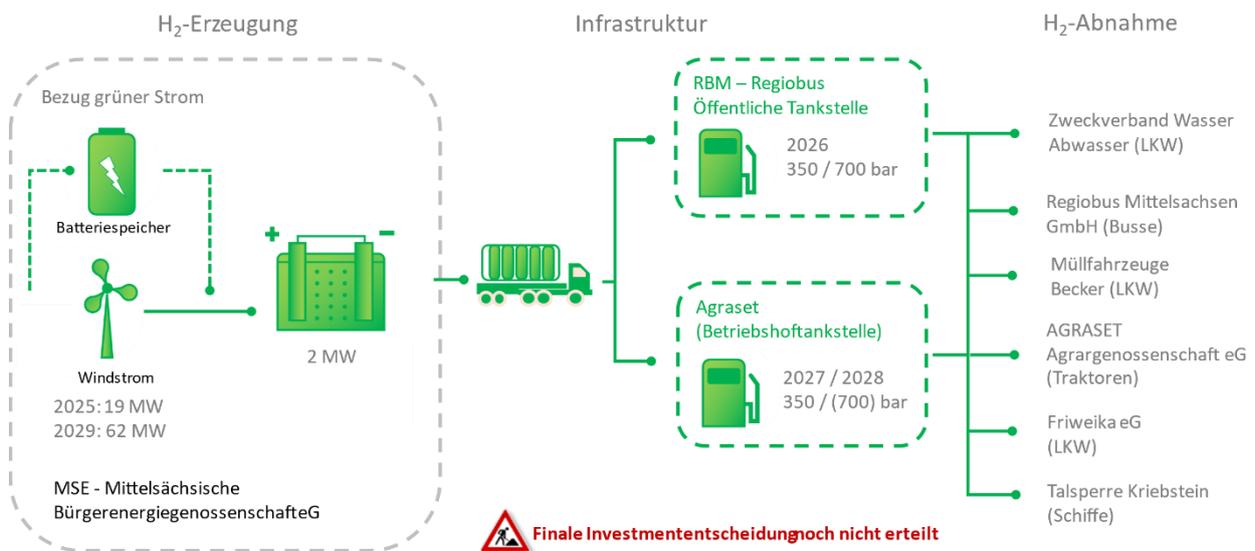


Abbildung 60 Spezifische Wasserstoff-Insel Standort Mittweida (eigene Darstellung von eins)

Die MSE (Mittelsächsische Bürgerenergiegenossenschaft eG) plant die Inbetriebnahme eines für 2025 geplanten Windparks in Erlau / Crossen – zusätzlich soll mit dem erzeugten Grünstrom ein Elektrolyseur (2 MW) in Erlau betrieben werden. Der Strombezug erfolgt per Direktleitung. An gleichen Standort (on-site Elektrolyse) wird der produzierte Wasserstoff an einer Betriebshoftankstelle für Landwirtschaftsfahrzeuge von Agraset, Lkw der Friweika eG und für die Fahrgastschiff flotte auf der Talsperre Kriebstein zur Verfügung gestellt. Des Weiteren wird eine öffentliche Tankstelle in Mittweida errichtet, welche durch ein Trailerkonzept mit Wasserstoff beliefert wird. In Mittweida wird der Wasserstoff bei kommunalen Flotten

eingesetzt. Bei diesen besteht großes Interesse an einer Umstellung auf H₂-Antriebe, auf Grund der längeren Fahrstrecken im ländlichen Bereich.

Im Rahmen des HyExperts-Projekts wurden die Geschäftsmodelle der einzelnen Akteure der Wasserstoff-Wertschöpfungskette geprüft und als tragfähig bewertet. Besonderes Augenmerk lag dabei auf den technischen Spezifikationen, Kosten und Geldflüssen. Die Betrachtung basiert auf der Plausibilisierung der kommunalen Flottengrößen, der Wasserstoff-Abnahmemengen und der Wasserstoff-Preise.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass zum Zeitpunkt der Berichtserstellung noch keine finale Investitionsentscheidung für das Vorhaben vorlag.

Erzeugung

Der erforderliche grüne Strom für den Betrieb des Elektrolyseurs wird aus dem Stromnetz bezogen und von eigenen Onshore-Windanlagen (Windpark Erlau / Crossen) bereitgestellt. Für den Stromnetzbezug bietet sich ein Stromliefervertrag (PPA, Power Purchase Agreement) an, der konform ist mit den Regeln des delegierten Rechtsaktes zur Definition von erneuerbarem Wasserstoff gemäß RED II. Die MSE profitiert durch ein PPA von einem vorhersehbaren Strompreis und Strom aus erneuerbaren Quellen. Der Stromerzeuger profitiert von einer langfristigen Absicherung für den Verkauf des erzeugten Stroms, was die Finanzierung und Rentabilität des Projekts unterstützt. Somit wird Investitionssicherheit und Marktstabilität geschaffen. Die konkrete Aushandlung der Vertragsbedingungen erfolgt in einem Individualvertrag zum Zeitpunkt der finalen Investitionsentscheidung.

Der geplante Elektrolyseur ist mit einer installierten Leistung von 2 MW und 4000 Vollbenutzungsstunden / Jahr veranschlagt, mit steigendem Bedarf der kommunalen Flottenbetreiber und weiterer Ankerkunden bietet sich eine Erweiterung an. Somit lässt sich ein steigender Bedarf auch für eine mögliche maximale Ausbaustufe der Flottenumstellung decken. Zusätzlich zur Wasserstoffproduktion könnte die Abwärme des Elektrolyseurs genutzt werden, um das Geschäftsmodell zu verbessern. Vor allem aber verdrängt die Abwärme fossil erzeugte Wärme und ermöglicht damit eine zusätzliche Emissionsreduktion.

Speicher / Verteilung

Für die Verteilung des Wasserstoffs sind zwei Tankstellenstandorte geplant. Zum einen eine Betriebshoftankstelle am gleichen Standort, wie die Elektrolyseanlage (on-site) in Erlau und zum anderen eine öffentliche Tankstelle in Mittweida. Nachfolgend in der Abbildung 61 ist ein mögliches Tankstellenkonzept (vereinfacht dargestellt) dargestellt. Grundlage dafür ist ein Trailer-Belieferungskonzept für unterschiedliche Tankoptionen.

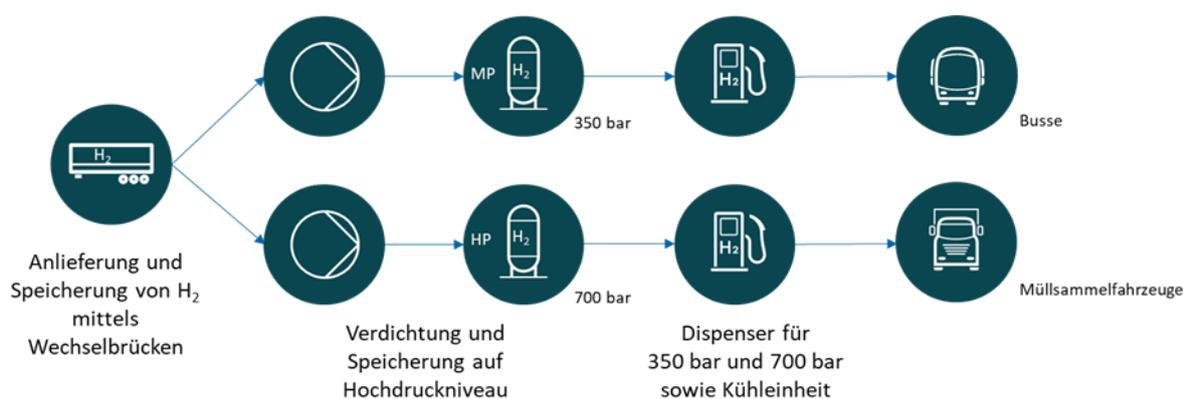


Abbildung 61 Vereinfacht dargestelltes Tankstellenkonzept für den Standort Mittweida

Es gibt unterschiedliche Wasserstofftankoptionen, insbesondere in Bezug auf den Druck, weil verschiedene Anwendungen und Nutzungsszenarien unterschiedliche Anforderungen an die Speicherung von Wasserstoff haben.

Bedarf

Aufgrund der Datenlage ist nachfolgend am Beispiel der öffentlichen Tankstelle in Mittweida (Abbildung 62) die potenzielle (Gesamt-)Wasserstoffabnahme der kommunalen Flotten und auch Landwirtschaftsfahrzeuge zeitlich aufgelöst dargestellt.

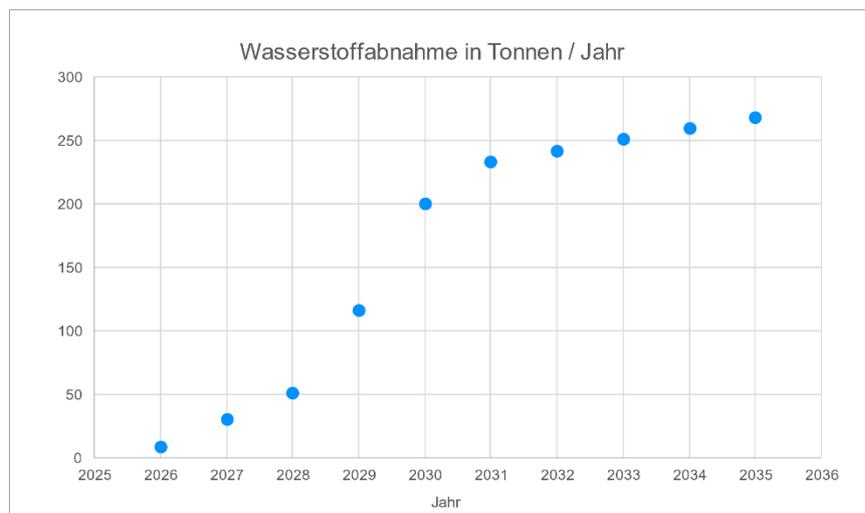


Abbildung 62 Flottenhochlauf und Wasserstoffabnahme für die öffentliche Tankstelle in Mittweida

Es ist ein stetiger Anstieg der Wasserstoffabnahme bis auf einen Maximalwert von ca. 270 Tonnen / Jahr erkennbar. Bislang wurde ein Abnahmepreis von 6,72 € / kg (netto)⁴ Wasserstoff angenommen – zum aktuellen Zeitpunkt ist mit diesem Preis die Parität zum Diesel gegeben. Künftig ist für Diesel mit großen Preissteigerungen zu rechnen, wohingegen ein stabiler Wasserstoffpreis über langfristige Lieferverträge kalkulierbar bleibt. Mit eingerechnet ist zusätzlich die Treibhausgasminderungsquote (THG-Quote) – ein Förderinstrument, mit dem Unternehmen, die erneuerbaren Wasserstoff in den Verkehr bringen (Tankstellenbetreibende), erhebliche zusätzliche Erlöse erzielen können und den Wasserstoff demnach günstiger anbieten können. Hervorzuheben sind die jährlichen CO₂-Einsparungen von etwa 4.500 Tonnen durch die entsprechende Substitution von Diesel-Kraftstoff mit Wasserstoff.

Kurzfristige Maßnahmen zur Umsetzung der Wasserstoff-Insel Mittweida / Erlau:

- (rechts-)verbindliche Absprachen zu Abnahmemengen und Preisen (Investitionssicherheit für die H₂ – Infrastruktur)
- Gründung einer Projekt-Gesellschaft (MSE / Agraset, Regiobus, ggf. Landkreis selbst), zur Teilung der Chancen und Risiken von Investitionen
- Unterstützung bei der Akquirierung von Fördermitteln durch Landkreis, Land Sachsen und Bund vor allem für Fahrzeugneubeschaffung der Flottenbetreiber
- Ggf. Erweiterung der Inseln durch zusätzliche Abnehmer, um Risiken in Hochlaufphasen zu minimieren

⁴ Werte festgelegt bis 2030, danach dynamisiert (3%)



8 Ökonomischer und ökologischer Mehrwert für die Modellregion

In diesem Kapitel soll ein Überblick über die ökonomischen Potenziale und Herausforderungen hinsichtlich einer Wasserstoffwirtschaft gegeben werden, dazu gehört auch eine Betrachtung der möglichen Auswirkungen auf den Arbeitsmarkt. Außerdem erfolgt eine Betrachtung der Umweltfaktoren.

8.1 Mobilisierung von Kapital

Für die Umsetzung von Wasserstoffprojekten stehen verschiedene Finanzierungsmöglichkeiten zur Verfügung. Da der Aufbau einer gesamtheitlich wirtschaftlichen Wertschöpfungskette aktuell schwer darstellbar ist, stellt die öffentliche Förderung aktuell einen wesentlichen Baustein in der Finanzierung dar. Realisiert wird diese in Deutschlands über eine Vielzahl verschiedener Förderprogramme. Diese beziehen sich jeweils auf verschiedene Teile der Wertschöpfungskette und besitzen eine Laufzeit über mehrere Jahre. Wichtig zu beachten ist, dass ein konkreter Abruf dieser Förderung in aller Regel über einzelne Förderaufrufe realisiert wird. Diese werden jeweils zeitlich begrenzt. Somit ist für die Planung einer Finanzierung zwingend zu berücksichtigen, dass eine Förderung nicht dauerhaft zur Verfügung steht. Weiterhin sind in der Förderung nicht zwingend alle Investitionsvorhaben abgedeckt.

Somit ist neben der Förderung privates Kapital ein essenzieller Baustein zur Finanzierung. Zum einen, da die Förderung in der Regel nicht die gesamte Summe abdeckt, sondern beispielsweise für 80 % der Mehrkosten aufkommt. Zum anderen für die Investitionsvorhaben, für welche keine Förderung zur Verfügung steht. Dies kann schnell dazu führen, dass Finanzierungslücken für die jeweiligen Vorhaben entstehen. Um diese zu schließen, stehen verschiedene Optionen zur Verfügung, die im Folgenden näher beleuchtet werden sollen. Die mit dem Wegfall der Förderung entstehende Herausforderung für die Gesamtwirtschaftlichkeit wird in diesem Kapitel nicht näher betrachtet, ist dabei jedoch zwingend zu berücksichtigen. Insbesondere da die Wirtschaftlichkeit eines Vorhabens als Voraussetzung für die Beschaffung von Kapital angesehen werden kann.

Eine gängige Möglichkeit zur Finanzierung von Investitionsvorhaben ist die Aufnahme von Krediten. Diese kommen beispielsweise in Ergänzung zum verfügbaren Eigenkapital für die Finanzierung zum Einsatz. Dabei hängen die Konditionen, Zinssätze und Rückzahlungsbedingungen von der Bonität des Unternehmens sowie der Art des Projekts ab. Grundlegend ist hier ein detaillierter Geschäftsplan. Dieser sollte das Vorhaben und dessen Rentabilität verdeutlichen, um eine Kreditzusage von der Bank erhalten zu können.



Daneben besteht die Möglichkeit, Kredite von Förder- und Entwicklungsbanken wie beispielsweise der KfW zu beziehen. Hier ist im Einzelfall zu prüfen, ob diese Angebote für das jeweilige Investitionsvorhaben bereitstellen. Dies kann beispielsweise für Finanzierungen für Projekte im Bereich erneuerbarer Energien und sauberer Technologien der Fall sein. Vorteil ist, dass diese Institutionen häufig günstigere Konditionen und längere Rückzahlungszeiträume als kommerzielle Banken anbieten.

Je nach geplanter Anwendung oder Projekt können auch alternative Geschäftsmodelle in Betracht gezogen werden. Diese können zum einen auf die Kapitalbeschaffung, zum anderen auf eine Verbesserung der Wirtschaftlichkeit oder eine Minderung der Investitionen ausgelegt sein.

Als alternative Möglichkeit der Kapitalbeschaffung kommen genossenschaftliche Konzepte in Betracht. Diese sind zuletzt verstärkt im Bereich der erneuerbaren Energien zu beobachten. Dabei werden von der Genossenschaft unter Einbindung der Bürgerinnen und Bürger und weiterer Akteure wie etwa den Kommunen, Energieanlagen beschafft und betrieben. Neben der Möglichkeit, Kapital abseits von Bankkrediten zu beschaffen, bietet dieses Konzept eine Vielzahl an Vorteilen. So bleiben die Einnahmen des Vorhabens in der Region und können weiteren lokalen Investitionen zugutekommen. Außerdem kommt dies den Genossenschaftsmitgliedern zugute die entweder an den Gewinnen beteiligt, oder einen Zugang zu preiswertem lokal erzeugtem Strom bekommen können. Dies hat den weiteren entscheidenden Vorteil, dass auf diesem Weg die Akzeptanz für solche Projekte verbessert werden kann. Insbesondere im Bereich von Windenergieanlagen gibt es häufig Widerstand auf lokaler Ebene. Mit einer vorteilhaften Beteiligung für die Bürgerinnen und Bürger können Vorbehalte abgebaut und die Akzeptanz für erneuerbare Energien gestärkt werden. Der Vorteil, dass lokales und privates Kapital beschafft wird, kann sich jedoch auch gleichzeitig als Nachteil erweisen. Die initiale Kapitalbeschaffung kann für eine frisch gegründete Genossenschaft eine anspruchsvolle Aufgabe darstellen, bei der besondere Aufmerksamkeit auf das damit verbundene Risiko gelegt werden muss. Dieses Risiko kann durch proaktive Informationsarbeit und eine aktive Mitgliederwerbung abgemildert werden, um Personen zu gewinnen, die das erforderliche Anfangskapital beisteuern. Es ist von grundlegender Bedeutung, dass eine klare Struktur und Mechanismen zur finanziellen Verwaltung innerhalb der Genossenschaft etabliert werden. Hierzu zählen die Festlegung der Konditionen für Darlehen-Rückzahlungen, die Implementierung von Kontrollmechanismen sowie die regelmäßige Kommunikation mit den Mitgliedern über den Projektfortschritt und die Verwendung der finanziellen Mittel.



Als weiteres alternatives Geschäftsmodell kann der Zusammenschluss zu einer Projektgesellschaft betrachtet werden. Diese bietet durch den partnerschaftlichen Zusammenschluss verschiedener Stakeholder ein großes Potenzial zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit. Aktuell besteht die Schwierigkeit, dass die einzelnen Bestandteile der Wasserstoffwertschöpfung nur schwer wirtschaftlich darstellbar sind. Lösung kann die Bildung einer Projektgesellschaft bieten. Sofern bei dieser die gesamte Wertschöpfungskette von der Erzeugung der erneuerbaren Energien und des Wasserstoffs bis zur Anwendung des Wasserstoffs berücksichtigt wird, lässt sich deutlich vereinfacht ein wirtschaftliches Konzept aufstellen. Dies lässt sich mit verschiedenen Faktoren begründen. Zum einen lässt sich der Energiepreis für die Elektrolyse über eigene EE-Anlagen minimieren, da zum einen die Marge für den Betreiber und im besten Fall auch die Netzentgelte wegfallen können. Der aktuell entscheidendste Faktor für eine gesamtheitlich wirtschaftliche Wasserstoffwertschöpfungskette ist die THG-Quote. Wenn diese mittels des Zusammenschlusses zu einer Projektgesellschaft über alle Stakeholder verteilt werden kann, ist es möglich, für die verschiedenen Teilschritte in der Wertschöpfung einen wirtschaftlichen Betrieb darzustellen. Ohne dieses Instrument der THG-Quote ist dies aktuell in der Regel nicht darstellbar.

Ein konkretes Beispiel zur möglichen Minderung der Investitionskosten ergibt sich im Bereich der Flottenanwendungen. Für einen ersten Probetrieb können hohe Investitionskosten über Mietmodelle oder das Leasing von Fahrzeugen vermieden werden. Als positiver Effekt kann neben der Minderung des benötigten Kapitals das unternehmerische Risiko minimiert werden. Dies ist insbesondere bei neuen Technologien wie der Wasserstoffmobilität ein entscheidender Faktor. Insofern der risikoarme Probetrieb erfolgreich ist, kann die Investitionsentscheidung für eigene Fahrzeuge im Nachgang getroffen werden. Sollte zusätzlich zu einem spezifischen Zeitpunkt kein Förderaufruf offen sein, können Miet- oder Leasingmodelle auch genutzt werden, um den Zeitraum bis zum nächsten Förderaufruf überbrücken zu können.

