Zukunfts werkstatt Lausitz

Ein Projekt der Wirtschaftsregion Lausitz GmbH

Wasserstoffwirtschaft in der Lausitz

Perspektiven und Potentiale einer sektoren-übergreifenden Wasserstoffwirtschaft in der Wirtschaftsregion Lausitz

STUDIE

PERSPEKTIVEN UND POTENTIALE EINER SEKTOREN-ÜBERGREIFENDEN WASSERSTOFFWIRTSCHAFT IN DER WIRTSCHAFTSREGION LAUSITZ

Kratzsch, A.[1]; Krautz, H-J [2]; Schmidt, S.[1]; Hilse, H.[1]; Vogel, C.[1]; Günther, T.[1]; Stein, J.[1]; Bretschneider, F.[1]; Scholz, S.[1]; Tiedemann, R.[2]; Lisk, A.[2]

[1] Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU,

Kunststoffzentrum Oberlausitz, Zittau

[2] Centrum für Energietechnologie Brandenburg CEBra e.V., Cottbus

März 2020

Versionsnr.: 2

Kurzfassung

Der Ausstieg aus der Kohleverstromung als wesentliche Maßnahme zur Erreichung der Klimaziele der Bundesregierung führt zu einem der anspruchsvollsten Transformationsprozesse der vergangenen Jahrzehnte in Deutschland. Von den kohlefördernden Regionen ist die Lausitz davon besonders betroffen, da die Stromerzeugung aus Braunkohle hier den wichtigsten Wirtschaftszweig und somit die Lebensgrundlage vieler Menschen bildet.

Diese Herausforderung eröffnet der Lausitz aber auch gleichzeitig eine große Chance zur Entwicklung dieser hin zu einer Modellregion für Wasserstoff (H2) als wichtiger Energieträger der Zukunft. Wesentliche Schwerpunktthemen hier müssen die Produktion von H2-Systemen (z. B. Brennstoffzellen, Elektrolyseure, Speicher), Energieerzeugung aus H2 (zentral, dezentral) und H2-basierte Mobilität sein. Die Entwicklung dieser Themen in der Region kann zur Erschließung und Etablierung neuer Wirtschaftszweige und somit zu einem erfolgreichen und nachhaltigen Strukturwandel beitragen.

Ziel der vorliegenden Studie ist es, Potentiale und Perspektiven einer sektorenübergreifenden Wasserstoffwirtschaft in der Lausitz für den Zeitraum 2020 - 2050 zu analysieren und damit eine Entscheidungsgrundlage für Politik, Industrie und Forschung bereitzustellen.

In einem ersten Ergebnis der Studie zeigt sich, dass bereits eine Vielzahl von Lausitzer Akteuren, Projekten und Initiativen im Bereich Wasserstoff vorhanden sind (z. B. Referenzkraftwerk Lausitz, Reallabor Lausitz, Fraunhofer Hydrogen Lab Görlitz, H2- und Speicher-Forschungszentrum, Innovationscampus Siemens Görlitz, Modellregion WALEMO).

Weiterhin lässt sich feststellen, dass Wasserstoff in allen Bereichen (stoffliche, mobile und stationäre energetische Nutzung) hohe Nutzungspotentiale für die Lausitz aufweist (H2-Bedarfe: ca. 160.000 t/a in 2030; ca. 700.000 t/a in 2040; 1.150.000 t/a in 2050). Die hohen Potentiale resultieren im Wesentlichen aus den Wasserstoffbedarfen zukünftiger H2-Speicherkraftwerke an den Lausitzer Kraftwerksstandorten sowie aus einer H2-basierten dezentralen Wärmeversorgung und energieintensiven Industrie (z.B. Roheisenherstellung). Ebenfalls wird der private und öffentliche Verkehrssektor durch den Betrieb von H2-Fahrzeugen zukünftig zu einem hohen Nutzungspotential beitragen.

Ein weiteres Ergebnis der Studie ist, dass sich der zukünftige Bedarf an Wasserstoff in der Lausitz nicht allein mittel Elektrolyse und Strom aus erneuerbaren Energien decken lassen wird. Hierfür sind weitere Maßnahmen erforderlich, wie etwa der Import von Wasserstoff in die WRL oder die Nutzung von Erdgas zur Erzeugung von CO2-neutralem Wasserstoff (blauer bzw. türkiser Wasserstoff). Darüber hinaus ist für die ökonomisch tragfähige Erzeugung von Wasserstoff eine umfangreiche Anpassung der regulatorischen Rahmenbedingen notwendig.

Die Studie zeigt darüber hinaus, dass sich durch eine zukünftig starke Lausitzer Wasserstoffwirtschaft vielfältige Chancen für die Sicherung von bestehenden und durch den Strukturwandel bedrohten aber auch die Schaffung neuer und innovativer Arbeitsplätze ergeben werden. Allein durch die Ansiedelung neuer oder Entwicklung bestehender Unternehmen mit dem Fokus auf die Produktion von H2-Anlagen und -Systemen wäre der Erhalt von bis zu ca. 83 % (2050) der vom Strukturwandel betroffenen Arbeitsplätzen in der Lausitz möglich. Zudem würden sich auch durch den Betrieb von H2-Systemen und durch eine intensive Forschung und Entwicklung in den regionalen Forschungseinrichtungen zum Thema Wasserstoff weitere umfangreiche Arbeitsplatzpotentiale ergeben.

Im Abschluss der Studie werden Handlungsempfehlungen und ausgewählte Projektideen zum Aufbau und der nachhaltigen Etablierung einer zukünftigen Wasserstoffwirtschaft in der WRL definiert und dargestellt.

Inhalt

Einleitung 6
Ziele der Studie 6
Strukturierung der Studie 6

Die Wirtschaftsregion Lausitz 7
Lage, Infrastruktur, Wirtschaft 7
WRL-Akteure im Bereich Wasserstoff 10
Aktuelle Projekte und Vernetzungen 11

Potentiale für eine Wasserstoffwirtschaft in der WRL 12
Grundsätzliche Betrachtungen 12
Wasserstoff 12
Wasserstoffherstellung 12
Wasserstoffwirtschaft 13
Sektorenkopplung 13
Potentiale zur Nutzung von Wasserstoff in der WRL 14
Mobile energetische Nutzung 15
Stoffliche Nutzung 25
Stationäre energetische Nutzung 30
Wasserstoffverbrauch in der WRL 38
Potentielle Standorte für Elektrolyseure zur Erzeugung von H2 in der WRL 40
Hauptkriterium Strom 41
Hauptkriterium H2-Verbrauchsschwerpunkte 42
Hauptkriterium Transport/Verteilung 43
Potentielle H2-Bereitstellungsstandorte in der WRL 44
Verfügbare EE-Kapazitäten für die Wasserstoffelektrolyse in der WRL 46
Ausfallarbeit 46
EEG-freie Windanlagen 47
Transport/Verteilung 49
Allgemein 49
Transportmengen; Transportwege und Verkehrssituation in der WRL 49
H2-Tankstelleninfrastruktur 52
Wertschöpfungs- und Arbeitsplatzpotentiale 54
Elektrolyseure 54
Brennstoffzellen 55
Druckgasspeicher 56
Zusammenfassung und Diskussion 57
Gesellschaftliche Akzeptanz 58

Handlungsempfehlungen und -maßnahmen zum Aufbau sowie zur langfristigen Etablierung einer H2-Wirtschaft in der WRL 60
Schlussfolgerungen aus der Potentialanalyse und externen Studien 60
Handlungsempfehlungen und -maßnahmen für die WRL 62
Projektideen zur Entwicklung einer Wasserstoffwirtschaft in der WRL 63
Kurzfristige Projektideen 63
Mittelfristige Projektideen 65
Langfristige Projektideen 69