Darüber hinaus kann Risikokapital als Investitionsmittel genutzt werden. So können Unternehmen entlang der Wasserstoffwertschöpfungskette Risikokapital nutzen, um ihre Investitionskosten zu decken. Dies gilt insbesondere für Start-ups und Unternehmen in der Frühphase, die möglicherweise Schwierigkeiten haben, traditionelle Finanzierungsmöglichkeiten zu erschließen. Durch die Zusammenarbeit mit Risikokapitalgebern können Unternehmen das benötigte Kapital erhalten, um ihre Wasserstoffprojekte zu realisieren, Infrastruktur aufzubauen, Anlagen zu erwerben und Technologien zu entwickeln. Wichtig zu beachten ist dabei, dass die Investoren, welche in Form von Venture-Capital-Firmen oder Private-Equity-Gesellschaften auftreten, das finanzielle Risiko

der Investition tragen. Im Gegenzug wird eine Rendite für die Investition erwartet. Somit ist dieser Pfad der Mobilisierung von Kapital in aller Regel auf rentable Konzepte beschränkt.

8.2 Wertschöpfung aus dem Energiemarkt

In diesem Kapitel werden die unterschiedlichen Stellschrauben, welche die Wirtschaftlichkeit einer Wasserstoff-Erzeugungsanlage allgemein beeinflussen, näher beleuchtet. Dafür werden unterschiedliche Strombezugsoptionen präsentiert, um eine kostenoptimierte und netzdienliche Betriebsweise (unterschiedliche Lastgradienten) von Elektrolyseuren zu erklären.

Neben den Investitionskosten (siehe Kapitel 4.3) und weiteren Betriebskosten ist die Betriebsweise des Elektrolyseurs und dem daraus resultierenden Strombedarf ein zentraler Faktor für die Wirtschaftlichkeit und Wettbewerbsfähigkeit der Wasserstoffproduktion. Um den Strombedarf kostenoptimiert zu decken, kommt es auf den Strompreis an - wenn der Strompreis niedrig ist, sind die Wasserstoffgestehungskosten in der Regel ebenfalls niedrig. Aus diesem Grund werden nachfolgend unterschiedliche Strombezugsoptionen vorgestellt, um eine kostenoptimierte Betriebsweise herzuleiten.

An dieser Stelle ist zu nennen, dass der Systemwirkungsgrad eines Elektrolyseurs unter Teillastbedingungen höher ist als unter Nominallastbedingungen. Das hängt von der spezifischen Auslegung, dem Betriebsmodus und den Betriebsparametern des Elektrolyseurs ab. Deshalb ist ein kontinuierlicher Betrieb bei Nennleistung nicht favorisiert.

Direktleitung

Wenn sich der Elektrolyseur und die Erneuerbare Energien Anlage (EE-Anlage) am selben Standort befinden und in der Hand eines Betreibers sind, besteht die Möglichkeit, den Strom direkt über eine Direktleitung zu beziehen. Diese Form der Stromversorgung ist durch zwei Besonderheiten gekennzeichnet, die zu niedrigeren Strom- und Wasserstoffgestehungskosten führen. Erstens ergeben sich die Stromkosten für den Elektrolyseur aus den direkten Stromgestehungskosten der EE-Anlage und sind somit unabhängig vom Marktwert. Zweitens entfallen durch die Nutzung einer Direktleitung und den Verzicht auf die Durchleitung durch das öffentliche Stromnetz die damit verbundenen netzentgeltgekoppelten Abgaben. Da Elektrolyseure gemäß §118 Abs. 6 S. 1 und 7 des Energiewirtschaftsgesetzes (EnWG) für 20

Jahre von Netzentgelten befreit und in der Regel gemäß § 9 des Stromsteuergesetzes (StromStG) von der Stromsteuer befreit sind, entstehen für sie keine weiteren Kosten.

In der Betriebsweise folgt der Elektrolyseur dem Erzeugungsprofil der EE-Anlage (Abbildung 63 Erzeugungsprofil eines Elektrolyseurs mit Strombezug per Direktleitung [106]), abgesehen von technischen Einschränkungen wie der minimalen Teillast. Die relative Größe von Elektrolyseur und EE-Anlage kann basierend auf der erwarteten Auslastung der EE-Anlage optimiert werden. Dadurch wird der grüne Strom optimal für die Erzeugung von Wasserstoff genutzt, und ein zusätzlicher Netzanschluss könnte entfallen oder lediglich für die Einspeisung überschüssigen Stroms dimensioniert werden. Die Stromgestehungskosten betragen (über die gesamte Lebensdauer der Anlagen) aus Windkraftanlagen mit Direktleitung etwa 7,40 ct / kWh⁵.

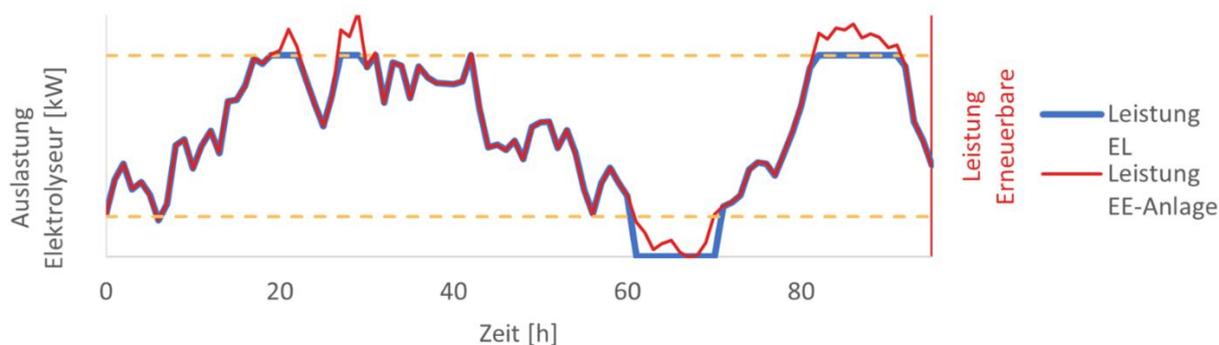


Abbildung 63 Erzeugungsprofil eines Elektrolyseurs mit Strombezug per Direktleitung [106]

Stromliefervertrag (PPA)

Sind keine eigenen EE-Anlagen vorhanden, können Elektrolyseurbetreibende ihren Strom mit Hilfe eines Stromliefervertrags (PPA) von einem reinen Grünstromproduzenten einkaufen. Der Abnehmer profitiert durch einen PPA von einem vorhersehbaren Strompreis und Strom aus erneuerbaren Quellen. Der Stromerzeuger profitiert von einer langfristigen Absicherung für den Verkauf des erzeugten Stroms, was die Finanzierung und Rentabilität des Projekts unterstützt. Somit wird Investitionssicherheit und Marktstabilität geschaffen. Die konkrete Aushandlung der Vertragsbedingungen erfolgt in einem Individualvertrag zum Zeitpunkt der finalen Investitionsentscheidung.

Wird der Strom genau dann genutzt, wenn die EE-Anlagen auch produzieren, spricht man von einem PPA „as produced“. Es ergeben sich zwei Unterschiede im Vergleich zum

⁵ Annahme: 1.800 € / kWh CAPEX, 25 Jahre Lebensdauer, 7 % Zinssatz und 45 € / (kW*a) OPEX

Betriebskonzept mit Direktleitung: Zum einen muss der Marktwert der erneuerbaren Energien als Strompreis angesetzt werden. Zum anderen wird der Strom durch das öffentliche Stromnetz transportiert. Entsprechend werden in diesem Fall netzentgeltgekoppelte Abgaben fällig.

Der Marktwert Erneuerbarer Energien ergibt sich aus den Großhandelspreisen an der Strombörse zu den Stunden, in denen die Erneuerbaren Energien entsprechende Strommengen einspeisen. Aus prognostizierten Strombezugskosten der European Energy Exchange AG [107] und den (aktuellen) netzentgeltgekoppelten Abgaben⁶ lassen sich folgende Strompreise für Elektrolyseure mit Stromliefervertrag aus EE-Anlagen „wie erzeugt“ (PPA as produced) abschätzen: 11,8 ct/kWh für 2025 und 10,2 ct/kWh für 2029.

Marktgetriebener Strombezug

Wird kein PPA abgeschlossen und der Netzstrom zu Großhandelspreisen bezogen, wird von einer marktpreisgetriebenen Fahrweise des Elektrolyseurs gesprochen. Für die verschiedenen Vollbenutzungsstunden (Wind, PV) des Elektrolyseurs (etwa 4.000 Stunden im Jahr) werden jeweils die Stunden mit den günstigsten Großhandelsstrompreisen betrachtet. Dies ermöglicht es, in den späten 2020er Jahren vergleichbare wirtschaftliche Ergebnisse zu erzielen wie bei der Stromerzeugung durch eigene Windkraftanlagen und Direktleitung.

Um Stromkosten zu minimieren, wird der Elektrolyseur in den Zeiten betrieben, in denen Strom günstig auf dem Strommarkt verfügbar ist. Bei hohen Strompreisen wird die Produktion ausgesetzt oder bei minimaler Teillast weitergeführt (Abbildung 64 Auslastungsprofil eines Elektrolyseurs mit marktpreisgetriebenen Strombezug [106]).

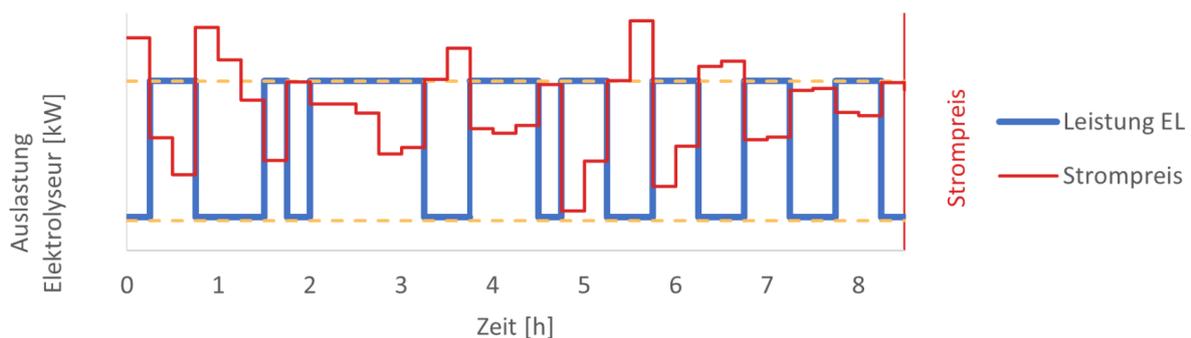


Abbildung 64 Auslastungsprofil eines Elektrolyseurs mit marktpreisgetriebenen Strombezug [106]

⁶ Annahme 1,475 ct/kWh [108].

Allerdings ist es fraglich, ob der stündliche Nachweis über den Strombezug erbracht werden kann, was ab 2030 für die Produktion von grünem bzw. erneuerbarem Wasserstoff laut des delegierten Rechtsaktes zur Definition von erneuerbarem Wasserstoff gemäß RED II erforderlich ist.

Zusätzliche Einnahmequellen

Ein weiterer Hebel zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit der Elektrolyseanlage ist zum einen das Anbieten von Regellast (Systemdienstleistung) und zum anderen die Nutzung von Koppelprodukten.

Um die Flexibilität im Stromnetz zu erhöhen, können Elektrolyseure in das Netz integriert werden, um eine stabile Stromversorgung sicherzustellen [109]. Insbesondere die Bereitstellung von Primär- oder Sekundärregelleistung (um kurz- oder langfristige Schwankungen im Stromnetz auszugleichen) bietet sich an. Dies wird erreicht, indem der Elektrolyseur zunächst bei einem bestimmten Arbeitspunkt konstant betrieben wird. Wenn die Netzfrequenz von der Regelfrequenz abweicht (Primärregelleistung) oder der Netzbetreiber dies anfordert (Sekundärregelleistung), wird die Leistung innerhalb von 30 Sekunden bzw. 5 Minuten für einen begrenzten Zeitraum in einem vorher festgelegten Bereich erhöht oder verringert. Sowohl symmetrische als auch positive und negative asymmetrische Regelleistung sind möglich, wobei der Arbeitspunkt entsprechend angepasst werden muss. Die Vergütung erfolgt über den Netzbetreiber und setzt sich aus einer Prämie für das reine Vorhalten der Regelleistung und im Fall der Sekundärregelleistung aus einem zusätzlichen Arbeitspreis für die tatsächlich erbrachte Arbeit zusammen [106].

Zusätzlich können je nach Standort und Auslegung des Elektrolyseurs Koppelprodukte der Elektrolyse – also Abwärme und Sauerstoff – ebenfalls genutzt und ggf. sogar vermarktet werden.

Um in Wasserstoffproduktion profitabel zu gestalten, ist es ratsam, neben einer optimierten Betriebsweise und des passenden Elektrolyseverfahrens alle möglichen Einnahmequellen zu berücksichtigen. Ein vielversprechendes Szenario wäre beispielsweise der Bezug von Strom sowohl aus einer direkt verbundenen EE-Anlage als auch aus dem Netz, während gleichzeitig Regelleistung angeboten wird. Dadurch können verschiedene Einkommensströme kombiniert werden, um die Rentabilität der Wasserstoffproduktion zu steigern.



8.3 Wertschöpfung aus Wasserstoff-Absatz

Nun folgt die spezifische Analyse der Wertschöpfung aus dem Wasserstoff-Absatz am Beispiel der Elektrolyseanlage in Mittweida / Erlau – es werden getroffene Annahmen (basierend auf Erfahrungswerten⁷) und eine Wirtschaftlichkeitsrechnung mithilfe des Kapitalwertes näher beleuchtet.

Wie bereits im Kapitel 7.3 (Wasserstoffinsel Mittweida / Erlau) beschrieben, wird die gesamte Wertschöpfungskette - von Produktion über Transport und Abnahme - regional umgesetzt. MSE plant aktuell den Bau eines 2 MW Elektrolyseurs mit Erweiterungspotenzial am Standort Erlau, um den Wasserstoff dem regionalen Verkehrssektor zur Verfügung zu stellen. Erste überschlägige Berechnungen zeigen, dass eine regionale Wertschöpfungskette unter bestimmten Bedingungen, wie z. B. Förderungen und gesicherte Abnahme, theoretisch darstellbar ist. Das bedeutet einerseits möglichst verbindliche Abnahmezusagen der kommunalen Flottenbetreiber in Richtung MSE, andererseits eine langfristige Festlegung des Preises sowie Absprachen zum Umgang mit Chancen und Risiken, die sich aus den zu erwartenden Schwankungen bei Strompreis, THG-Quotenpreis und Diesel-Preis ergeben.

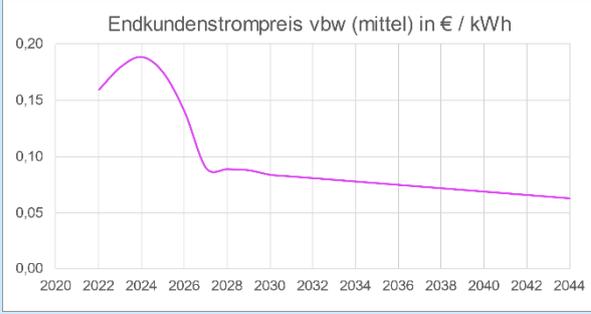
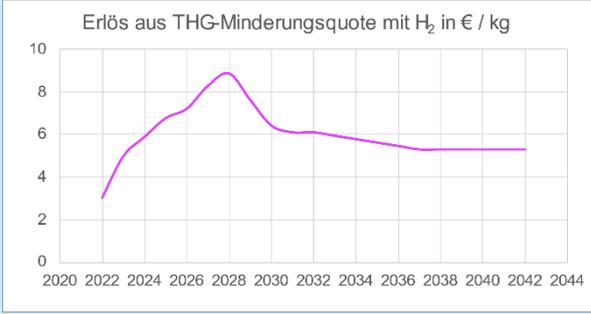
Tabelle 13 Annahmen Wirtschaftlichkeitsrechnung Insel Erlau / Mittweida

	Größe	Einheit	Wert
Elektrolyse	Investitionskosten	Mio. €	3,5 (2026); 2 (2031)
	Förderung	%	45
	Strombedarf	kWh / kg	55
	Installierte Leistung	MW	3 (2026)
	Vollbenutzungsstunden	h /a	Max. 4.000
	Stromkosten	ct	11
	Wartungskosten, Personal	%	3 % der CapEx
	H ₂ Bezugspreis an Tankstelle	€ / kg	10 (netto) ⁸

⁷ Es liegen keine tagesaktuellen Angebotspreise vor

⁸ Werte festgelegt bis 2030, danach dynamisiert (3%)



Tankstelle	Investitionskosten ⁹	Mio. €	3,6 ¹⁰
	Förderung	%	50
	Strombedarf	kWh / kg	5,0
	Stromkosten	€ / kWh	 <p>Abbildung 65 Übersicht Stromkosten Tankstelle</p>
	Wartungskosten, Personal		4 % der CapEx
	Erlös durch THG-Minderung	€ / kg	 <p>Abbildung 66 Erlös durch THG Minderung (eigene Annahmen)</p>
	H ₂ Verkaufspreis	€ / kg	6,72 (netto) ¹¹
	Auswertung	Abschreibungszeitraum	a
Fremdkapital Zins		%	6,5

⁹ Inklusive der Kosten für Engineering, Procurement, Construction (20% der CapEx)

¹⁰ Annahme: Trailer-Konzept mit 350 und 700 bar Tankoption, back-to-back fähig

¹¹ Werte festgelegt bis 2030, danach dynamisiert (3%)

Wirtschaftlichkeit

Es wurden erste Modellrechnung angestellt, welche zeigen, dass es grundsätzlich möglich ist, eine für alle Teilnehmer wirtschaftlich vorteilhafte Wertschöpfungskette von der Erzeugung bis zur Nutzung aufzubauen. In der Abbildung 67 und der Abbildung 68 ist die Entwicklung des Kapitalwerts einzeln für die Elektrolyse und für die Tankstelle dargestellt.

Grundlage für die Kapitalwertbetrachtung ist das Discounted Cashflow Modell. Um den Kapitalwert zu berechnen, werden zunächst die erwarteten zukünftigen Cashflows ermittelt, die ein Investment generieren soll. Diese Cashflows können aus erwarteten Einnahmen und Ausgaben bestehen. Anschließend werden diese zukünftigen Cashflows auf ihren Barwert abgezinst, um den aktuellen Wert zu ermitteln.



Abbildung 67 Kapitalwertberechnung Elektrolyse

Es lässt sich erkennen, dass sich die Investitionen mit den getroffenen Annahmen nach ca. 16 Jahren amortisiert haben. Grundlage für diese Auslegung ist die Planungssicherheit und verbindliche Abnahme (Verkauf) des produzierten Wasserstoffs.

Auch für die Tankstelle lässt sich die Wirtschaftlichkeit darstellen. Die Amortisation der Investition wird nach rund 16 Jahren erreicht. Ein wichtiger Einflussfaktor für die Wirtschaftlichkeitsrechnung ist die Berücksichtigung des Erlöses durch die THG-Emissionsminderung. Dabei wurde in diesem Beispiel ein optimistisches Szenario des THG-Quotenpreises angenommen (siehe Tabelle 13).