Roadmap - Die Entwicklung der Lausitz hin zu einer H2-Modellregion 71

Abkürzungsverzeichnis 73

Literatur- und Quellenverzeichnis 74

Einleitung

Der aus den gesteckten Klimazielen der Bundesregierung resultierende Ausstieg aus der Kohleverstromung ist einer der anspruchsvollsten Transformationsprozesse der vergangenen Jahrzehnte in Deutschland. Aufgrund dessen werden auf nationaler Ebene Maßnahmen getroffen und Förderungen bereitgestellt, um die vom Kohleausstieg betroffenen Regionen, darunter auch den in den Bundesländern Sachsen und Brandenburg liegenden Teil der Lausitz, zu unterstützen. Dabei soll die Lausitz – anknüpfend an die Stärken und die industrielle Tradition – von einer Energieregion hin zu einer Innovationsregion mit neuer Perspektive entwickelt werden. Damit ist die große Chance gegeben, die Lausitz für die Zukunft neu aufzustellen, neue Wirtschaftsbereiche zu erschließen und gemeinsam mit den Bürgern sowie gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Akteuren das Leitbild weiter zu entwickeln.
Unter Experten herrscht Konsens darüber, dass die Klimaziele ohne die Einführung neuer Technologien in den unterschiedlichen emissionsintensiven Sektoren – wie Energie, Industrie und Mobilität – im avisierten Zeithorizont kaum realisierbar sind. Große Potentiale für die Zukunft bergen hier die vielfältigen Optionen der Nutzung von Wasserstoff (H2). Darüber hinaus bietet die Anwendung von H2 als Energieträger umfangreiche industriepolitische Chancen zur Schaffung neuer Wertschöpfungsketten bzw. zur Erschließung alternativer exportgetriebener Wirtschaftszweige.

Ziele der Studie

Aufgrund der großen Chancen in Bezug auf Wasserstofftechnologien werden in der Strukturwandelregion bzw. Wirtschaftsregion Lausitz (WRL) der Aufbau und die langfristige Etablierung einer Lausitzer Wasserstoffwirtschaft bereits intensiv diskutiert und vorangetrieben. Insbesondere stehen hierbei die regionale Erzeugung, der Transport und die möglichst flächendeckende Nutzung von Wasserstoff sowie die Produktion von H2-Technologien und -Systemen im Fokus.
Die vorliegende Studie hat zum Ziel, die Perspektiven und Potentiale einer sektorenübergreifenden Wasserstoffwirtschaft in der Wirtschaftsregion Lausitz zu analysieren und damit eine Basis für eine zukünftige H2-Lausitz und mithin als Entscheidungsgrundlage für Akteure in Politik, Industrie und Forschung zu legen.

Umfangreiche Analysen zu Wirtschaftlichkeit und Rahmenbedingungen im Bereich Wasserstoff sind nicht bzw. nur zum Teil Gegenstand dieser Studie, da diese Themen zum einen vorrangig eine überregionale bzw. nationale Betrachtungsweise voraussetzen. Zum anderen sind bereits eine Vielzahl von Studien zu diesen Themen vorhanden u.a. /7/, /19/, /35/.

Strukturierung der Studie

Die Studie gliedert sich im Wesentlichen in vier Kapitel. Zunächst wird auf die Wirtschaftsregion Lausitz im Allgemeinen sowie auf aktuelle Akteure, Projekte und Initiativen sowie Vernetzungen im Bereich Wasserstoff eingegangen. Entsprechend der Fokussierung der Studie folgt danach die Analyse der Potentiale für eine zukünftige Wasserstoffwirtschaft (Nutzung, Erzeugung, Verteilung/Transport, Wertschöpfung und Arbeitsplätze, Akzeptanz) in der Lausitz.[1] Abschließend werden Handlungsempfehlungen und -maßnahmen sowie Projektideen genannt, mit welchen sich die analysierten Potentiale größtmöglich ausschöpfen lassen bzw. welche zum Aufbau sowie der langfristigen Etablierung einer Wasserstoffwirtschaft in der WRL notwendig sind.

[1] Bei der Herstellung von Wasserstoff in der WRL wird vorrangig die Erzeugung von CO2-freiem Wasserstoff per Elektrolyse betrachtet. Der Grund hierfür ist z. B., da damit im Gegensatz zu anderen Wasserstofferzeugungsarten ein entscheidender Beitrag zur Netzstabilität geleistet werden kann. Damit wird allerdings nicht ausgeschlossen, dass andere Erzeugungsarten von Wasserstoff für die Deckung des H2-Bedarfs in der Lausitz im großen Maßstab Verwendung finden können.

Die Wirtschaftsregion Lausitz

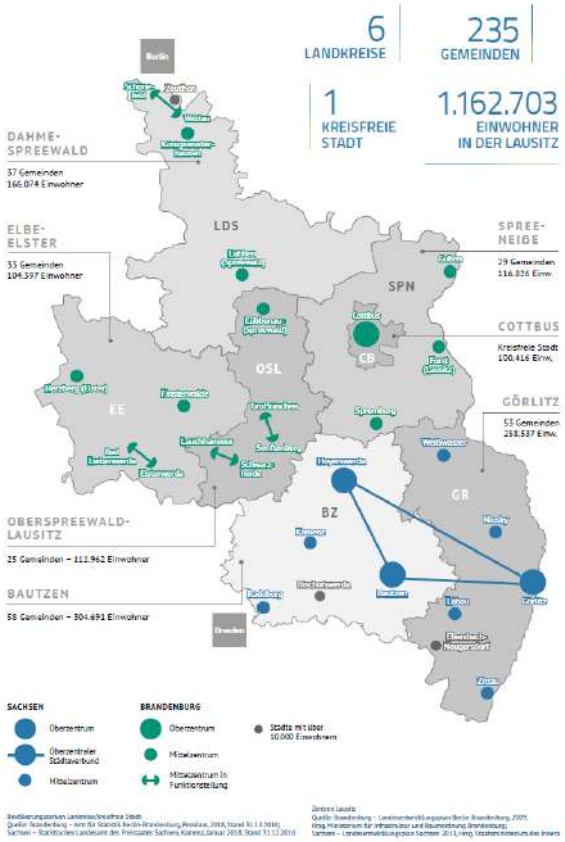
Die Wirtschaftsregion Lausitz definiert sich als länderübergreifende Region in Südbrandenburg und Ostsachsen. Sie umfasst die brandenburgischen Landkreise (LK) Dahme-Spreewald, Elber-Elster, Oberspreewald-Lausitz, Spree-Neiße und die kreisfreie Stadt Cottbus sowie die sächsischen Landkreise Bautzen und Görlitz (s. Grafik 1). Im brandenburgischen Teil der WRL bildet Cottbus das Oberzentrum. Die sächsischen Städte Görlitz, Bautzen und Hoyerswerda bilden einen oberzentralen Städteverbund (in Funktionsergänzung). Die Oberzentren sind in beiden Ländern von weiteren Mittelzentren umgeben.

Lage, Infrastruktur, Wirtschaft

Die Fläche der WRL beträgt 11.727 km². Dies entspricht einem Anteil von ca. 3,3 % an der Gesamtfläche der Bundesrepublik Deutschland. Der sächsische Landkreis Bautzen ist der flächenmäßig größte Landkreis in der WRL. Es folgt der brandenburgische Landkreis Dahme-Spreewald (s. Tabelle 1).

Die WRL ist eine vergleichsweise dünn besiedelte Region. Im Schnitt ist die Bevölkerungsdichte um knapp ein Drittel geringer als im bundesdeutschen Durchschnitt (237 Einwohner/km², /3/). Die hier lebenden Menschen stellen nur ca. 1,39 % der gesamtdeutschen Bevölkerung (Ende 2018 ca. 83.000.000, /3/) dar. Der sächsische Teil der Lausitz ist innerhalb der WRL, neben Cottbus als Oberzentrum, am dichtesten besiedelt. Die meisten Einwohner hat der Landkreis Bautzen, gefolgt vom Landkreis Görlitz (s. Tabelle 2).

Die Bevölkerung der WRL hat sich in den letzten beiden Jahrzehnten stetig um etwa 22 % von 1.288.000 Menschen in 1995 /3/ auf knapp 1.152.000 in 2018 verringert /4/, /5/. Die diesem Trend folgende weitere demografische Entwicklung stellt die WRL u. a. hinsichtlich der Verfügbarkeit von Arbeits- und Fachkräften vor große Herausforderungen.