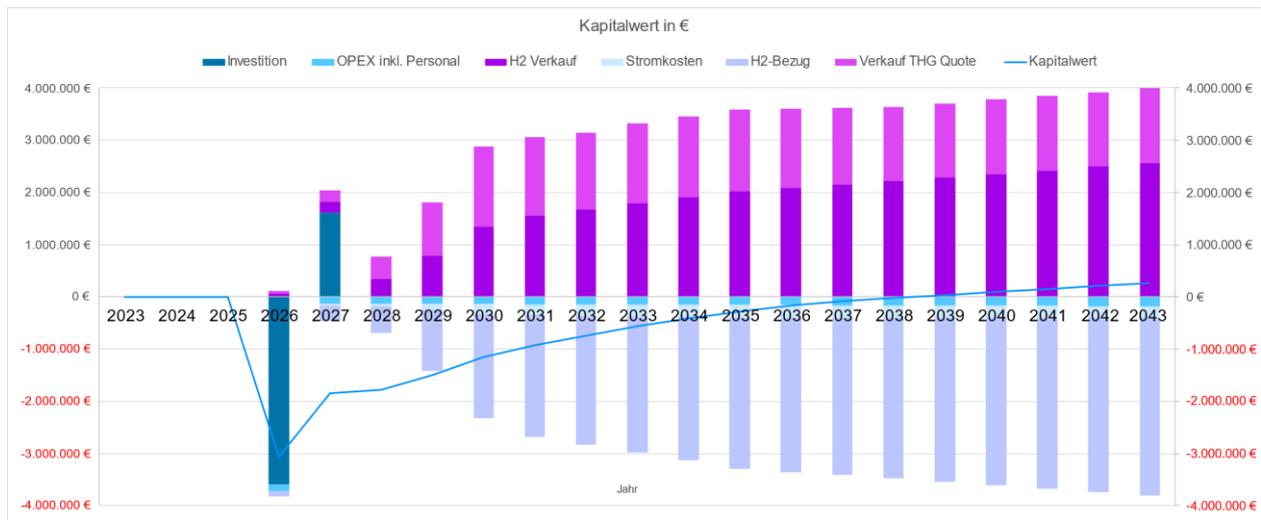


Abbildung 68 Kapitalwertberechnung Tankstelle

Fazit

Es konnte dargelegt werden, dass die gesamte Wertschöpfungskette wirtschaftlich interessant für die Hauptakteure und für die Investoren ist. Damit werden nicht nur erhebliche CO₂-Emissionen vermieden, aber auch die kommunalen Flotten und regional eingesetzte Landwirtschaftsfahrzeuge zukunftsgerecht aufgestellt werden. Um das Abnahmeausfallrisiko zu minimieren, können auch Akteure der Logistik-Branche (Friweika eG) oder Fahrgastschiffe der Talsperre Kriebstein mitgedacht werden, welche alternative oder weitere Ankerkunden für die Elektrolyseanlage in Mittweida darstellen.

8.4 Umweltbilanz

Im Folgenden werden aktuelle Beispiele für Zertifizierungen von grünem Wasserstoff, sowie deren Anforderungen und eine Übersicht von CO₂-Emissionsfaktoren aus verschiedenen Quellen dargestellt. Hinsichtlich der Zertifizierungen ist zu beachten, dass diese teilw. die spezifischen Anforderungen an Wasserstoff für die Mobilität, die sich aus der RED II / 37. BImSchV (Details siehe Abschnitt 4.8) ergeben werden, noch nicht vollumfänglich berücksichtigen.

8.4.1 Zertifizierung für grünen und klimaneutralen Wasserstoff

Die Zertifizierung von Wasserstoff schafft Transparenz auf dem Markt: Abnehmer können zum Erreichen ihrer Klimaschutzziele auf Wasserstoff aus klimaneutraler oder emissionsarmer Produktion setzen und sind durch die Prüfung des Zertifikatgebers abgesichert, dass die Produktion den definierten Kriterien entspricht.

In Deutschland bieten bisher der TÜV Süd und der TÜV Rheinland Zertifizierungen für Wasserstoff an.

Der TÜV Süd zertifiziert mit dem Standard „CMS 70“ die „Erzeugung von Grünem Wasserstoff (GreenHydrogen)“ [110]. Als Energiequelle für die Produktion kann sowohl Strom aus erneuerbarer Energie als auch Biogas/Biomethan oder Biomasse eingesetzt werden.

Der TÜV Rheinland zertifiziert mit dem Standard „H2.21 Renewable and Low-Carbon Hydrogen Fuels“ ebenfalls die Erzeugung von Wasserstoff mit erneuerbaren Energien als „Green Hydrogen“ oder auch „Renewable Hydrogen“. Darüber hinaus kann auch Wasserstoff, der mit nicht-erneuerbarer Energie hergestellt wurde, als „Low Carbon Hydrogen“ zertifiziert werden, wenn die bei der Herstellung anfallenden CO₂-Emissionen abgeschieden und gespeichert oder weiter genutzt werden (CCS/CCU-Technologien). Außerdem lässt der Standard auch eine Deklaration als „Carbon Neutral Hydrogen“ zu, wenn CO₂-Emissionen durch den Erwerb von Zertifikaten kompensiert werden.

8.4.2 Anforderungen für die Zertifizierung

Beide Standards für grünen Wasserstoff erfordern in Anlehnung an die RED II, dass gegenüber dem Referenzwert für fossile Brennstoffe von 94 g CO₂-Äq./MJ eine Minderung des THG-Potenzials um 70 % erreicht wird [111]. Der zertifizierte Wasserstoff darf somit einen Emissionsfaktor von maximal 28,2 g CO₂-Äq./MJ aufweisen. Soll der Wasserstoff zur Produktion von Dampf, Wärme oder Kälte genutzt werden, bezieht sich das Reduzierungsziel von 70 % auf den Vergleichswert von 80 g CO₂-Äq./MJ und ergibt somit 24 g CO₂-Äq./MJ als maximalen Emissionsfaktor.

Die Berechnung der THG-Emissionen durch die Wasserstoffproduktion soll in beiden Standards nach den Normen ISO 14067 oder ISO 14040/14044 erfolgen.



Abbildung 69: Muster für das Prüfzeichen des TÜV SÜD Standard CMS 70 [110]

Der Standard CMS 70 gibt darüber hinaus detaillierte Anforderungen an die Ermittlung der Treibhausgasbilanz und der Erzeugungsmengen, für welches ein Monitoring eingerichtet sein muss. So müssen:

- „Die Strommessgeräte und Erdgasmessgeräte geeicht und entsprechend der nationalen Regelungen kalibriert werden;
- die Messgeräte für Wasserstoff und andere relevante Stoffströme geeignet und überwacht sein und regelmäßig kalibriert werden;
- die Berechnungen nachvollziehbar und konservativ sein;
- die Datenerhebung und das Datenmanagement im Sinne der ISO 14040/14044 - Ökobilanzierung erfolgen, soweit nicht gesetzlich anders geregelt und
- das Monitoring und dessen Auswertung durchgängig genau und plausibel sein.“ [110, 112]

Der Standard gibt vor, wie die Systemgrenzen bei der Bilanzierung anzusetzen sind. In den Systemgrenzen enthalten sind:

- „die Produktionsanlage inkl. Nebenaggregate wie Wasseraufbereitung, Energiebereitstellung vor Ort, Wasserstoffreinigung, bis zur Abfüll- /Wägestelle bzw. Einspeisung in ein Gasnetz oder Übergabestelle bei der Pipeline,
- die Aufbereitung, Speicherung, Verdichtung/Verflüssigung und sonstige Verarbeitungsschritte bis zur Auslieferung des Wasserstoffs am Werkstor bzw. Einspeisung in ein Wasserstoffnetz bzw. Erdgasnetz“ [110]
- alle Produktionsstufen, die erforderlich sind, um eine Wasserstoffreinheit von mindestens 99,9 Vol.% und einen Überdruck von mindestens 3 MPa zu erreichen (Wird bei geringerem Druck eine Nachverdichtung benötigt, muss der zusätzliche Energieverbrauch für Verdichtung hinzugefügt werden).

Bei der Berechnung bleibt hingegen unberücksichtigt:

- „der Bau der Wasserstofferzeugungsanlage sowie der zugehörigen Anlagenteile/Nebeneinrichtungen,
- der Transport und Lieferung des Wasserstoffs zu den Verbrauchern,
- die Verwaltung und Gebäudebewirtschaftung
- die Verwendung/Verbrennung des Wasserstoffs“ [110].

Zertifiziert wird die tatsächlich vermarktbare Erzeugungsmenge. Diese ergibt sich aus dem erzeugten Wasserstoff abzüglich etwaiger Verluste bei Aufbereitung, Lagerung und Transport. Der Bilanzzeitraum beträgt max. 12 Monate.

Beim Einsatz von erneuerbarem Strom wird ein Herkunftsnachweis benötigt, beim Einsatz von Biogas/-methan und sonstiger Biomasse muss eine Nachhaltigkeits-Zertifizierung im Sinne der RED II nachgewiesen werden.

Der TÜV Rheinland-Standard „H2.21 Carbon-Neutral Hydrogen“ [113] weist im Wesentlichen die gleichen Anforderungen wie der CMS 70 Standard auf, jedoch können damit auch blauer, türkiser und pinker Wasserstoff zertifiziert werden. Es ist erlaubt, Zertifikate-Handel zu betreiben, um grünen Wasserstoff herzustellen.

Detaillierte Anforderungen und Berechnungsgrundlagen finden sich unter [110, 113].

Des Weiteren entwickelt die EU unter dem Namen „CertifHy“ ein EU-weites Programm zur Zertifizierung von erneuerbarem Wasserstoff und zum Handel mit Zertifikaten unabhängig vom tatsächlichen Energiefluss [114].

8.4.3 Übersicht Emissionsfaktoren

Folgende mögliche Quellen für rechtssichere Definitionen bzgl. CO₂-Emissionsfaktoren für die Wasserstoffgestehung wurden in Betracht gezogen und überprüft:

- Klimaschutzgesetz [115]
- 37. BImSchV [116]
- 38. BImSchV [117]
- Renewable Energy Directive II – RED II [111]
- Normen zur Berechnung und Erfassung von THG-Emissionen [118], [119]
- TÜV-Zertifizierung [110], [113]

Die Quellen enthalten keine konkrete Definition bzgl. CO₂-Emissionsfaktoren für die Wasserstoffgestehung, lediglich Referenz-/Vergleichswerte oder grundlegende Methoden zur Bilanzierung von THG-Emissionen. Die Referenz- oder Grenzwerte der Emissionsfaktoren, die für die Produktion von Wasserstoff als relevant anzusehen sind, sind inkl. einiger Vergleichswerte für fossile Gase / Brennstoffe zur Einordnung in nachfolgender Tabelle 14 gegenübergestellt.

Tabelle 14 Übersicht THG-Emissionsfaktoren

Quelle	Beschreibung	Treibhausgas-Emissionen (in kg CO ₂ -Äq. pro GJ)
37. BImSchV	Komprimierter Wasserstoff in einer Brennstoffzelle (vollständig durch nicht-biogene erneuerbare Energien gespeisten Elektrolyse)	9,1
38. BImSchV	Fossiler Referenzwert für komprimiertes Erdgas (CNG) (EU-Mix)	69,3
RED II	Vergleichswert für fossile Brennstoffe als Kraftstoff	94
RED II	Vergleichswert für fossile Brennstoffe zur Dampf-/Wärme oder Kälteproduktion	80
TÜV SÜD Standard CMS 70 / TÜV Rheinland Standard H2.21 / RED II	Grenzwert für Wasserstoff bei Nutzung als Kraftstoff	28,2
TÜV SÜD Standard CMS 70 / RED II	Grenzwert für Wasserstoff bei Nutzung für Dampf-/Wärme oder Kälteproduktion	24

8.5 Einfluss einer Wasserstoffwirtschaft auf den Arbeitsmarkt

Als ein wichtiger Faktor für die Etablierung einer lokalen Wasserstoffwirtschaft sind auch die Auswirkungen dieser auf den Arbeitsmarkt zu betrachten. Dabei können durch den Einsatz neuer Technologien sowohl neue Arbeitsplätze entstehen, durch die Umstellung jedoch auch bisherige Arbeitsplätze entfallen. In diesem Kapitel soll eine qualitative Aussicht auf mögliche Entwicklungen gegeben werden, die Potenziale für die Region aufzeigt. Zunächst werden die besonderen Voraussetzungen in der Region geprüft, die für eine Wasserstoffwertschöpfung relevant sind. Im Folgenden wird ein vertiefter Blick auf die Automobilzulieferindustrie in Sachsen gelegt.

8.5.1 Potenzial der Wasserstoffwertschöpfung in der Region

Die Region Chemnitz, Heimat für etwa 1,5 Millionen Einwohner, hat seit dem 18. und 19. Jahrhundert eine herausragende Rolle als Ursprung der sächsischen Industrie gespielt. In dieser Region entwickeln und produzieren Automobilhersteller, Zulieferunternehmen, Maschinen- und Anlagenbauer Produkte, Verfahren und Dienstleistungen für den globalen



Markt. Besonders hervorzuheben ist der Standort des nationalen Innovations- und Technologiezentrums für Wasserstofftechnologien (ITZ). Die Region Chemnitz ist ein bedeutender Forschungsstandort im Bereich der Brennstoffzellenantriebe und eine der bedeutendsten H₂-Technologieregionen in Deutschland.

Gegenwärtig erlebt die Region einen Strukturwandel, der insbesondere den Automobilbau und die Zulieferindustrie betrifft. In diesem Zusammenhang steht die wichtige Aufgabe, etwa 25.000 Arbeitsplätze zu sichern und die Region erfolgreich in die Zukunft zu führen.

Saubere Energieerzeugung und Energiespeicherung sind einer der Megatrends unserer Zeit. Teil davon sind die Wasserstofftechnologien, die sich in den kommenden Jahren stark entwickeln werden. Dabei spielt die Wasserstoffwirtschaft eine entscheidende Rolle für den Arbeitsmarkt und bietet zahlreiche Beschäftigungsmöglichkeiten. Der Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur erfordert Fachkräfte in verschiedenen Bereichen wie Ingenieurwesen, Maschinenbau, Elektrotechnik und Chemie. Die Produktion von Wasserstoff erfordert spezialisiertes Know-how in den Bereichen Elektrolyse, Speicherung und weiteren Wasserstofftechnologien. Somit entstehen Arbeitsplätze entlang der gesamten Wertschöpfungskette, einschließlich der Bereiche Produktion, Speicherung, Transport, Verteilung und Anwendung von Wasserstoff. Darüber hinaus werden auch indirekte Arbeitsplätze in verwandten Branchen wie dem Bauwesen, der Automobilindustrie und der Energieversorgung geschaffen. Die Wasserstoffwirtschaft bietet somit die Möglichkeit, neue Arbeitsplätze zu schaffen, die Wettbewerbsfähigkeit zu steigern und das wirtschaftliche Wachstum zu fördern.

Es gilt diese Potenziale in der Region zu erschließen, um positive Effekte für den Arbeitsmarkt zu erreichen. Dabei muss wie eingangs dargelegt die gesamte Wertschöpfungskette berücksichtigt werden. Übergeordnet sind die in dieser Studie betrachteten Teilbereiche von der Erzeugung, über die Speicherung und Verteilung, sowie letztlich die Anwendung des Wasserstoffs relevant. Dabei können verschiedene Ebenen in der Wertschöpfung betrachtet werden. Denn neben dem fertigen Produkt, wie beispielsweise einer Elektrolyseanlage, ist auch die Produktion und Entwicklung von Teilsystemen sowie die Bereitstellung der Einzelkomponenten von großer Bedeutung.

In der Potenzialstudie „Wertschöpfungspotenziale von Wasserstoff für Sachsen“ konnte bereits 2021 gezeigt werden, dass der H₂-Markt hohe Arbeitsplatz- und Umsatzpotenziale, v.a. für Zulieferunternehmen für Komponenten und Baugruppen birgt. Die folgende Darstellung (Abbildung 70) gibt einen Überblick zur Produktwertschöpfungskette entlang derer sich Potenziale für die Region ergeben.

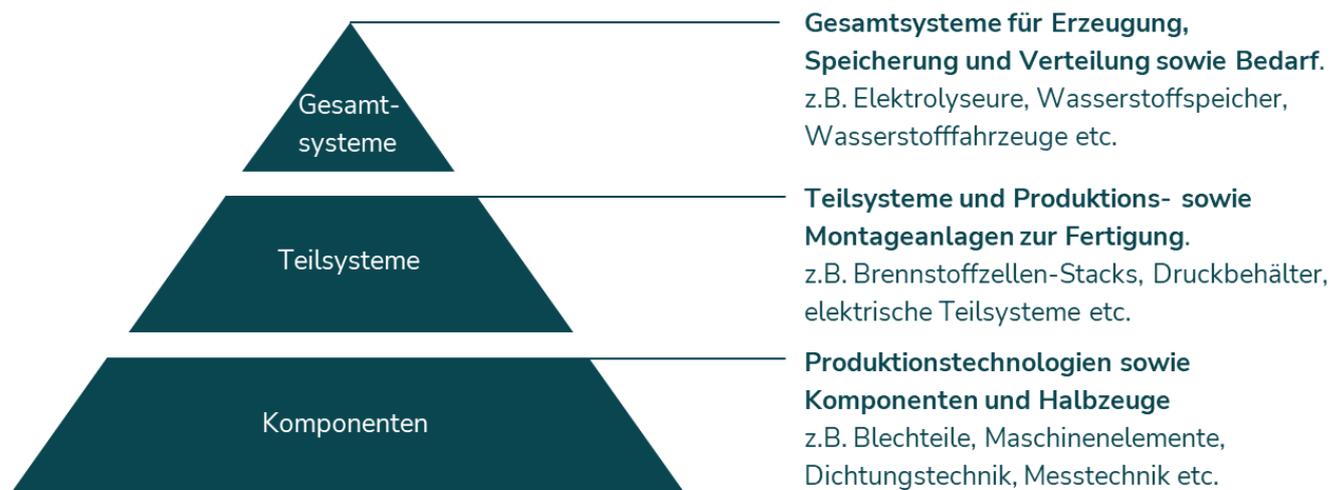


Abbildung 70: Produktwertschöpfung im Bereich Wasserstoff

Basis in der Produktwertschöpfung bietet die Ebene der Komponenten. In diese gliedern sich sowohl Einzelkomponenten und Halbzeuge als auch grundlegende Produktionstechnologien ein. Hier bieten sich in der Region große Potenziale da die notwendigen Kompetenzen und Produktionskapazitäten vorhanden sind. Hierbei ist es von Vorteil, dass die Komponenten in einem breiteren Technologiebereich eingesetzt werden können als beispielsweise Gesamtsysteme, was zu einer Reduzierung des unternehmerischen Risikos beitragen kann [120].

Darüber angegliedert ist die Ebene der Teilsysteme und zuletzt die Integration zum Gesamtsystem. Auf diesen Ebenen steigt der Bedarf nach einer konkreten Unternehmensstrategie, da hier eine stärkere Ausrichtung auf Wasserstofftechnologien notwendig ist als im Bereich der Komponenten. Dies ist insbesondere wichtig, da fehlende Systemkompetenzen hier zunächst einen umfangreichen Wissensaufbau erfordern. Dabei ist eine rechtzeitige strategische Entscheidung essenziell, um auf einen möglichen Umstieg der Wertschöpfung vorbereitet zu sein. Aktuell ist dies als starke Barriere für den Einstieg im Bereich der Teil- und Gesamtsysteme zu verstehen mit welcher sich kritisch auseinandergesetzt werden muss. Hier kann vor allem durch Aufklärungsarbeit zu einem Abbau von Vorbehalten beigetragen werden. Dies ist zwingend notwendig, um auch sehr spezialisierten Unternehmen eine Perspektive geben zu können. Darauf sollte ein hohes Augenmerk gelegt werden, da durch den Technologiewandel beispielsweise in der Automobilindustrie gewisse Sparten in Zukunft wegfallen können [120].

Daneben existieren weitere Risiken, die einem Einstieg in die Wertschöpfung von Wasserstofftechnologie entgegenstehen können. Dies bezieht sich vor allem auf die Finanzierung geplanter Vorhaben. Hier können sich für die durch kleine und mittlere



Unternehmen geprägte Industrielandschaft Herausforderungen ergeben. Zwar können diese schneller auf Änderungen reagieren als die großen Konzerne, gleichzeitig fehlen allerdings die Mittel in großem Maßstab in Forschung und Entwicklung zu finanzieren. Wie Möglichkeiten zur Behandlung von Finanzierungslücken wird in Kapitel 8.1 Mobilisierung von Kapital erläutert.