Grafik 1
Verwaltungsgliederung der WRL /1/

Tabelle 1
Fläche der Landkreise der WRL /3/

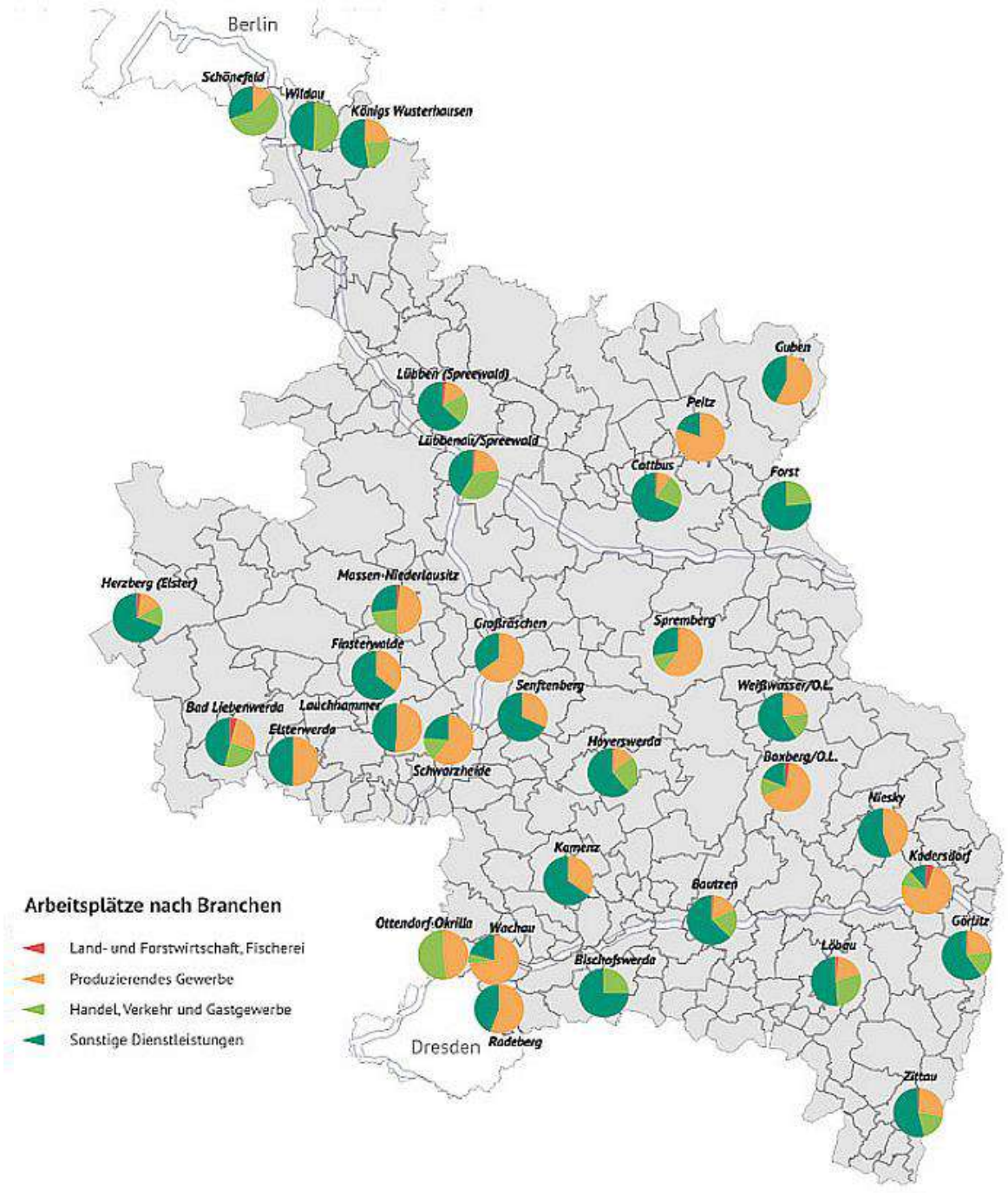
Landkreis	LK	Fläche [km²]
Görlitz	GR	**2.111**
Bautzen	BZ	**2.396**
Dahme-Spreewald	LDS	**2.274**
Elbe-Elster	EE	**1.900**
Oberspreewald-Lausitz	OSL	**1.223**
Cottbus	CB	**166**
Spree-Neiße	SPN	**1.657**

Tabelle 2
Bevölkerung der WRL zum Stand 2018 /4/ /5/

LK	Einwohner [Anzahl]	Bevölkerungs-dichte [Einwohner/km²]	Veränderung zum Vorjahr [%]
GR	**254.894**	121	- 0,7
BZ	**300.880**	126	- 0,6
LDS	**169.067**	74	+ 1,0
EE	**102.638**	54	- 0,8
OSL	**110.476**	90	- 0,6
CB	**100.219**	605	- 0,8
SPN	**114.429**	69	+ 0,2
WRL	**1.152.603**	163	- 0,3