Ein weiteres Risiko geht von der Unsicherheit bezüglich der zukünftigen Entwicklung des Energiepreises aus. Da diese einen immensen Einfluss auf die Produktionskosten haben, muss hier für die richtigen Rahmenbedingungen gesorgt werden, um eine wirtschaftliche Produktion in der Region gewährleisten zu können. Je nach prognostiziertem Pfad des Energiepreises sind hier vor allem für energieintensive Produktionen die Geschäftsmodelle zu prüfen.

Wenn diese Risiken minimiert werden können, gibt es in der Region eine Vielzahl von Unternehmen, die in der Wertschöpfung für Wasserstofftechnologien aktiv werden können. Im Rahmen der Potenzialstudie „Wertschöpfungspotenziale von Wasserstoff für Sachsen“ wurden dazu potenzielle oder bereits aktive Akteure identifiziert. Dabei ist eine Aufteilung in verschiedene Bereiche der oben gezeigten Produktwertschöpfung – Gesamtsysteme, Teilsysteme und Aggregate sowie Komponenten berücksichtigt. Ergänzt wird dies um weitere unterstützende Teilbereiche wie etwa Forschungseinrichtungen, Netzwerke und weitere.

Eine Übersicht wird in Abbildung 71 gegeben. Bei Betrachtung der Produktwertschöpfung fällt auf, dass der Fokus aktuell eindeutig auf der Komponentenfertigung liegt. Bereits die Wertschöpfung der Teilsysteme bleibt aufgrund des höheren notwendigen Spezialisierungsgrades deutlich dahinter zurück. Akteure mit Gesamtsystemkompetenz sind demnach bisher nur im Landkreis Mittelsachsen und in Chemnitz vertreten. Zukünftige Entwicklungen in der Wasserstoffwirtschaft können hier jedoch neue Chancen eröffnen, deren Ergreifung einen wesentlichen Faktor für den Arbeitsmarkt in der Region spielen kann [120].

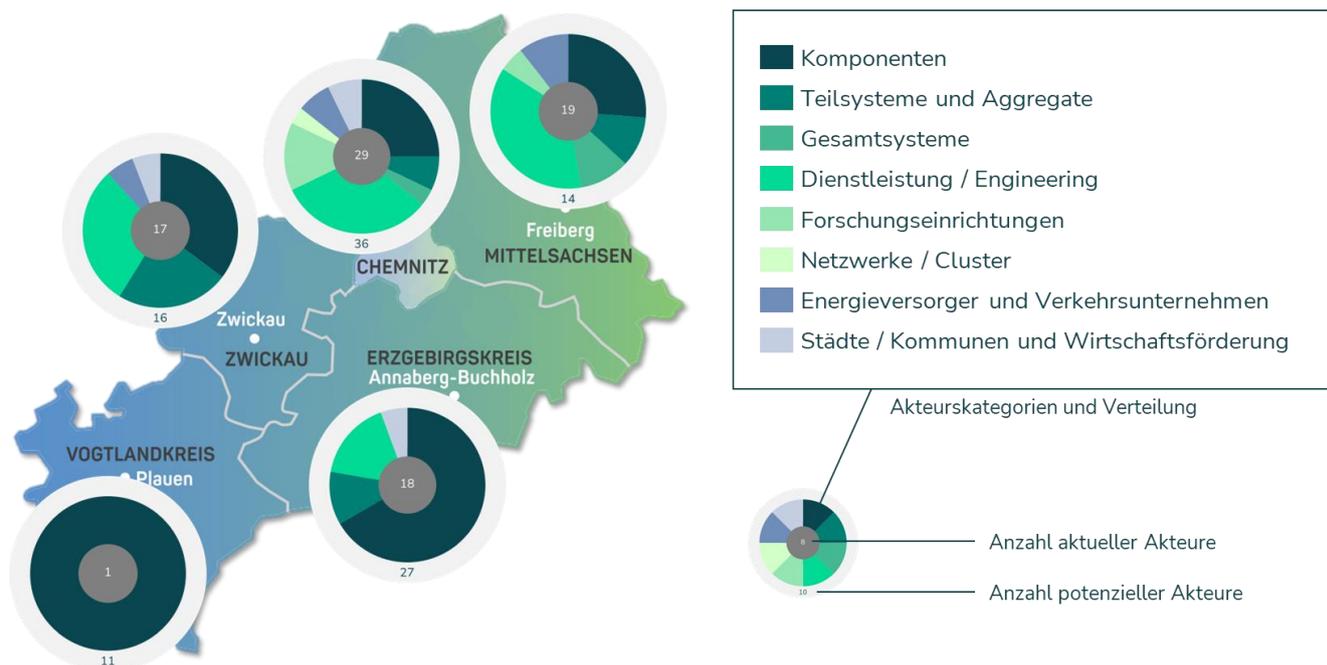


Abbildung 71: Akteurslandschaft Sachsens im Bereich der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (Mehrfachnennungen möglich) [120]

8.5.2 Transformationsprozess in der sächsischen Automobilzulieferindustrie

Ausgehend von der gesamtheitlichen Betrachtung im vorherigen Abschnitt, soll in diesem Kapitel eine nähere Betrachtung des Transformationspotenzials in der Automobilzulieferindustrie erfolgen. Die Automobilzulieferindustrie stellt einen wichtigen Wirtschaftszweig in der Region dar, in dem aufgrund der Entwicklungen im Bereich der Mobilität zukünftige Veränderungen abzusehen sind. Um den Wirtschaftsstandort zu stärken, ist es daher wichtig die Potenziale für einen Umstieg der Wertschöpfung zu berücksichtigen, um frühzeitig Maßnahmen einleiten zu können. Diese sind notwendig um positive Effekte für den Arbeitsmarkt nutzen, und den Wegfall von Arbeitsplätzen vermeiden zu können.

Zur Ableitung eines Transformationspotenzials für die Automobilzulieferindustrie soll das in Abbildung 72 gezeigte Vorgehensmodell herangezogen werden. Ausgehend von einem umfassenden Industrieüberblick über die Automobilzulieferer in der Region in Schritt 1 wird von einer hohen Flugebene zu einer tieferen Analyse vorgegangen. Im zweiten Schritt erfolgt die Definition von wichtigen Bewertungsparametern, anhand derer eine Einordnung des Transformationspotenzials vorgenommen werden kann. Anschließend erfolgt die Bildung von vier Clustern die gesamtheitlich hinsichtlich des Transformationspotenzials bewertet werden. Der vierte Schritt ist als Empfehlung für ein methodisches Vorgehen zu verstehen, das im

Rahmen dieser Studie nicht betrachtet wurde. Dieses könnte in einer vertiefenden Betrachtung durchgeführt werden, um Unternehmensspezifische Empfehlungen für die Transformation abgeben zu können. In einem finalen Schritt erfolgt in dieser Betrachtung somit eine übergeordnete Ableitung des Transformationspotenzials für die definierten Cluster.

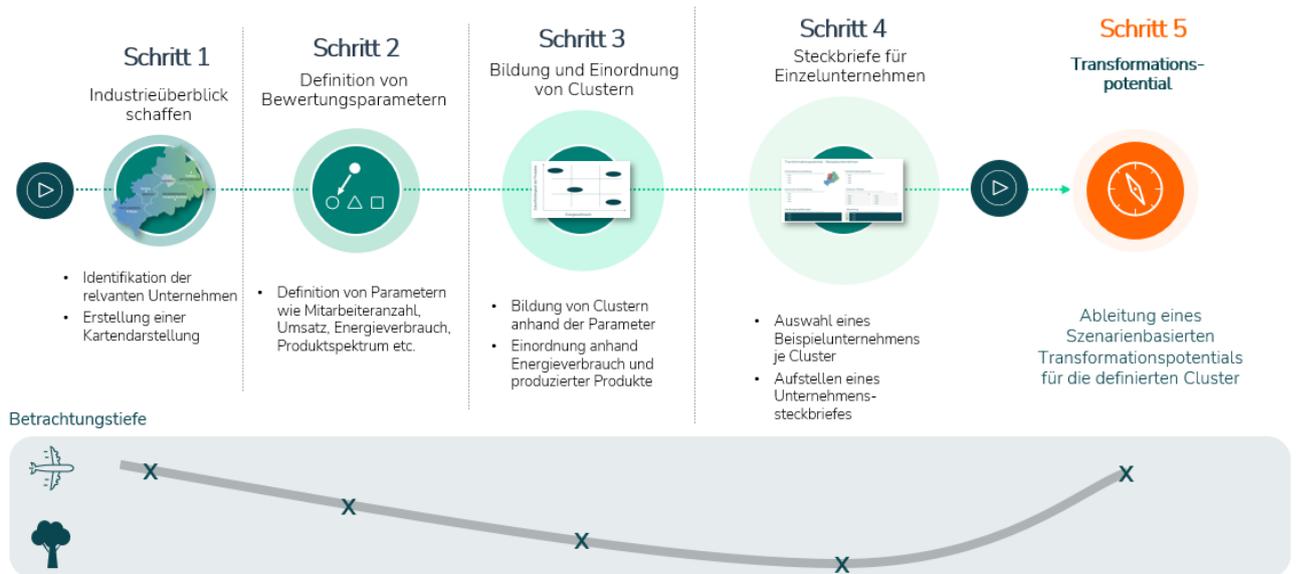


Abbildung 72: Vorgehensmodell für die Ableitung eines Transformationspotenzials in der Automobilzulieferindustrie

Im ersten Schritt soll zunächst ein Überblick über die Automobilindustrie in der Region gegeben werden. Bei der reinen Betrachtung der Automobilzulieferindustrie lässt sich eine Vielzahl an Unternehmen identifizieren. Für Sachsen gesamtheitlich betrachtet sind dies 814 Unternehmen. Dies zeigt im ersten Schritt die enorme Stärke der Automobilzulieferindustrie in der Region. In einem nächsten Schritt lässt sich die Anzahl der Unternehmen im Bereich der Automobilzulieferindustrie auf die einzelnen Landkreise herunterbrechen. Dabei ergibt sich die im Folgenden in Tabelle 15 dargestellte Verteilung [121].

Tabelle 15: Übersicht der Anzahl der Unternehmen in der Automobilzulieferindustrie in der Region [121]

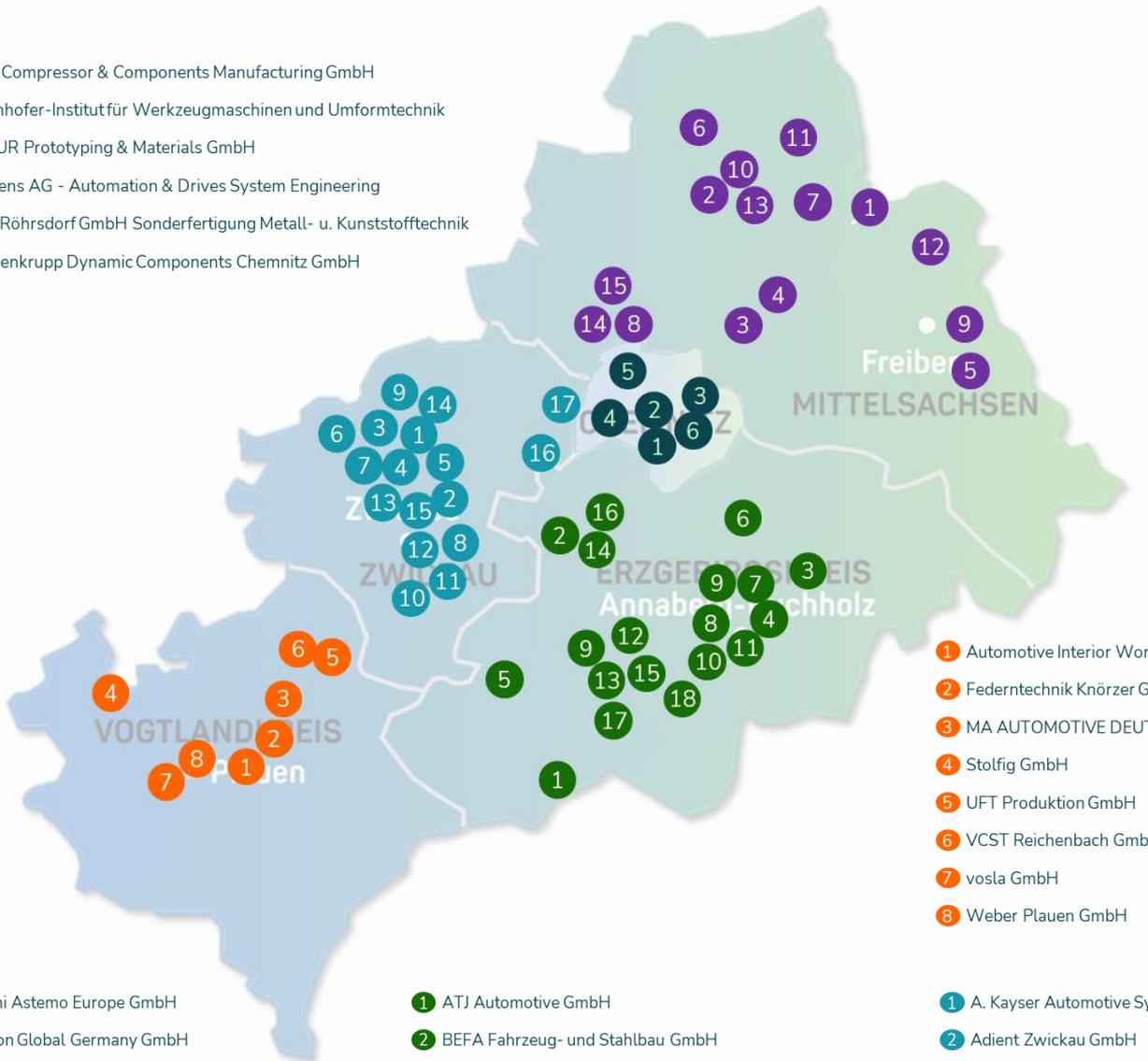
Landkreis	Chemnitz	Mittelsachsen	Erzgebirgskreis	Zwickau	Vogtlandkreis
Anzahl Unternehmen	100	88	94	97	59

Dies verdeutlicht noch einmal die Relevanz der Automobilzulieferindustrie in den einzelnen Regionen. Dabei wird ein umfänglicher Teil der Produktwertschöpfung in der Automobilindustrie



abgedeckt. Vorrangig im Bereich der Komponenten und Teilsysteme sind die Kompetenzen verteilt. Die gesamtsystemebene wird häufig von den OEMs bedient. Für die Kartendarstellung können nicht alle hier aufgeführten Unternehmen berücksichtigt werden. Daher erfolgt eine Einschränkung auf den Wirtschaftszweig WZ29 Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenteilen und Unternehmen mit mehr als 10 Beschäftigten. Eine Übersicht erfolgt in Abbildung 73 [121].

- 1 CCM Compressor & Components Manufacturing GmbH
- 2 Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik
- 3 ROBUR Prototyping & Materials GmbH
- 4 Siemens AG - Automation & Drives System Engineering
- 5 SMK Röhrsdorf GmbH Sonderfertigung Metall- u. Kunststofftechnik
- 6 thyssenkrupp Dynamic Components Chemnitz GmbH



- 1 Automotive Interior World GmbH & Co. KG
- 2 Federntechnik Knörzer GmbH - NL Plauen
- 3 MA AUTOMOTIVE DEUTSCHLAND GmbH
- 4 Stolfig GmbH
- 5 UFT Produktion GmbH
- 6 VCST Reichenbach GmbH
- 7 vosla GmbH
- 8 Weber Plauen GmbH

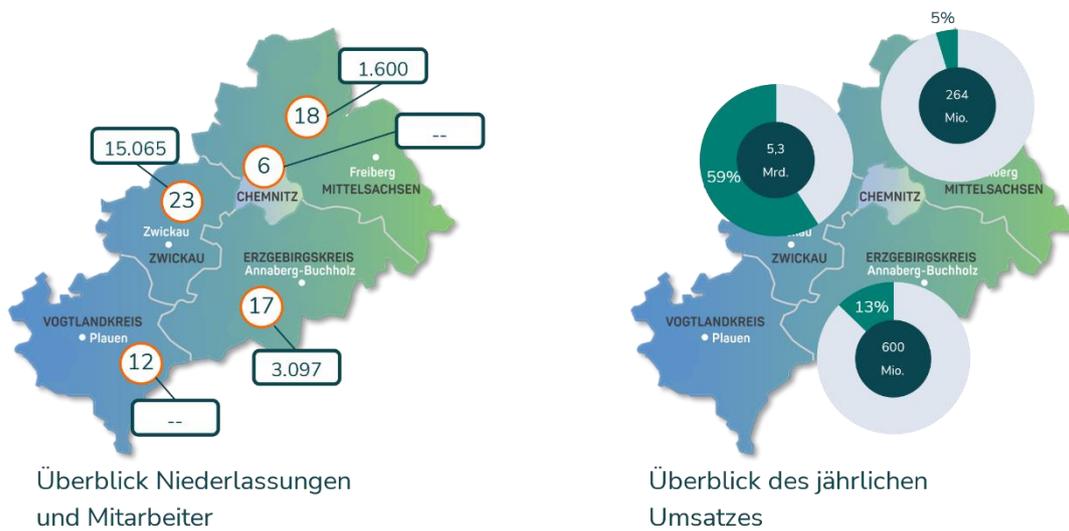
- 1 Hitachi Astemo Europe GmbH
- 2 Horizon Global Germany GmbH
- 3 Hunger Automotive
- 4 Innomotive Systems Hainichen GmbH
- 5 Joyson Safety Systems Sachsen GmbH
- 6 Konnerth Präzisionsteile GmbH
- 7 Kunath Fahrzeugbau GmbH
- 8 Limbacher Bremsbelag GmbH
- 9 MAHLE Industrial Thermal Systems GmbH & Co. KG
- 10 Pierburg Pump Technology GmbH
- 11 RKB Karosseriewerk GmbH
- 12 UKM technologies GmbH +UKM Umformtechnik GmbH
- 13 Walther - Nutzfahrzeugbau GmbH
- 14 Willig Fahrzeugbau GmbH
- 15 Ziegler Feuerwehrgeretetechnik GmbH & Co. KG

- 1 ATJ Automotive GmbH
- 2 BEFA Fahrzeug- und Stahlbau GmbH
- 3 Bruno Wagner & Söhne Metallwarenfabrik GmbH
- 4 Doll Sachsen GmbH
- 5 Eisenwerk Erzgebirge 1566 GmbH
- 6 EMES Kabelbaum Konfektions GmbH
- 7 Filtrak Brandt GmbH
- 8 Frauenthal Automotive Elterlein GmbH
- 9 IDT Industrie- und Dichtungstechnik Werk Kupferring GmbH
- 10 Joyson Safety Systems Sachsen GmbH
- 11 M & M Exhaust GmbH
- 12 Meleghy Automotive Bernsbach GmbH
- 13 Porsche Werkzeugbau GmbH
- 14 RUF Fahrzeugbau GmbH
- 15 RUPF SPW Technologies GmbH
- 16 SODECIA Powertrain Oelsnitz GmbH
- 17 Steeger GmbH
- 18 Vollmann (Sachsen) GmbH & Co. KG

- 1 A. Kayser Automotive Systems GmbH & Co.KG
- 2 Adient Zwickau GmbH
- 3 Brose Fahrzeugteile GmbH & Co.
- 4 GKN Driveline Deutschland GmbH
- 5 GRAMMER System GmbH
- 6 Grupo Antolin-Logistik Deutschland GmbH
- 7 HBPO Germany GmbH
- 8 IndiKar Individual Karosseriebau GmbH
- 9 Magna Exteriors GmbH
- 10 MAHLE Behr Kirchberg GmbH
- 11 PM Automotive GmbH
- 12 PROTOMASTER GmbH
- 13 REHAU AG + Co
- 14 Schnellecke Logistics Sachsen GmbH
- 15 Tenneco Zwickau GmbH
- 16 thyssenkrupp System Engineering GmbH
- 17 Vitesco Technologies GmbH

Abbildung 73: Automobilzulieferindustrie in der Region (Unternehmen aus WZ29, Mitarbeiteranzahl > 10)

In einem weiteren Schritt kann über den Branchenreport der Industrie im Freistaat Sachsen, der vom statistischen Landesamt veröffentlicht wird, eine Indikation zur Wirtschaftsleistung und der Anzahl der Beschäftigten in der Region abgeleitet werden. Dabei ist zu beachten, dass die Daten nicht für jede Region vollumfänglich verfügbar sind. Weiterhin gilt hier auch die bereits genutzte Einschränkung auf den Wirtschaftszweig WZ29 Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenteilen und in diesem Fall aufgrund der Datenlage Unternehmen mit mehr als 20 Beschäftigten. Aufgrund der abweichenden Datenbasis in der Kartendarstellung und der Betrachtung des Branchenreports, sind Abweichungen in den Daten möglich [122].



-- Betriebsniederlassungen -- Gesamtumsatz in der Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenteilen (WZ29)
-- Mitarbeiteranzahl -- Anteil WZ29 am Bergbau, der Gewinnung von Steinen und Erden sowie dem Verarbeitenden Gewerbe in Prozent

Abbildung 74: Umsatz und Beschäftigte der Automobilzulieferindustrie in der Region: Umsatz und Beschäftigte der Automobilzulieferindustrie in der Region [122]

In Abbildung 74 wird auf der linken Seite ein Überblick zu der Anzahl der Niederlassungen und der dort insgesamt Beschäftigten in den jeweiligen Landkreisen gegeben. Auf der rechten Seite erfolgt die Darstellung des Umsatzes und dem Anteil des Wirtschaftszweiges 29 am Gesamtumsatz im Bergbau, der Gewinnung von Steinen und Erden sowie dem verarbeitenden Gewerbe in Prozent. Anhand der vorliegenden Daten ist eindeutig erkennbar, dass der Landkreis Zwickau sowohl in der Beschäftigtenanzahl als auch beim Gesamtumsatz im WZ 29 von 5,3 Mrd. € klar dominieren kann. Auch der Anteil von 59 % des Umsatzes aus dem Bergbau, der Gewinnung von Steinen und Erden sowie dem verarbeitenden Gewerbe verdeutlicht dies. Somit ist es essenziell Perspektiven für diese Unternehmen schaffen zu können, um sowohl Arbeitsplätze als auch Wirtschaftsleistung sichern zu können. Auch in den anderen Regionen in denen zwar geringere Zahlen erreicht werden darf dies nicht vernachlässigt werden. Hierbei muss noch mal unterstrichen werden, dass die hier ersichtlichen Daten sich nur auf den WZ29

beziehen. Unter Berücksichtigung der in Tabelle 15 identifizierten Unternehmen wird der Bedarf einer erfolgreichen Transformation nochmals verstärkt [122].

Um das Potenzial hinsichtlich einer erfolgreichen Transformation zu untersuchen, können im Rahmen dieser Studie nicht alle Einzelunternehmen betrachtet werden. Daher muss ein vereinfachender Ansatz ausgewählt werden, der ein Transformationspotenzial und notwendige Handlungsfelder aufzeigen kann.

Um dies ableiten zu können, sind wie in Schritt zwei des Vorgehensmodells definiert, einheitliche Bewertungsparameter notwendig. Für diese kommen verschiedenste technologische und ökonomische Faktoren in Frage. Von der Anzahl der Mitarbeiter, bis zum Umsatz und der Produktpalette sind verschiedene Parameter denkbar. Da in dieser Analyse eine Betrachtung in Zusammenfassung zu Clustern erfolgen soll, werden zwei Kernparameter ausgewählt. Dies ist zum einen die Zukunftsfähigkeit der Produkte. Relevant ist dies vor allem daher, da anhand des aktuellen Portfolios abgeleitet werden kann, ob diese Produkte auch bei einer Umstellung der Industrie auf Elektro- oder Wasserstoffmobilität weiter nachgefragt sind. Als weiteres Kriterium wird der Energieverbrauch und damit die Energieintensität der Produktion herangezogen. Dies liegt darin begründet, dass die Energiekosten einen wesentlichen Einfluss auf die Produktionskosten haben. Je nach betrachtetem Energiepreisszenario haben die Energiekosten einen Einfluss auf die Gesamtwirtschaftlichkeit der Unternehmen.

In Schritt drei erfolgt die Definition von vier Clustern, für die eine Bewertung des Transformationspotenzials durchgeführt werden soll. Dabei wurden die folgenden charakteristischen Cluster definiert, für die ein Transformationspotenzial und spezifische Handlungsempfehlungen gegeben werden können:

- Cluster 1: Hohe Zukunftsfähigkeit der Produkte, geringer Stromverbrauch
- Cluster 2: Moderate Zukunftsfähigkeit der Produkte, moderater Stromverbrauch
- Cluster 3: Hohe Zukunftsfähigkeit der Produkte, hoher Stromverbrauch
- Cluster 4: Geringe Zukunftsfähigkeit der Produkte, hoher Stromverbrauch

In Abbildung 75 werden die Cluster zur Bewertung in einer Matrix dargestellt und die notwendige Transformation, um langfristig wirtschaftlich arbeiten zu können dargestellt. Der Transformationsprozess für die einzelnen Cluster wird im Folgenden bewertet.

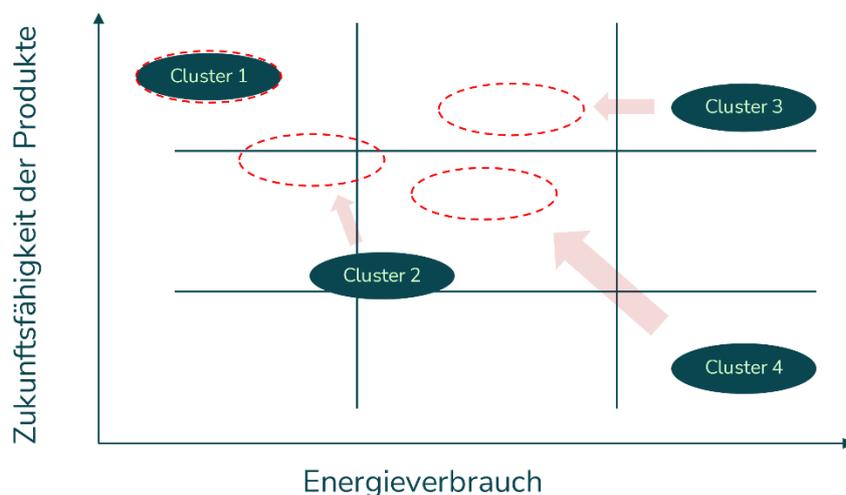


Abbildung 75: Clustereinteilung für das Transformationspotenzial der Automobilzulieferindustrie

Cluster 1 steht in der vorliegenden Betrachtung am besten da. Sowohl die Zukunftsfähigkeit der Produkte ist gegeben als auch ein geringer Energieaufwand und damit Abhängigkeit von der Entwicklung des Energiepreises. Dies kann für Unternehmen gegeben sein deren Produkte unabhängig von den Entwicklungen rund um den Antriebsstrang weiterhin benötigt werden. Kurzfristig besteht hier kein akuter Handlungsbedarf jedoch sollte langfristig die Marktposition fortlaufend geprüft werden, um bei Bedarf entsprechende Maßnahmen einleiten zu können.

Cluster 2 erfordert bereits einen Handlungsbedarf, um eine erfolgreiche Transformation zu gewährleisten. In diesem Cluster sind viele Unternehmen zu verorten die aktuell ein gut funktionierendes Geschäftsmodell aufweisen, gleichzeitig aber in höherem Maße als Cluster 1 von der aktuellen Antriebstechnologie abhängig sind. Dies könnte beispielsweise ein Produzent von Ölpumpen für Verbrennungsmotoren sein. Dieses Geschäftsfeld wird sich langfristig stark verkleinern. Die vorhandenen Kompetenzen erlauben aber eine Transformation des Produktportfolios. Kurz und mittelfristig besteht hier noch kein großer Handlungsbedarf. Jedoch sind langfristig verschiedene Punkte zu beachten. So ist zwingend eine Schärfung der Strategie erforderlich die mit einer genauen Marktbeobachtung einhergeht. Nur so kann eine Zukunftsfähigkeit des Produktportfolios auch unter geänderten Randbedingungen gewährleistet werden. Gleichzeitig sollte sich in gewissem Maß auch bereits mit dem Energieverbrauch beschäftigt werden, um von künftigen Entwicklungen des Energiepreises unabhängiger zu werden. Hier sind Effizienzsteigerungen und Energiesystemlösungen zu prüfen. Bei Durchführung dieser Schritte ist auf Basis der vorhandenen Kompetenzen von einem sehr guten Transformationspotenzial auszugehen.

Cluster 3 mit zukunftsfähigen Produkten und hohem Energieverbrauch sollte den Fokus vorrangig auf den Energieverbrauch legen. Dazu sollten unternehmensspezifische



Untersuchungen durchgeführt werden, inwiefern die Energiekosten zum einen gesenkt und zum anderen kontrolliert werden können. Ein beispielhaftes Unternehmen kann etwa der Metallindustrie entstammen, in der ein hoher Energiebedarf vorliegt. Für eine gesicherte Zukunftsfähigkeit ist es schon bei den heutigen Energiekosten notwendig alternativen zu prüfen. Auch hier sollten verschiedene Energiesystemlösungen betrachtet werden, die eine Unabhängigkeit von der allgemeinen Energieversorgung und den schwer planbaren Preisentwicklungen bieten können. Der akute Bedarf hat sich hier bereits im Zuge der Preisentwicklungen für Erdgas im letzten Jahr gezeigt. Daher ist hier bereits ein schnelles Handeln zu empfehlen. Im ersten Schritt sollte eine Szenarien-Basierte Betrachtung zur Erarbeitung einer Strategie durchgeführt werden. Hierbei sind sowohl moderate als auch stark ansteigende Strompreisszenarien zu berücksichtigen. Auch das Transformationspotenzial ergibt sich dabei je nach gewähltem Szenario. Für einen Anstieg der Energiekosten fällt dieses deutlich geringer aus, sodass auch die Betrachtung einer Produktionsverlagerung nicht vernachlässigt werden sollte. Diese sollte dabei multikriteriell und nicht nur rein auf Basis der Produktionskosten durchgeführt werden, da auch Faktoren wie Liefertreue einen wesentlichen Einfluss für die Gesamtwirtschaftlichkeit spielen. Je nach Energiepreisszenario ergibt sich dabei ein gutes bis moderates Transformationspotenzial.

Cluster 4 steht vor der größten Herausforderung, um eine erfolgreiche Transformation durchzuführen. Da die aktuellen Produkte keine Zukunftsfähigkeit aufweisen, ist schnellstmöglich zu prüfen, inwiefern vorhandenen Kompetenzen in alternative Wertschöpfung transferiert werden können. Hier sollte schnellstmöglich eine Strategieentwicklung angestoßen werden, um vorhandene Potenziale zu strukturieren und offenzulegen. Dabei gelten gleichzeitig die in Cluster 3 beschriebenen Herausforderungen für die Energieversorgung, die je nach Energiepreisszenario erschwerend dazu kommen. Diese gleichzeitigen Belastungen stellen eine enorme Herausforderung für die jeweiligen Unternehmen dar. Das Transformationspotenzial ist hier als moderat bis gering einzuschätzen.

In Summe lässt sich ableiten, dass das konkrete Transformationspotenzial für verschiedene Cluster unterschiedlich zu bewerten ist. Da die Automobilzulieferindustrie in der Region ein breites Spektrum an Kompetenzen aufweisen kann, die auch für die in Kapitel 8.5.1 dargelegten Bereiche der Produktwertschöpfung benötigt werden, ist in Summe von einem guten Transformationspotenzial auszugehen. Hierzu müssen jedoch verschiedene Randbedingungen erfüllt sein. Dies bezieht sich zum einen auf die Unternehmen, die rechtzeitig geeignete Schritte für eine Transformation betrachten und angehen müssen. Zum anderen sollte auch von politischer Ebene die notwendige Unterstützung in Form von Aufklärungsarbeit oder der Förderung von Weiterbildungsmaßnahmen gewährleistet werden.



8.5.3 Schulungsangebote

Ein weiterer Eckpfeiler zur Gestaltung dieser Transformation in der Region sind passende Schulungsmöglichkeiten. Die Umstellung von fossilen auf wasserstoffbasierte Energiesysteme erfordert spezialisiertes Wissen und Fachkenntnisse in unterschiedlichen Branchen. In diesem Kapitel wird eine Auflistung von verfügbaren Angeboten (zum Zeitpunkt der Berichtserstellung), sowie mögliche Stoßrichtungen für zukünftigen Schulungsbedarf gegeben.

Abhängig von der Zielgruppe und auch der Detailtiefe ist in Abbildung 76 eine Übersicht dargestellt. Institutionen, welche Schulung anbieten sind vor allem:

- TU Chemnitz
- HZwo e.V.
- Handwerkskammer (HWK) Chemnitz
- Industrie- und Handelskammer (IHK) Chemnitz
- FTZ Forschungs- und Transferzentrum e.V. an der Westsächsischen Hochschule Zwickau
- TÜV Süd Akademie in Zwickau
- ICM mit TÜV Rheinland
- DBI Gastechnologisches Institut

Dabei ist für jeden Kenntnisstand ein passendes Schulungsangebot vorhanden - angefangen von Informationen zum Themenfeld Wasserstoff bis hin zum mehrjährigen Studium.



Abbildung 76 Auflistung verfügbarer Schulungsangebote für die Projektregion



Um ein weiterführendes, allumfängliches Fachwissen im Bereich Wasserstofftechnik zu vermitteln, rücken verschiedene relevante Bereiche besonders in den Vordergrund. Dazu gehören:

- Fachwissen im Bereich Maschinenbau- und Betriebstechnik, Elektrotechnik, Chemie, Energietechnik und Ingenieurwesen
- Technische Forschung und Entwicklung an öffentlichen Forschungseinrichtungen
- Infrastrukturentwicklung in Hoch- und Tiefbau (Fachwissen zur Umwidmung des Gasnetzes, Tankstellen, Speichermöglichkeiten)
- Rechtliche Rahmenbedingungen (juristische Kenntnis zur Erleichterung der Genehmigungsprozesse)
- Finanzwesen (öffentliche Fördermittel, private Investitionen und Partnerschaften mit Industrieakteuren)
- Nachhaltigkeit und Umweltaspekte mit der Integration erneuerbarer Energien in den Wasserstoffherstellungsprozess
- Öffentlichkeitsarbeit und soziale Faktoren

9 Strategie für die Wasserstoffregion Chemnitz

Die HyExperts Studie zur Entwicklung von Konzepten einer Wasserstoffwertschöpfung in der Modellregion Chemnitz hat einen tiefgreifenden Einblick in die Potenziale und Herausforderungen einer zukünftigen Wasserstoffwirtschaft geboten. Dies zeigt sich insbesondere anhand der Konzepte für die Wasserstoffinseln. Die Untersuchung verdeutlicht dabei nicht nur die vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten und die positive ökologische Bilanz von Wasserstoff, sondern zeigt auch auf, dass der langfristig erfolgreiche Aufbau einer regionalen Wasserstoffwirtschaft ohne eine gute Strategie kaum realisierbar ist.

Der Einsatz von Wasserstoff als zentraler Baustein einer nachhaltigen Energieversorgung erfordert nicht nur technologische Innovation, sondern auch einen koordinierten Ansatz, der die Bedürfnisse der Industrie, des Verkehrssektors, der Energiewirtschaft sowie der Forschung und Bildung in Einklang bringt. Die hier entwickelte Strategie fungiert dabei als Wegweiser, der es ermöglicht, die vielfältigen Einzelinteressen zu bündeln und in eine gemeinsame Bahn zu führen.

Die Entwicklung der Strategie wurde dabei anhand der in Abbildung 77 gezeigten Strategiepyramide durchgeführt. Ausgehend von der Vision wird sich dabei planvoll der Ableitung von konkreten Umsetzungsmaßnahmen genähert.



Abbildung 77: Strategiepyramide für die methodische Strategieentwicklung

9.1 Ausgearbeitete Strategie



Vision für die Wasserstoffregion Chemnitz

Unsere Vision ist es, als Region Chemnitz und dem dazugehörigen Netzwerk Europas führender Innovationstreiber für die Entwicklung, Produktion und Anwendung von Wasserstofftechnologien zu werden, die einen entscheidenden Beitrag zur CO₂-Reduktion und zur Energiewende leistet.



Ausgehend von der entwickelten Vision, wurde diese zu einer geschärften Mission je Handlungsfeld weiterentwickelt. Dabei wurden sowohl politische als auch technische Punkte abgedeckt. Diese sind notwendig, um eine erfolgreiche Wasserstoffwirtschaft in der Region zu etablieren und die vorab entwickelte Vision zu präzisieren.

Wasserstoffbereitstellung



Wir streben frühzeitig eine lokale und effiziente Wasserstofferzeugung in der Region an, um die kurzfristigen Bedarfe durch Eigenversorgung zu erfüllen. Mittel- bis langfristig stellen wir durch den Import von grünem Wasserstoff sicher, dass Industrie, Mobilität, Wärme- und Energieversorgung mit den notwendigen Mengen zu einem wettbewerbsfähigen Preis versorgt werden.

Aufbau Infrastruktur



Wir setzen einen Fokus auf die Integration von Wasserstoff in die bestehende Energieinfrastruktur. Dies beinhaltet den Ausbau von Verteilnetzinfrasturktur und den Anschluss an den Hydrogen Backbone.

Wasserstoffverbrauch im Verkehrs-, Wärme- und Energiesektor



Unsere Mission ist es, die regionale Mobilität mit dem Einsatz von Wasserstoff umweltfreundlich zu gestalten. Den Mobilitätssektor betrachten wir als ersten Anwendungsbereich für regional erzeugten Wasserstoff. Mittel- bis Langfristig erfolgt die Integration von Wasserstoff in die Wärme- und Energieversorgung in der Region. Durch diese Maßnahmen erzielen wir eine signifikante Senkung der CO₂-Emissionen sowie die Verringerung der Abhängigkeit vom schwankenden Output der erneuerbaren Energien.

Forschung und Entwicklung



Mit dem bereits bestehenden Hochschulnetzwerk und den Forschungseinrichtungen sowie zielgerichtete Investitionen in Forschung und Entwicklung stärken wir das Fundament des Innovationsökosystems für Wasserstofftechnologien.

Aus- und Weiterbildung



Die Wasserstoffmodellregion Chemnitz fördert die Aus- und Weiterbildung von Fachkräften sowie das Bewusstsein für Wasserstofftechnologien. Durch Bildungsprogramme, Events und Leuchtturmprojekte reduzieren wir Vorbehalte und erhöhen die Kompetenz der Region für Wasserstoff und Wasserstofftechnologien.

Produktion von Wasserstofftechnologien



Durch Förderung von Entwicklung und Start-ups erweitern wir das Innovationsökosystem für Wasserstofftechnologien. Unsere Aufgabe ist es auch, neue Arbeitsplätze zu schaffen und vorhandene zu erhalten, Fachkräfte anzuziehen und die Region als Vorreiter für Wasserstofftechnologien zu transformieren.



Basierend auf der Mission wurden die strategischen Ziele abgeleitet. Dabei spiegeln die strategischen Ziele die Schwerpunkte der vorliegenden Studie wider. Die Ziele orientieren sich an der Mission und bilden das Grundgerüst für die Erreichung der Vision für die Region Chemnitz. Eingeordnet werden die Ziele in einer Zeitschiene (Roadmap).