Die Wirtschafts- und Industriestruktur der WRL ist traditionell stark geprägt durch die Sektoren Energie und Bergbau. Die Energiewirtschaft spielt bisher nicht zuletzt aufgrund der Braunkohle in der dargestellten Region eine sehr wichtige Rolle. Außerhalb dieser Sektoren ist die Lausitzer Industrie sehr kleinteilig und derzeit noch durch die geringe Präsenz von Hightech-Branchen, öffentlicher Institutionen und großer, wertschöpfungsintensiver Unternehmenssitze geprägt.

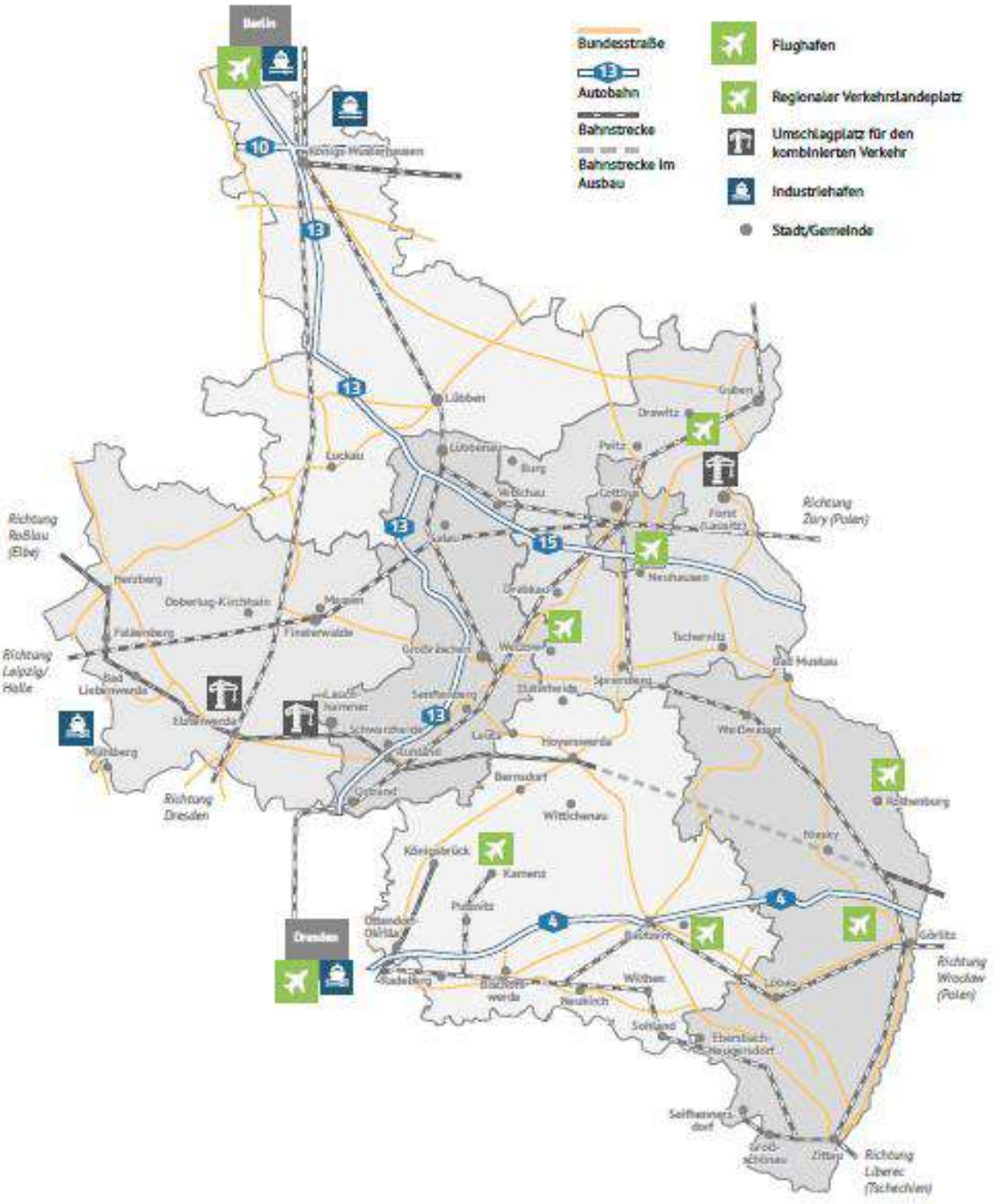
Den Kern der Lausitzer Industrie bilden neben dem Energiesektor die traditionellen Branchen Metall-, Maschinen- und Anlagenbau, Ernäh-