	Kurzfristige Ziele (2025)	Mittelfristige Ziele (2028)	Langfristige Ziele (2030+)
Wasserstoff-bereitstellung	Bis 2025 ist das erste Pilotprojekt zur Erzeugung (mind. 5 MW Elektrolyseleistung) von grünem Wasserstoff in der Region umgesetzt. Die Region setzt sich geschlossen für einen Anschluss an das bundesweite Wasserstoff-Kernnetz ein.	Bis 2028 erreichen wir eine lokale Wasserstoffherstellungskapazität von 20 Megawatt, die aus erneuerbaren Energiequellen gespeist wird.	Bis 2030+ wird die Region sowohl mit regional erzeugtem als auch importiertem Wasserstoff über das Wasserstoff-Kernnetz versorgt.
Aufbau Infrastruktur	Bis Ende 2025 schaffen wir eine Infrastruktur von drei Tankstellen in der Region, um eine anfängliche Versorgung für Wasserstofffahrzeuge sicherzustellen.	Innerhalb von fünf Jahren planen wir ein Verteilsystem (Pipeline und Trailer), um grünen Wasserstoff in diversen Anwendungsbereichen in der Region zu verteilen.	Für 2030 streben wir für die gesamte Region ein dichtes Wasserstoff-Verteilnetz für Verbraucher in den Sektoren Mobilität, Industrie und Wärme an.
Wasserstoffverbrauch im Verkehrs-, Wärme- und Energiesektor	Bis 2025 werden zur Etablierung von H2-Flotten Kooperationen zwischen regionalen Partnern geschlossen. Durchführung einer dez. Studie für den Wärme- und Energiesektor. Die Netzwerkkonferenz ch2emnet wird alle 2 Jahre fortgeführt.	Bis 2028 ist das Ziel, dass die Vorgaben aus der Clean Vehicles Directive erfüllt werden und dass der Wärme- und Energiesektor in die H2-Vorhaben umgesetzt werden.	Bis 2030+ stellen Wasserstofffahrzeuge eine etablierte Wahl für regionale Verbraucher dar. Im Wärme- u. Energiesektor sind H2-Anwendungen etabliert.

	Kurzfristige Ziele (2025)	Mittelfristige Ziele (2028)	Langfristige Ziele (2030+)
Forschung und Entwicklung	Bis 2025 werden 10 FuE-Projekte initiiert, die auf den Stärken der Region aufbauen. Wir unterstützen den Aufbau des HIC ¹ . Die FC ³ -Fuel Cell Conference Chemnitz wird zu einem internationalen Aushängeschild der Region ausgebaut.	Bis 2028 Aufbau und Inbetriebnahme des HIC, dadurch Anziehung von Fachkräften im Wasserstoffsektor und Steigerung der Anzahl der Experten in der Region. Es werden weitere 10 industrielle FuE-Projekte realisiert.	Bis 2030+ etablieren wir die Region, als führenden Standort der Forschung und Entwicklung mit Schwerpunkten in der Anwendung und Produktion sowie Erzeugung und Speicherung.
Aus- und Weiterbildung	Bis 2025 erfolgt eine Bündelung der Aus- und Weiterbildungsvorhaben in einer nationalen Dachorganisation mit Mitgliedern aus der Region wie bspw. TUC, IHK, HZwo, DBI, HWK, ICM	Bis 2028 organisieren wir zielgruppen-spezifische Formate, um das Bewusstsein für Wasserstoff als sauberen Energieträger in der Region zu steigern. H2-Ausbildungsangebote stehen bereit.	Bis 2030+ Weiterentwicklung der Strategie für Aus- und Weiterbildung. Durchführung von Informationskampagnen für den Wissensaufbau in der Bevölkerung.
Produktion von Wasserstoff-technologien	Bis 2025 wird in Chemnitz, nahe dem HIC ein H2-Campus für Technologieunternehmen und Startups konzipiert. Wir unterstützen dabei, bürokratische Hürden zu überwinden.	Bis 2028 haben erste Start-ups, Aus-gründungen und Neuansiedlungen stattgefunden. Der H2-Campus mit zentraler Infrastruktur ist eröffnet.	Bis 2030+ stärken wir die Innovationskultur nachhaltig, welche zu wettbewerbsfähigen Wasserstofftechnologieprodukten im Markt führt.

¹ Hydrogen Innovation Center

Abbildung 78 Kurz-, mittel- und langfristige Ziele



Abschließend wurden basierend auf den strategischen Zielen und den definierten Handlungsfeldern konkrete Umsetzungsmaßnahmen definiert. Diese wurden für einen zeitlichen Kontext in eine Roadmap integriert.

Umsetzungsmaßnahmen & Road Map

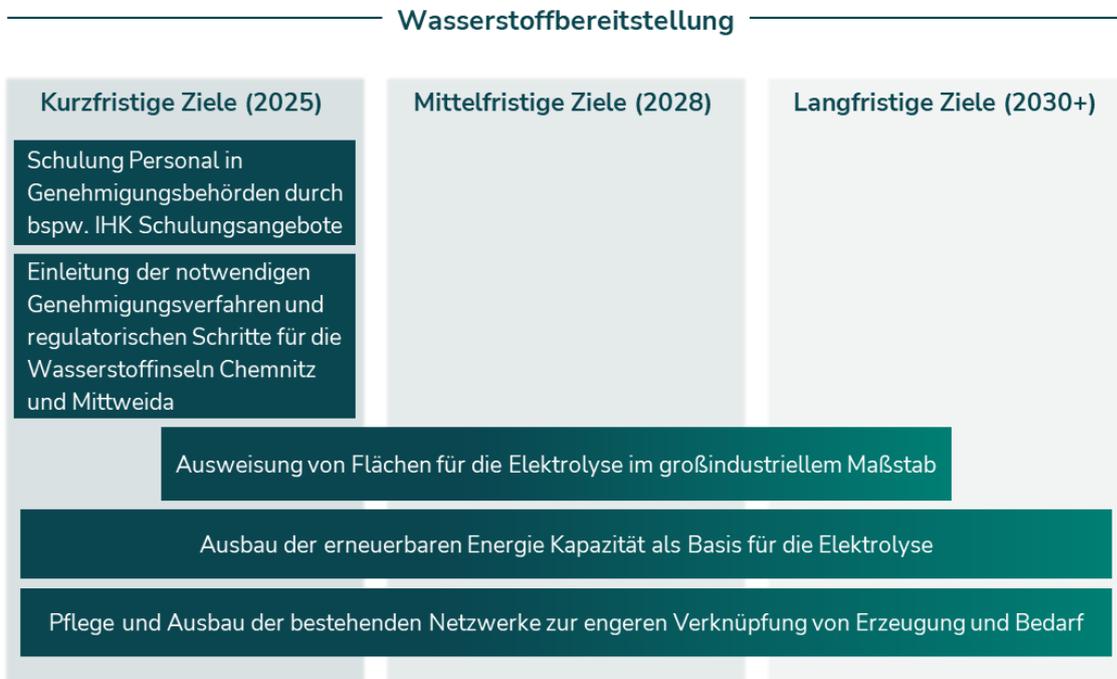


Abbildung 79 Roadmap Wasserstoffbereitstellung

Umsetzungsmaßnahmen & Road Map

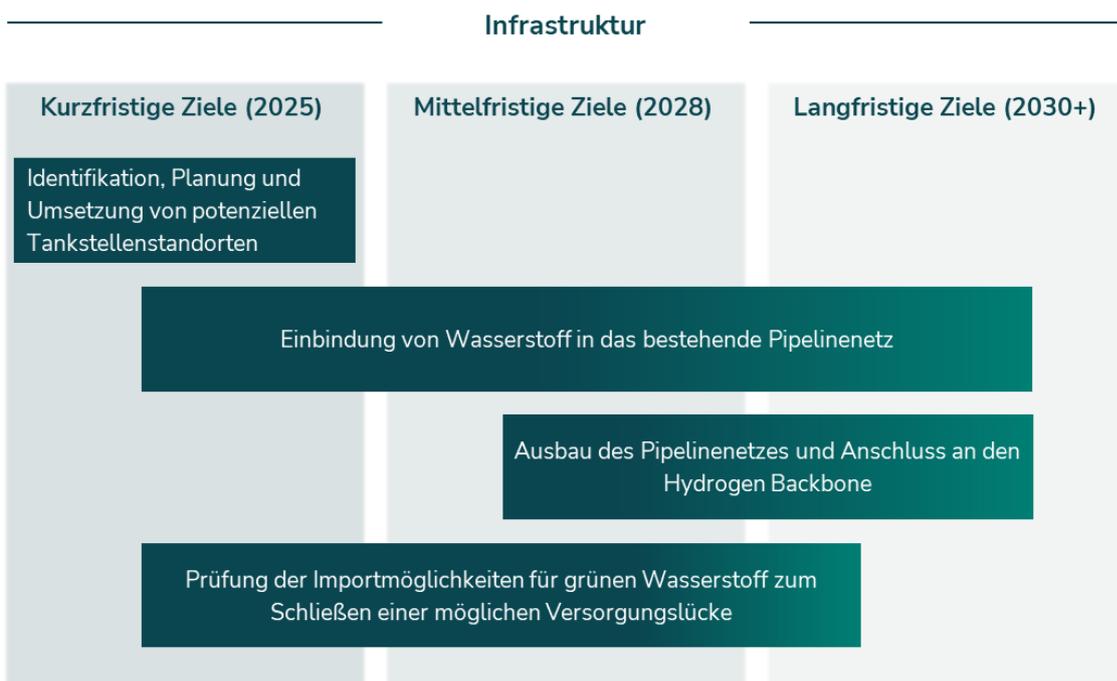


Abbildung 80 Roadmap Infrastruktur

Umsetzungsmaßnahmen & Road Map



Abbildung 81 Roadmap Mobilität

Umsetzungsmaßnahmen & Road Map

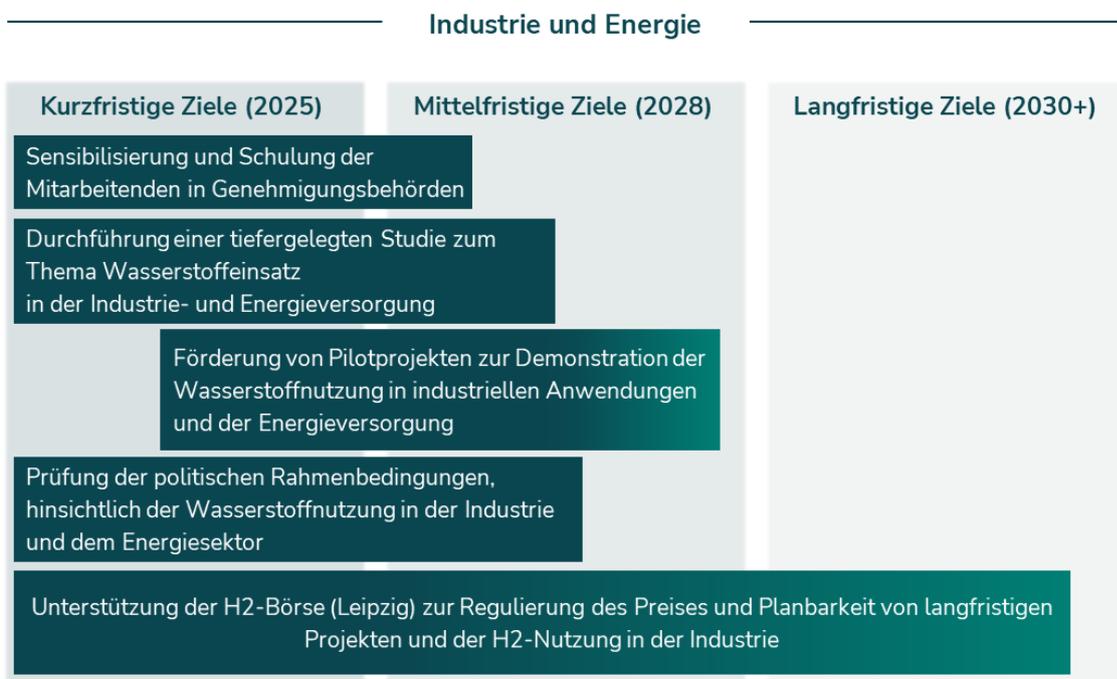


Abbildung 82 Roadmap Industrie und Energie

Umsetzungsmaßnahmen & Road Map



Abbildung 83 Roadmap Forschung, Entwicklung und Bildung

Umsetzungsmaßnahmen & Road Map

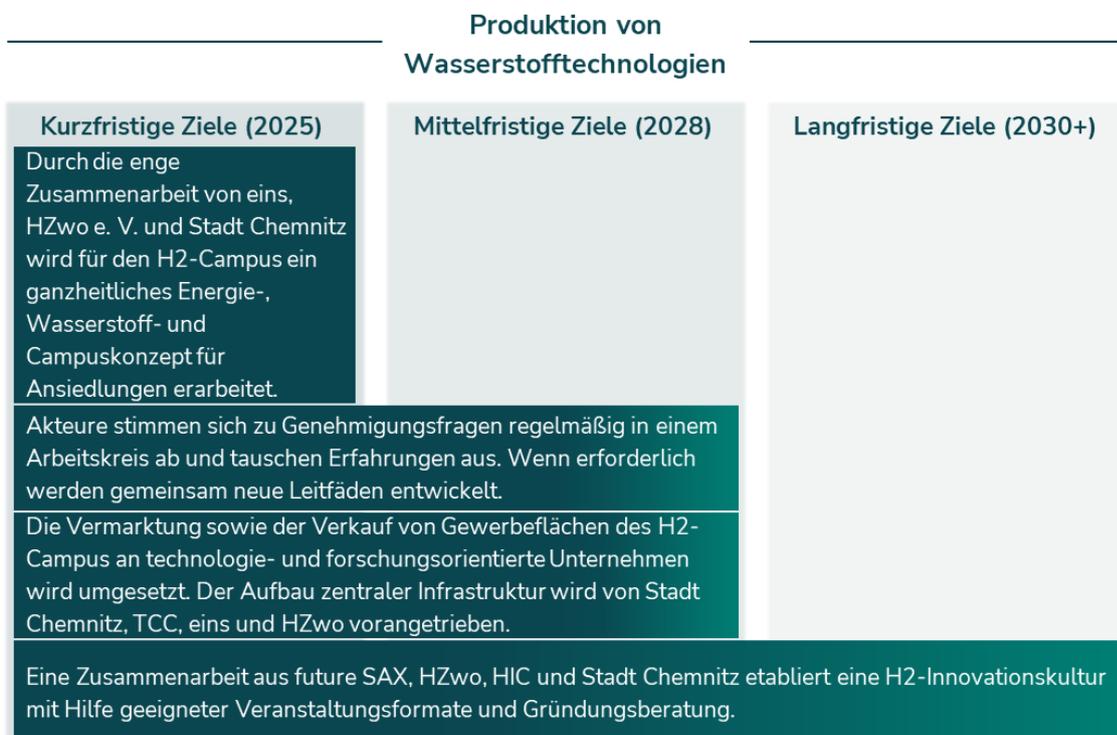


Abbildung 84 Roadmap Produktion von Wasserstofftechnologien



Die im Rahmen des HyExperts-Projekts entwickelte Strategie zur Förderung nachhaltiger Wasserstofftechnologien und -anwendungen in der Region Chemnitz spiegelt unsere Vision wider, eine Vorreiterrolle in diesem entscheidenden Energiesektor einzunehmen. Dabei stellt die Strategie sicher, dass die Region Chemnitz nicht nur technologische Fortschritte vorantreibt, sondern auch einen positiven Beitrag zur globalen Herausforderung der CO₂-Reduktion und zu einer beschleunigten Energiewende leistet. Die klare Ausrichtung auf den Aufbau einer umfassenden Wasserstoffwirtschaft, von der Produktion bis zur Integration in verschiedene Sektoren, legt den Grundstein für nachhaltige Veränderungen. Durch eine enge Zusammenarbeit von Industrie, Forschung und Bildung werden nicht nur ökologische Ziele erreicht, sondern auch Chancen für wirtschaftliche Entwicklung und die Entwicklung des Arbeitsmarktes geschaffen. Die erarbeitete Strategie schafft somit eine Richtschnur für gezielte Maßnahmen und Investitionen, die die Region Chemnitz zu einem führenden europäischen Innovationstreiber für die Entwicklung, Produktion und Anwendung von Wasserstofftechnologien machen.

9.2 Blaupausenkonzept

Wie im Rahmen dieser Studie gezeigt wurde, erfordert die Entwicklung einer Wasserstoffwirtschaft eine ganzheitliche Herangehensweise, wobei verschiedene Handlungsfelder miteinander verknüpft werden müssen. Hierzu soll in diesem Kapitel eine generalisierte Blaupause entwickelt werden, die allgemeine Lösungsstrategien für die Herausforderungen in den spezifischen Handlungsfeldern skizziert.

Dabei sollen die im Verlauf der Studie gewonnenen Erkenntnisse gebündelt werden, um auch anderen Regionen eine wertvolle Hilfestellung zu leisten. Die Handlungsfelder, die für die Blaupause betrachtet werden, sind die Wasserstofferzeugung, die Wasserstoffinfrastruktur, Wasserstoffbedarf, Forschung und Entwicklung, Bildung und die Wasserstoffwirtschaft.

Handlungsfeld Wasserstofferzeugung

Herausforderung:

- Effiziente und nachhaltige Wasserstofferzeugung aus erneuerbaren Quellen sicherstellen.

Lösungsstrategien:

- Förderung von Pilotprojekten für grüne Wasserstofferzeugung in Kooperation mit allen notwendigen Partnern, inklusive der Bedarfsseite
- Schaffung von Anreizen für den Ausbau erneuerbarer Energien zur Wasserstoffproduktion
- Verbindung regionaler Akteure und Schaffung von regionaler Akzeptanz zum Ausbau von EE-Anlagen (bspw. durch Beteiligung)

Handlungsfeld Wasserstoffinfrastruktur (Speicher und Verteilung)

Herausforderung:

- Aufbau einer sicheren und skalierbaren Wasserstoffinfrastruktur.

Lösungsstrategien:

- Die gemeinsame Betrachtung von Bedarf und Infrastruktur in der frühen Phase, um Synergieeffekte für die Wirtschaftlichkeit zu nutzen, ist unerlässlich.
- Aktive Suche nach weiteren potenziellen Abnehmern in der Region für eine verbesserte Wirtschaftlichkeit der Infrastruktur.



Handlungsfeld Wasserstoffbedarf (Mobilität, Energie, Industrie)

Herausforderung:

- Schaffung von Nachfrage in verschiedenen Sektoren für die Nutzung von Wasserstoff.

Lösungsstrategien:

- Nutzung der kommunalen Mobilität als Vorreiter bietet sich aufgrund der Vorgaben aus der Clean Vehicles Directive (Gesetz über die Beschaffung sauberer Straßenfahrzeuge) an.
- Die Nutzung von grünem Wasserstoff ist unerlässlich, um die wirtschaftlichen Vorteile der THQ-Quote nutzen zu können.
- Identifizierung von Industriezweigen, in denen Wasserstoff als Energiequelle besonders (wirtschaftlich) sinnvoll ist, und Entwicklung von Pilotprojekten.

Handlungsfeld Forschung und Entwicklung

Herausforderung:

- Förderung von Innovationen und technologischer Weiterentwicklung im Wasserstoffsektor.

Lösungsstrategien:

- Einrichtung eines Austauschforums als Zusammenspiel von akademischen Einrichtungen und Industriepartnern.
- Finanzielle Förderung von Forschungs- und Entwicklungsvorhaben in der Region

Handlungsfeld Bildung

Herausforderung:

- Schaffung eines gut ausgebildeten Fachkräftepools in der Region und Sensibilisierung der Bevölkerung für Wasserstofftechnologien.

Lösungsstrategien:

- Organisation von Informationsveranstaltungen und öffentlichen Workshops, um das Bewusstsein für Wasserstoff zu erhöhen.
- Entwicklung von Bildungsprogrammen und Schulungsangeboten auf verschiedenen Ebenen, die sich auf Wasserstofftechnologien konzentrieren.



Handlungsfeld Wasserstoffwirtschaft

Herausforderung:

- Aufbauen einer funktionierenden und selbsttragenden Wasserstoffwirtschaft.

Lösungsstrategien:

- Bieten einer Plattform für die Vernetzung und Zusammenarbeit der interessierten Stakeholder.
- Suchen der willigen, die mit großem Engagement voran gehen, um Pilotprojekte für die Wasserstoffwirtschaft zu etablieren.
- Denken von gesamtheitlichen Wertschöpfungsketten und bilden von Projektgesellschaften. Nur so ist in der frühen Phase der Wasserstoffwirtschaft ein wirtschaftlicher Betrieb möglich.

Dieses Blaupausenkonzept soll auch anderen Regionen helfen, schnell die richtigen Schritte einzuleiten, um auf dem bestmöglichen Weg in Richtung einer Wasserstoffwirtschaft zu starten.



10 Ausblick

Mit dem Abschluss der HyExperts Studie in der Modellregion Chemnitz sollen die Bemühungen zum Ausbau einer Wasserstoffwirtschaft in der Region nicht enden. Vielmehr ist die Studie als ein Zwischenschritt zu verstehen, durch den die in der Region bereits vorhandenen Potenziale enger verknüpft werden konnten. Somit gilt es diesem Weg zu folgen, um konkrete Projekte in die Umsetzung zu bringen.

Die während des Projekts gestärkten Netzwerke bleiben bestehen und können einen wertvollen Beitrag für die zukünftige Entwicklung leisten. Darauf zählt auch der entstandene H₂-Marktplatz ein. Dieser bietet eine hervorragende Möglichkeit, die Potenziale von Bedarf und Erzeugung von grünem Wasserstoff zusammenzubringen. Als lebende Plattform wird der Marktplatz auch in Zukunft erhalten bleiben und bei entsprechender Pflege den aktuellen Stand der Wasserstoffwirtschaft in der Region abbilden

Vorrangig gilt es nun, die beiden in dieser Studie betrachteten Wasserstoffinseln in der Region weiterzuentwickeln und in die Umsetzung zu bringen. Darüber hinaus soll die entwickelte Strategie darüber hinaus helfen, weitere Projekte zu etablieren.

Der Zukunft für die Wasserstoffzukunft der Modellregion Chemnitz kann optimistisch betrachtet werden, erfordert aber weiterhin engagierte Anstrengungen und eine fortlaufende strategische Ausrichtung. Die aufgestellten Ziele können als Leitfaden dienen, um den Weg zur nachhaltigen Wasserstoffwirtschaft konsequent und zielgerichtet fortzusetzen. Mit den gewonnenen Erkenntnissen aus dieser Studie und weiterem Engagement der Beteiligten wird der Weg in eine Wasserstoffwirtschaft gelingen.



Dateiname: Abschlussbericht_HyExperts_Chemnitz

Version: 0.0.1

Status: Freigegeben

Geheimhaltungsstufe: Öffentlich

	Datum	Name / Abteilung	Unterschrift
Erstellt	31.01.2023	Dr. Ingmar Hartung	
Geprüft	06.10.2023	Annelie Kahlenberg	
Freigegeben	22.11.2023	Marcus Lassowski	

11 Verzeichnisse

11.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Zielsetzung der Studie.....	7
Abbildung 2: Modellregion Chemnitz.....	8
Abbildung 3: Übersicht zur Fahrzeugverfügbarkeit im Bereich der Nutzfahrzeuge und Busse (Ausschnitt der aktuellen Fahrzeuglandschaft mit Fokus auf Europa)	13
Abbildung 4: Landkarte Fahrzeugumrüstung	14
Abbildung 5: Bewertung und Priorisierung des Umrüstungsnetzwerkes hinsichtlich Wasserstoffaktivitäten	15
Abbildung 6: Potenziale Fahrzeugumrüstung in der Region	18
Abbildung 7: Marktübersicht von Elektrolyseanlagen [10].....	22
Abbildung 8: Carbon Black als Nebenprodukt der Methanpyrolyse	28
Abbildung 9: Übersicht rechtliche Rahmenbedingungen.....	35
Abbildung 10: bestehende WEA-Kapazitäten in der Modellregion (Angabe in kW) nach [80]	53
Abbildung 11: bestehende Wasserkraft-Kapazitäten in der Modellregion (Angabe in kW) nach [80]	54
Abbildung 12: bestehende PV-Kapazitäten auf Freiflächen in der Modellregion (oben) sowie auf Dachflächen, bauliche Anlagen oder Plug-In Systeme (unten) in der Modellregion (Angabe in kW) nach [80]	55
Abbildung 13: Bestehende Biogas-Kapazitäten in der Modellregion (Angabe in kW) nach [80]	56
Abbildung 14: Schaubild der angewendeten Methodik für die Ermittlung der Potenzialgebiete Wind	59
Abbildung 15: Ergebnis Potenzialanalyse für Windeignungsgebiete in der Modellregion (Abstand Siedlung: 1.000 m).....	64
Abbildung 16: Schaubild zur modellhaften Ermittlung konkreter WEA Standorte	65
Abbildung 17: Ausbaupotenzial von WEA in der Modellregion (Süd-)Chemnitz unter Verwendung der ermittelten VREG Wind sowie den „weichen Tabuzonen“	66
Abbildung 18: Vorgehensweise zur Abschätzung des zukünftigen erneuerbaren Energieüberschusses für die Verwendung in Wasserelektrolyseuren	74
Abbildung 19: Differenzbetrachtung in vier ausgewählten Wochen - Szenario B im Jahr 2040	77
Abbildung 20: Erreichbare Volllaststunden mit EE-Überschussleistung	78
Abbildung 21: Produzierbarer Wasserstoff mit EE-Überschussleistung	79
Abbildung 22: Individuelle Kontakte mit Akteuren nach Branche	81
Abbildung 23: Potenzielle Bedarfsstandorte im Untersuchungsgebiet.....	82
Abbildung 24: Potenzielle Bedarfe im Untersuchungsgebiet basierend auf den Angaben der befragten Akteure.....	83
Abbildung 25: Potenzielle Bedarfe der befragten Akteure im Untersuchungsgebiet, aufgeschlüsselt nach Gebietskörperschaft.....	84



Abbildung 26	Potenzielle Bedarfe im Untersuchungsgebiet aufgeschlüsselt nach Anwendungsfeld.....	85
Abbildung 27:	Anteile der einzelnen Anwendungsfelder am Wasserstoffbedarf für die Stadt Chemnitz in den einzelnen Stützjahren.....	86
Abbildung 28:	Anteile der einzelnen Anwendungsfelder am Wasserstoffbedarf für den Landkreis Mittelsachsen in den einzelnen Stützjahren	87
Abbildung 29:	Anteile der einzelnen Anwendungsfelder am Wasserstoffbedarf für den Erzgebirgskreis in den einzelnen Stützjahren	88
Abbildung 30:	Anteile der einzelnen Anwendungsfelder am Wasserstoffbedarf für den Vogtlandkreis in den einzelnen Stützjahren	89
Abbildung 31:	Bereich des potenziellen Wasserstoffbedarfes bei Umstellung der Bestandsfahrzeuge nach Tabelle 12 für das Jahr 2030.....	92
Abbildung 32:	Bereich des potenziellen Wasserstoffbedarfes bei Umstellung der Bestandsfahrzeuge nach Tabelle 12 für das Jahr 2040.....	93
Abbildung 33:	Mögliche Tankstellenstandorte anhand statistischer Bedarfserhebung für die Stützjahre 2030, 2040	94
Abbildung 34:	Zusätzliches regionales Bedarfspotenzial im energetischen Bereich bis einschließlich 2030, basierend auf einer Erhebung der IHK Chemnitz	95
Abbildung 35:	Umfrageergebnisse- Interessen im Zusammenhang mit der HyExperts-Studie.....	96
Abbildung 36:	Umfrageergebnisse - Einsatzbereiche von Wasserstoff	97
Abbildung 37:	Umfrageergebnisse: Herausforderungen für den Einsatz von Wasserstoff	98
Abbildung 38:	Umfrageergebnisse - Wissensstand Wasserstoff Anwendung und Erzeugung	99
Abbildung 39:	Darstellung der interaktiven Karte der Projektregion.....	100
Abbildung 40:	Menüansicht mit Zugang zum „Handbuch“ sowie zur Änderungshistorie („Versionen“)	101
Abbildung 41:	Webansicht für neue Einträge in den H ₂ -Marktplatz.....	101
Abbildung 42:	Elemente der Wertschöpfungskette für Wasserstoff	102
Abbildung 43:	Darstellung eines geplanten H ₂ -Arealgasnetzes in Chemnitz durch die eins energie in sachsen GmbH & Co. KG.....	103
Abbildung 44:	Darstellung einer geplanten Baufläche durch die eins energie in sachsen GmbH & Co. KG	103
Abbildung 45:	Tabellarische Darstellung aller Einträge in den Marktplatz	104
Abbildung 46:	Exemplarischer Eintrag des Unternehmens eins energie in sachsen GmbH und Co. KG	104
Abbildung 47:	Formular zur Kontaktanfrage.....	105
Abbildung 48:	H ₂ -Netz aus der Studie „Wasserstoffnetz Mitteldeutschland“ im Auftrag des HYPOS Hydrogen Power Storage & Solution East Germany	106
Abbildung 49:	Darstellung der Summe potenzieller H ₂ -Bedarfe.	106
Abbildung 50:	Darstellung der potenziellen H ₂ -Bedarfe, links nach Anwendungsart (hier Energetische Nutzung im Jahr 2030), rechts nach Verkehrsmittel	107
Abbildung 51:	Darstellung der Erzeugungspotenziale von Photovoltaikanlagen an Verkehrswegen, landwirtschaftlichen Flächen und auf Dachflächen	107



Abbildung 52: Darstellung der Erzeugungspotenziale von Windenergieanlagen in zwei Szenarien mit unterschiedlichen Annahmen	108
Abbildung 53: Übersicht H ₂ -Backbone-Projekte (Auswahl).....	113
Abbildung 54: Mögliche H ₂ -Backbone-Anschlüsse in der Modellregion.....	114
Abbildung 55: H ₂ -Leitungen 2025	115
Abbildung 56: H ₂ -Leitungen 2030	116
Abbildung 57: H ₂ -Leitungen 2040	117
Abbildung 58: H ₂ -Leitungen & Bestandsnetze	118
Abbildung 59 Spezifische Wasserstoff-Insel Standort Chemnitz (eigene Darstellung von eins)	122
Abbildung 60 Spezifische Wasserstoff-Insel Standort Mittweida (eigene Darstellung von eins)	126
Abbildung 61 Vereinfacht dargestelltes Tankstellenkonzept für den Standort Mittweida	128
Abbildung 62 Flottenhochlauf und Wasserstoffabnahme für die öffentliche Tankstelle in Mittweida	129
Abbildung 63 Erzeugungsprofil eines Elektrolyseurs mit Strombezug per Direktleitung [106]	134
Abbildung 64 Auslastungsprofil eines Elektrolyseurs mit marktpreisgetriebenen Strombezug [106]	135
Abbildung 65 Übersicht Stromkosten Tankstelle.....	138
Abbildung 66 Erlös durch THG Minderung (eigene Annahmen)	138
Abbildung 67 Kapitalwertberechnung Elektrolyse	139
Abbildung 68 Kapitalwertberechnung Tankstelle	140
Abbildung 69: Muster für das Prüfzeichen des TÜV SÜD Standard CMS 70 [110]	141
Abbildung 70: Produktwertschöpfung im Bereich Wasserstoff.....	146
Abbildung 71: Akteurslandschaft Sachsens im Bereich der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (Mehrfachnennungen möglich) [120]	148
Abbildung 72: Vorgehensmodell für die Ableitung eines Transformationspotenzials in der Automobilzulieferindustrie	149
Abbildung 73: Automobilzulieferindustrie in der Region (Unternehmen aus WZ29, Mitarbeiteranzahl > 10)	151
Abbildung 74: Umsatz und Beschäftigte der Automobilzulieferindustrie in der Region: Umsatz und Beschäftigte der Automobilzulieferindustrie in der Region [122].....	152
Abbildung 75: Clustereinteilung für das Transformationspotenzial der Automobilzulieferindustrie	154
Abbildung 76 Auflistung verfügbarerer Schulungsangebote für die Projektregion	156
Abbildung 77: Strategiepyramide für die methodische Strategieentwicklung.....	158
Abbildung 78 Kurz-, mittel- und langfristige Ziele	161
Abbildung 79 Roadmap Wasserstoffbereitstellung	162
Abbildung 80 Roadmap Infrastruktur.....	162
Abbildung 81 Roadmap Mobilität	163



Abbildung 82 Roadmap Industrie und Energie.....	163
Abbildung 83 Roadmap Forschung, Entwicklung und Bildung.....	164
Abbildung 84 Roadmap Produktion von Wasserstofftechnologien	164

11.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Gegenüberstellung der Elektrolyseurkosten verschiedener Hersteller.....	23
Tabelle 2: Kennwerte der Modell-WEA nach [81]	60
Tabelle 3: Ergebnisse der Flächenmodellierung für die Windenergie in der Modellregion ..	63
Tabelle 4: Definition und Kennwerte der drei Ausbaustufen	67
Tabelle 5: Ergebnisse des WEA-Ausbaupotenzials der Modellregion Chemnitz	68
Tabelle 6: Ergebnisse Zubaupotenziale Photovoltaik in der Modellregion Chemnitz.....	72
Tabelle 7: Bundesweiter Jahresstromverbrauch [89]	75
Tabelle 8: Prognostizierte installierte EE-Leistung in GW [89, 94].....	76
Tabelle 9: Jährliche Überschussenergie in GWh/a	77
Tabelle 10: Potenzielle Bedarfe der befragten Akteure im Untersuchungsgebiet, aufgeschlüsselt nach Gebietskörperschaft	84
Tabelle 11: Fahrzeugbestände nach Region [97], durchschnittliche Fahrleistung in Deutschland [96] und angenommene Wasserstoffbedarfe nach Fahrzeugkategorie	90
Tabelle 12: potenzielle Umstellungsbereiche für Fahrzeugbestände im Bereich der Mobilität	91
Tabelle 13 Annahmen Wirtschaftlichkeitsrechnung Insel Erlau / Mittweida	137
Tabelle 14 Übersicht THG-Emissionsfaktoren	144
Tabelle 15: Übersicht der Anzahl der Unternehmen in der Automobilzulieferindustrie in der Region [121].....	149



12 Anhang

Anhang 1: detaillierte Modellierungskennwerte der Identifikation für WEA-Vorzugsgebiete

Tabuzone	Flächenkategorie	Puffer in m	Einfluss WEA	Puffer in m (Gesamt)
Harte Tabuzonen	Gewässer	-	-	-
	Nationalsparks	-	-	-
	Naturschutzgebiete	-	-	-
	Biosphärenreservate	-	-	-
	Siedlungsbereiche	1.000,0	-	1.000,0
	Sport-, Freizeit-, & Erholungsgebiete	-	-	-
	Industrie- und Gewerbegebiete	75,0	-	75,0
	Autobahnen	40,0	½ · Rotordurchmesser	103,5
	Bundesstraßen	20,0	½ · Rotordurchmesser	83,5
	Stromleitungstrassen	0,0	Rotordurchmesser	127,0
	Seilbahnen	0,0	3 · Rotordurchmesser	381,0
	Bahntrassen	200,0	½ · Rotordurchmesser	263,5
	Flugverkehr (Flughafen)	5.000,0	-	5.000,0
	Flugverkehr (Flugplatz)	1.760,0	-	1.760,0
	Truppenübungsplätze	-	-	-
	Bergbaufolgelandschaften	-	-	-
	Bergbaugebiet	-	-	-
	Schutzgebiete	200,0	-	200,0
Weiche Tabuzone	Sport-, Freizeit- und Erholungsgebiete	1.000,0	-	1.000,0
	Optional (zweiter Modelldurchlauf): <ul style="list-style-type: none"> • Nadelwald • Laub- und Mischwälder 	-	-	-

13 Literatur

- [1] M. Klell, H. Eichseder, A. Trattner, *Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik: Erzeugung, Speicherung, Anwendung*, 4th ed., Springer Vieweg, Wiesbaden [Heidelberg] **2018**.
- [2] Schrank et al., *Wasserstoffverbrennungsmotor als alternativer Antrieb* **2021**.
- [3] Deutz, *DEUTZ macht nächsten Schritt für Serienproduktion von Wasserstoffmotoren* **2023**.
- [4] Liebherr, *Liebherr stellt Prototypen von Wasserstoff-Motoren auf der Bauma 2022 vor* **2022**.
- [5] Toyota, *Prototype Corolla Cross Hydrogen Concept* **2022**.
- [6] M. Roeb, Stefan Brendelberger, et al., *Wasserstoff als Fundament der Energiewende*, Köln, <https://elib.dlr.de/137796/> **2020**.
- [7] E. Taibi, H. Blanco, et al., *Green Hydrogen Cost Reduction*, Abu Dhabi, <https://www.irena.org/publications/2020/Dec/Green-hydrogen-cost-reduction> **2023**.
- [8] Centrales Agrar-Rohstoff Marketing- und Energie-Netzwerk e.V., *Marktübersicht Elektrolyseure 2023*, Straubing, https://www.carmen-ev.de/wp-content/uploads/2023/07/MUeE-07_2023.pdf **2023**.
- [9] P. Lettenmeier, *Wirkungsgrad – Elektrolyse: Whitepaper*, <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:a5fa8257-6c71-496f-a324-454241f1df71/version:1626344342/white-paper-effizienz-de.pdf> **2019**.
- [10] R. Heuser, *Power-to-X-Marktübersicht*, <https://power-to-x.de/power-to-x-marktuebersicht-92-elektrolyseure-von-17-herstellern/> **2022**.
- [11] International Renewable Energy Agency (IRENA), *Hydrogen - Overview*, <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Hydrogen> **2022**.
- [12] W. Boll, G. Hochgesand, et al., in *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. Weinheim, Germany **2000**.
- [13] R. Reimert, F. Marschner, et al., in *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. Weinheim, Germany **2000**.
- [14] thyssenkrupp Industrial Solutions AG, *Hydrogen - Key to any Refinery*.
- [15] N. Dögnitz, S. Hauschild, et al., *Wasserstoff aus Biomasse*, DBFZ Report, Nr. 46, Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH, Leipzig **2022**.
- [16] WS Reformer GmbH, *WS FLOX M50 Reformer*.
- [17] HELBIO S.A. Hydrogen and Energy Production Systems, *HHG Series*, https://helbio.com/wp-content/uploads/2019/12/Brochure_HHG_mail_LR.pdf.
- [18] Politecnico di Torino, *bioroburplus*, <https://www.bioroburplus.org/>.
- [19] BtX energy GmbH, *BioH2Ref: Dezentrale Wasserstoffaufbereitung von Biogas durch Dampfreformierung*, <https://btx-energy.de/projekte/bioh2ref/>.
- [20] U. Frohlike, *Topsoe puts demonstration plant into operation for production of sustainable Methanol from biogas - Significant global carbon emission reduction potential*, <https://www.topsoe.com/press-releases/topsoe-demonstration-plant-operation>.
- [21] Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, *BiogasGoesHydrogen: Autarke Wasserstoffgewinnung aus Biogas mittels Reformierung und CO-Verbrennung*, <https://www.evt.tf.fau.de/forschung/forschungsschwerpunkte/2nd-generation-fuels/bmwi-projekt-biogassethydrogen/> **2023**.
- [22] Umweltbundesamt, *Thermische Behandlung*, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/entsorgung/thermische-behandlung#thermische-abfallbehandlung>.
- [23] DWA-Arbeitsgruppe KEK-7.1, *Korrespondenz Abwasser, Abfall* **2022**, 69 (7), 597 – 605.
- [24] iGas energy GmbH, *Überkritische Gaserzeugung: Die vollständige stoffliche Verwertung von wässrigen organischen Abfällen*, <https://igas-energy.de/produkte/wertstoff-rueckgewinnung>.
- [25] iGas energy GmbH, *Forschungsprojekt HyGas Calveslager*, <https://igas-energy.de/forschung/forschungsprojekt-hygas-calveslager>.