Grafik 2
Arbeitsplätze nach Branchen in der WRL /2/

rungswirtschaft sowie Chemie-/ Kunststofftechnik (s. Grafik 2). Cottbus, Bautzen und Görlitz sind dabei Zentren der Lausitzer Wirtschaft mit Sitz von strukturbestimmenden Unternehmen. Insgesamt verfügt die WRL über einen ausgewogenen Branchenmix, eine vielfältige Wirtschaftsstruktur und einen starken Mittelstand. 2018 waren 413.666 sozialversicherungspflichtige Beschäftigte tätig /1/.

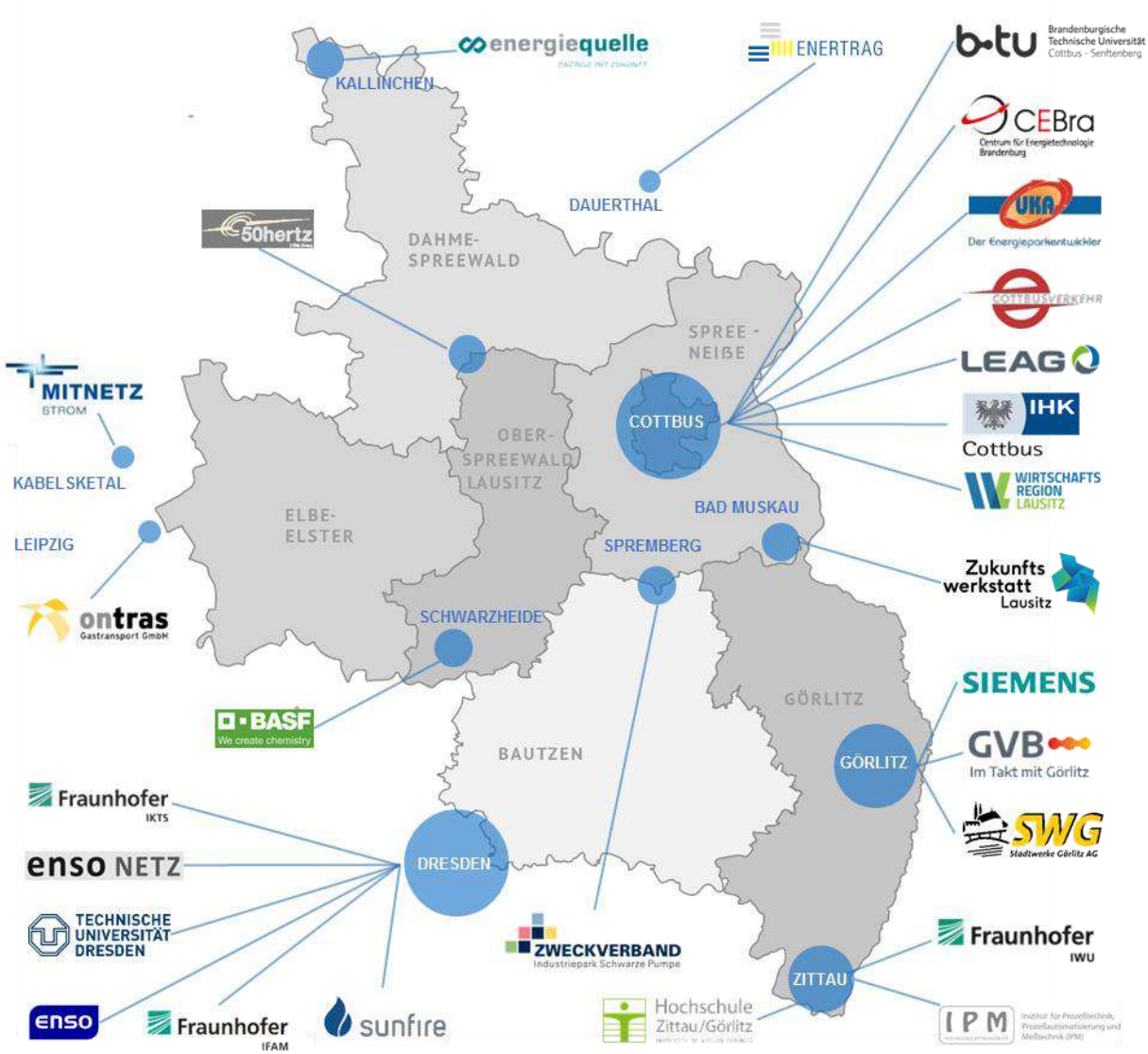
Die WRL ist durch die Bundesautobahnen A4, A13 und A15, Schienennetze und diverse Bundesstraßen erschlossen. Internationale Flughäfen befinden sich angrenzend in Berlin und Dresden (s. Grafik 3).