- [26] S. Timmerberg, M. Kaltschmitt, M. Finkbeiner, *Energy Conversion and Management: X* **2020**, 7 (100043). DOI: 10.1016/j.ecmx.2020.100043.
- [27] S. Schneider, S. Bajohr, et al., *Chemie Ingenieur Technik* **2020**, 92 (8), 1023 – 1032. DOI: 10.1002/cite.202000021.
- [28] A. Abánades, E. Ruiz, et al., *International Journal of Hydrogen Energy* **2011**, 36 (20), 12877 – 12886. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2011.07.081.
- [29] A. Abánades, C. Rubbia, D. Salmieri, *International Journal of Hydrogen Energy* **2013**, 38 (20), 8491 – 8496. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2012.08.138.
- [30] D. Torres, J. L. Pinilla, et al., *International Journal of Hydrogen Energy* **2014**, 39 (8), 3698 – 3709. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2013.12.127.
- [31] M. J. Lázaro, J. L. Pinilla, et al., *Simultaneous Production of Carbon and Hydrogen by Decarbonization of Natural Gas and other Hydrocarbons*, IEC Gasification Conference Publication **2009**.
- [32] A. Cornejo, *Hydrogen Production Disruption*.
- [33] T. G. Geißler, *Methanpyrolyse in einem Flüssigmetall-Blasensäulenreaktor*, Verfahrenstechnik, Verlag Dr. Hut, München **2017**.
- [34] E. W. McFarland, *Molten-Salt Methane Pyrolysis Optimization Through in-situ Carbon Characterization and Reactor Design*, 2019 Methane Pyrolysis Cohort Kickoff Meeting, Houston **2019**.
- [35] V. Arild, CA2345950C, **1999**.
- [36] A. Bode, C. Anderlohr, et al., *Feste und fluide Produkte aus Gas - FfPaG: Forschung und Entwicklung zur Methanpyrolyse und CO₂-Aktivierung* **2013 - 2017**.
- [37] A. I. Morozov, *Introduction to plasma dynamics*, CRC Press, Boca Raton, Fla. **2013**.
- [38] H. Puliyaalil, D. Lašič Jurković, et al., *RSC Adv.* **2018**, 8 (48), 27481 – 27508. DOI: 10.1039/C8RA03146K.
- [39] M. Scapinello, E. Delikonstantis, G. D. Stefanidis, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* **2017**, 117, 120 – 140. DOI: 10.1016/j.cep.2017.03.024.
- [40] Monolith Materials Inc., *Monolith Process* **2020**.
- [41] P. J. Risby, P. E. Stoknes, *GasPlas: A Carbon Capture and Use Company* **2011**.
- [42] Y. Y. Tanashev, V. I. Fedoseev, et al., *Catalysis Today* **1998**, 42 (3), 333 – 336. DOI: 10.1016/S0920-5861(98)00110-2.
- [43] A. G. Zherlitsyn, V. P. Shiyani, P. V. Demchenko, *Resource-Efficient Technologies* **2016**, 2 (1), 11 – 14. DOI: 10.1016/j.reffit.2016.04.001.
- [44] Graforce GmbH, *Broschüre Schmutzwasser Plasmalyse: Wasserstofferzeugung und Reinigung von Schmutzwasser*.
- [45] Graforce GmbH, *Schmutzwasser-Plasmalyse*, <https://www.graforce.com/technologien/schmutzwasser-plasmalyse>.
- [46] Graforce GmbH, *Wasserstoff-Produktion*, <https://www.graforce.com/leistungen/wasserstoff-produktion> **2020**.
- [47] Roman Scherer, *Zweitausend50 - BDEW-Online-Magazin* **2020**, 84 – 87.
- [48] Synreform GmbH, *Wasserreinigung*, <https://www.synreform.com/leistungen/wasserreinigung>.
- [49] Deutscher Bundestag - Wissenschaftliche Dienste, *Oranger Wasserstoff: Herstellung von Wasserstoff aus Abfall* **2021**.
- [50] F. Saravia, Schwarz, Stefanie, Gröschl, Frank, *Genügend Wasser für die Elektrolyse: Genügend Wasser für die Elektrolyse Wieviel Wasser wird für die Erzeugung von grünem Wasserstoff benötigt und gibt es ausreichende Ressourcen?*
- [51] H. Becker, J. Murawski, et al., *Sustainable Energy Fuels* **2023**, 7 (7), 1565 – 1603. DOI: 10.1039/D2SE01517J.
- [52] Nel ASA, *FAQ: What water quality do I need?*, <https://nelhydrogen.com/faq/>.
- [53] M. A. Khan, T. Al-Attas, et al., *Energy Environ. Sci.* **2021**, 14 (9), 4831 – 4839. DOI: 10.1039/d1ee00870f.



- [54] Europäisches Parlament und Rat, *Delegierte Verordnung (EU) 2023/1084 der Kommission vom 10. Februar 2023 zur Ergänzung der Richtlinie (EU) 2018/2001 des Europäischen Parlaments und des Rates durch Festlegung eines Mindestschwellenwertes für die Treibhausgaseinsparungen durch wiederverwertete kohlenstoffhaltige Kraftstoffe und einer Methode zur Ermittlung der Treibhausgaseinsparungen durch flüssige oder gasförmige erneuerbare Kraftstoffe nicht biogenen Ursprungs für den Verkehr sowie durch wiederverwertete kohlenstoffhaltige Kraftstoffe: RED II; 203/1084 2023.*
- [55] Europäisches Parlament und Rat, *Delegierte Verordnung (EU) 2023/1085 der Kommission vom 10. Februar 2023 zur Ergänzung der Richtlinie (EU) 2018/2001 des Europäischen Parlaments und des Rates durch Festlegung eines Mindestschwellenwertes für die Treibhausgaseinsparungen durch wiederverwertete kohlenstoffhaltige Kraftstoffe und einer Methode zur Ermittlung der Treibhausgaseinsparungen durch flüssige oder gasförmige erneuerbare Kraftstoffe nicht biogenen Ursprungs für den Verkehr sowie durch wiederverwertete kohlenstoffhaltige Kraftstoffe: RED II; 2023/1085 2023.*
- [56] Bundesregierung, *Referentenentwurf der Bundesregierung Verordnung zur Neufassung der siebenunddreißigsten Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes 2023.*
- [57] Europäisches Parlament, *Richtlinie 2010/75/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 24.11.2010 über Industrieemissionen (integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung): EU 2010/75 2010.*
- [58] Landdirektion Sachsen, *Aufgaben - Abteilung 3: Referat 32 - Planfeststellung*, https://www.lids.sachsen.de/?ID=4319&art_param=363.
- [59] Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO), *Arbeitshilfe zum Ausgangszustandsbericht für Boden und Grundwasser 2015.*
- [60] Landesdirektion Sachsen, *Referat 44 - Immissionsschutz: Genehmigungs- und Anzeigeverfahren sowie Überwachung von BImSchG-Anlagen*, https://www.lids.sachsen.de/umwelt/index.asp?ID=7957&art_param=683.
- [61] M. Koralewicz, J. Glandien, et al., *Genehmigungsrechtlicher Leitfaden für Power-to-Gas-Anlagen: Errichtung und Betrieb*, GRS-S, 59, Band 1, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln, Garching b. München, Berlin, Braunschweig **2020**.
- [62] Länderausschuss für Arbeitsschutz und Sicherheitstechnik (LASI), *LASI-Veröffentlichung - LV 49: Erläuterungen und Hinweise für die Durchführung der Erlaubnisverfahren nach § 18 der Betriebssicherheitsverordnung 2017.*
- [63] Landesdirektion Sachsen, *Referat 54 - Betriebssicherheit*, https://www.lids.sachsen.de/?ID=4092&art_param=365.
- [64] Landesdirektion Sachsen, *Sächsische Bauordnung: SächsBO.*
- [65] *Baugenehmigungsamt, Stadt Chemnitz*, <https://www.chemnitz.de/chemnitz/de/rathaus/aemterservice/aemter-a-z/index.itl?uuid=8b04c292-32f1-102e-87b1-690b56b2ab2c>.
- [66] C. Baugenehmigungsamt, *Dienstleistungsportal, Chemnitz: Bauen: Baugenehmigung beantragen*, <https://www.chemnitz.de/dienstleistungsportal/?id=c299102b-1011-49c6-a88d-7d1e1c088406>.
- [67] Landesdirektion Sachsen, *Aufgaben - Abteilung 3: Referate 34 – Raumordnung, Stadtentwicklung*, https://www.lids.sachsen.de/index.asp?ID=4399&art_param=363.
- [68] Sächsisches Oberbergamt, *Bergrecht: Gesetze, Verordnungen, Verwaltungsvorschriften und Richtlinien*, <https://www.oba.sachsen.de/bergrecht-4296.html> **2023**.
- [69] NOW GMBH, *Genehmigungsleitfaden Wasserstoff-Tankstellen*, https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2022/03/NOW_Genehmigungsleitfaden_H2-Tankstellen.pdf **2022**.
- [70] Eisenbahnbundesamt (EBA), *Planfeststellung*, https://www.eba.bund.de/DE/Themen/Planfeststellung/planfeststellung_node.html.

- [71] Eisenbahnbundesamt, *Zulassungen von Fahrzeugen nach dem 4. Eisenbahnpaket (4. EP)*.
- [72] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur im Einvernehmen mit dem Bundesministerium der Finanzen, dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, *Eisenbahn-Inbetriebnahmegenehmigungsverordnung §§ 9-23: EIGV 2018*.
- [73] DIE BAHN (DB), *Betrieblich-technisches Regelwerk*, https://fahrweg.dbnetze.com/fahrweg-de/kunden/nutzungsbedingungen/regelwerke/betrieblich-technisch_regelwerke.
- [74] Generaldirektion Mobilität und Verkehr, *Zulässige Höchstmaße und -gewichte für Lkw, Busse und Reisebusse 1996*.
- [75] DAS EUROPÄISCHE PARLAMENT UND DER RAT DER EUROPÄISCHEN UNION, *RICHTLINIE 2009/30/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 23. April 2009 zur Änderung der Richtlinie 98/70/EG im Hinblick auf die Spezifikationen für Otto-, Diesel- und Gasölkraftstoffe und die Einführung eines Systems zur Überwachung und Verringerung der Treibhausgasemissionen sowie zur Änderung der Richtlinie 1999/32/EG des Rates im Hinblick auf die Spezifikationen für von Binnenschiffen gebrauchte Kraftstoffe und zur Aufhebung der Richtlinie 93/12/EWG 2009*.
- [76] DAS EUROPÄISCHE PARLAMENT UND DER RAT DER EUROPÄISCHEN UNION, *RICHTLINIE 2014/94/EU DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 22. Oktober 2014 über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe 2014*.
- [77] DAS EUROPÄISCHE PARLAMENT UND DER RAT DER EUROPÄISCHEN UNION, *RICHTLINIE 2014/94/EU DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 22. Oktober 2014 über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe 2014*.
- [78] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, *Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung: StVZO 2012*.
- [79] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, *Verordnung über die Zulassung von Fahrzeugen zum Straßenverkehr: Fahrzeug-Zulassungsverordnung - FZV 2011*.
- [80] Bundesnetzagentur, *Bundesnetzagentur - Marktstammdatenregister*, Bonn, https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/Monitoringberichte/Marktstammdatenregister/MaStR_node.html **2021**.
- [81] J. Thiele, J. Wiehe, et al., *Konkretisierung von Ansatzpunkten einer naturverträglichen Ausgestaltung der Energiewende, mit Blick auf strategische Stellschrauben: „Naturverträgliche Ausgestaltung der Energiewende“ (EE100-konkret)*, BfN-Skripten, Vol. 614, Bundeamt für Naturschutz, Bonn **2021**.
- [82] Marian Bons, Martin Jakob, Thobias Sach, Dr. Corinna Klessmann, *Analyse der Flächenverfügbarkeit für Windenergie an Land post-2030: Ermittlung eines Verteilungsschlüssels für das 2-%-Flächenziel auf Basis einer Untersuchung der Flächenpotenziale der Bundesländer*, Berlin **2022**.
- [83] Landesamt für Geoinformation Sachsen (GeoSN), *Offene Geodaten: Downloadbereich DLM 50*, Dresden, <https://www.geodaten.sachsen.de/downloadbereich-dlm50-4170.html>.
- [84] Deutsche WindGuard GmbH, *Status des Windenergieausbaus an Land in Deutschland: Erstes Halbjahr 2022*.
- [85] Planungsverband Region Chemnitz, *Sachlichen Teilregionalplans Wind: Regionales Windenergiekonzept 2021*.
- [86] Internationales Wirtschaftsforum Regenerative Energien (IWR) / IWR.de GmbH, *Sachsen: Windenergie Ausbau: Windenergie Zubau in Sachsen im Jahr 2022*, Münster, <https://www.windbranche.de/windenergie-ausbau/bundeslaender/sachsen?jahr=2022> **2022**.
- [87] J. Amme, *Der Photovoltaik- und Windflächenrechner - Geodaten Potenzialflächen*, Zenodo **2022**.
- [88] Edmund Langer, *Freiflächen-Photovoltaikanlagen: Leitfaden*, Straubing **03/23**.

- [89] Übertragungsnetzbetreiber: 50Hertz Transmission GmbH, Amprion GmbH, TenneT TSO GmbH, TransnetBW GmbH, *Netzentwicklungsplan Strom 2037/2045, zweiter Entwurf 2023*.
- [90] inetz GmbH, *Strukturdaten Strom im Netzgebiet von inetz: § 17 Abs. 2 StromNZV 2021*, <http://www.inez.de/startseite/netzstrukturdaten/>.
- [91] ForWind & Öko-Institut, *Generische Einspeisezeitreihen der Onshore-Windenergie auf Bundeslandebene für Deutschland im Zeitraum 2020 bis 2050 2016*.
- [92] acatech/Leopoldina/Akademienunion, *Wie kann der Ausbau von Photovoltaik und Windenergie beschleunigt werden? 2022*.
- [93] M. Willuhn, *Photovoltaik-Flächennutzung der Bundesländer – AEE zieht Bilanz*, <https://www.pv-magazine.de/2023/02/16/photovoltaik-flaechennutzung-der-bundeslaender-ae-zieht-bilanz/> **2023**.
- [94] Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen, *Marktstammdatenregister*, www.marktstammdatenregister.de **2023**.
- [95] J. Giesecke, S. Heimerl, E. Mosonyi, *Wasserkraftanlagen – Planung, Bau und Betrieb*, Berlin, Heidelberg, New York **2024**.
- [96] Kraftfahrt-Bundesamt, *Verkehr in Kilometern (VK): Zeitlinie 2022*.
- [97] Kraftfahrt-Bundesamt, *Fahrzeugzulassungen (FZ): Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Zulassungsbezirken*, Flensburg **2020**.
- [98] Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), *dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität: Eine gesamtgesellschaftliche Aufgabe*, https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2021/Abschlussbericht_dena-Leitstudie_Aufbruch_Klimaneutralitaet.pdf **2021**.
- [99] M. Wietschel, T. Gnann, *Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland: Treibhausgasneutrale Szenarien T45 - Webinar Verkehr*, Webinar **2022**.
- [100] IEA - International Energy Agency, Clingendael International Energy Programme (CIEP), *Hydrogen in North-Western Europe: A vision towards 2030 2021*.
- [101] Hydrogen Power Storage & Solutions e.V., *HYPOS - Wasserstoffregion Mitteldeutschland*, <https://www.hypos-germany.de/ueber-uns/wasserstoffregion/>.
- [102] ONTRAS Gastransport GmbH, *Green Octopus Mitteldeutschland: Gründer Wasserstoff für Industrieregion*, <https://www.ontras.com/de/go>.
- [103] GASCADE Gastransport GmbH, *Flow - making hydrogen happen: Leitungsnetz für Wasserstoff*, <https://www.flow-hydrogen.com/>.
- [104] Vereinigung der Fernleitungsnetzbetreiber Gas e.V., *FNB Gas - Wasserstoff Kernnetz*, <https://fnb-gas.de/wasserstoffnetz-wasserstoff-kernnetz/>.
- [105] VNG AG, *Energiepark Bad Lauchstädt: Wasserstoffspeicherung & -transport*, <https://energiepark-bad-lauchstaedt.de/technisches-konzept/wasserstoffspeicherung-transport/>.
- [106] Pichelmaier, Dr. Simon et al., *Beitragsreihe Wasserstoff Deep Dives: Elektrolyseur-Betriebsweisen*, München, <http://www.ffe.de/veroeffentlichungen/beitragsreihe-wasserstoff-deep-dives-elektrolyseur-betriebsweisen/> **2023**.
- [107] European Energy Exchange AG, *Marktdaten Strom, Futures*, <https://www.eex.com/de/marktdaten/strom/futures>.
- [108] first energy, *Strompreis - eine Übersicht der aktuell gültigen Steuern, Abgaben & Umlagen*, <https://first-energy.net/energieeinkauf/steuern-und-abgaben>.
- [109] A. e. a. Appel, *Netzdienliche Integration von Elektrolyseuren*, <https://www.vde.com/resource/blob/2226594/279eeee65a48407ecbd2227be6f190e9/netzdienliche-integration-von-elektrolyseuren-data.pdf> **2022**.
- [110] TÜV SÜD Zertifizierungsstelle "Klima und Energie", *TÜV SÜD Standard CMS 70: Erzeugung von Grünem Wasserstoff (GreenHydrogen) Version 11/2021*, https://www.tuvsud.com/de-de/-/media/de/industry-service/pdf/broschueren-und-flyer/is/energie/tv-sd-standard-cms-70_grund--und-zusatzanforderungen-deutsch-englisch.pdf **2021**.

- [111] Europäisches Parlament und Rat, *Richtlinie (EU) 2018/2001 des Europäischen Parlaments und des Rates zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen: RED II; 2018/2001* **2018**.
- [112] TÜV Süd, *Biogasanlagen (TÜV Süd Standard IS-TAF 410): Gastechische Sicherheit, Belüftung von Räumen* **2010**, <http://www.netinform.net/GW/files/pdf/Schulz1.pdf> (28.02.2014).
- [113] TÜV Rheinland, *TUV RHEINLAND Standard H2.21 Carbon-Neutral Hydrogen: [Version 1.0 / July 2021]*, https://www.tuv.com/content-media-files/master-content/global-landingpages/images/hydrogen/tuv-rheinland-hydrogen-standard-h2.21_v1.0-en.pdf **2021**.
- [114] *CertifHy*, <https://www.certifhy.eu/>.
- [115] Bundesregierung, *Klimaschutzgesetz: Klimaneutralität bis 2045*, <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/klimaschutzgesetz-2021-1913672> **2021**.
- [116] Bundesregierung, *Siebenunddreißigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung zur Anrechnung von strombasierten Kraftstoffen und mitverarbeiteten biogenen Ölen auf die Treibhausgasquote): 37. BImSchV* **2017**.
- [117] Bundesregierung, *Achtunddreißigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung zur Festlegung weiterer Bestimmungen zur Treibhausgasminde rung bei Kraftstoffen): 38. BImSchV* **2017**.
- [118] DIN Deutsches Institut für Normung, *DIN EN ISO 14040:2009-11, Umweltmanagement_ - Ökobilanz_ - Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO_14040:2006); Deutsche und Englische Fassung EN_ISO_14040:2006*, Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [119] DIN Deutsches Institut für Normung, *DIN EN ISO 14067:2019-02, Treibhausgase_ - Carbon Footprint von Produkten_ - Anforderungen an und Leitlinien für Quantifizierung (ISO_14067:2018); Deutsche und Englische Fassung EN_ISO_14067:2018*, Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [120] H2zwo e.V., *Wertschöpfungspotenziale von Wasserstoff für Sachsen*, https://hzwo.eu/media/HZwo_Wasserstoffstudie-Sachsen_04-2021.pdf **2021**.
- [121] Wirtschaftsförderung Sachsen, *Firmendatenbank Wirtschaftsförderung Sachsen*, <https://firmen.standort-sachsen.de/company/de/>.
- [122] Statistisches Landesamt des Freistaates Sachsen, *Statistischer Bericht: Branchenreport Industrie im Freistaat Sachsen, Kernergebnisse, Tabellenband* **2020**.