Grafik 3
Verkehrsinfrastruktur der WRL /1/

WRL-Akteure im Bereich Wasserstoff

In der WRL sind bereits ortsansässige sowie angrenzend tätige Akteure branchenübergreifend im Bereich Forschung, Entwicklung und mit innovativen Anwendungsprojekten zu den Themen Wasserstoff- (H2) und Brennstoffzellen (BZ)-Technologien, Wasserstoffwirtschaft und Sektorenkopplung aktiv. Die Grafik 4 zeigt exemplarisch Forschungseinrichtungen und Unternehmen[2], welche sich im Bereich H2 betätigen, sowie deren Standorte.



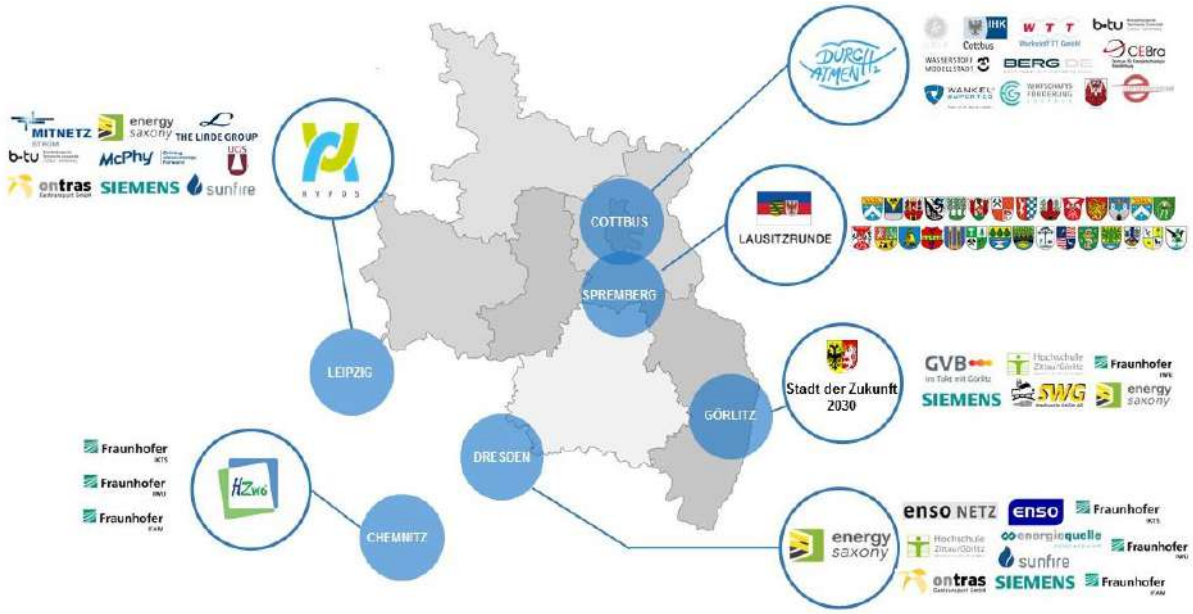
Grafik 4
aktuelle H2-Akteure in der WRL (Stand 2019)

[2] Eine vollständige Darstellung aller Akteure ist in der gewählten Grafik nicht möglich.

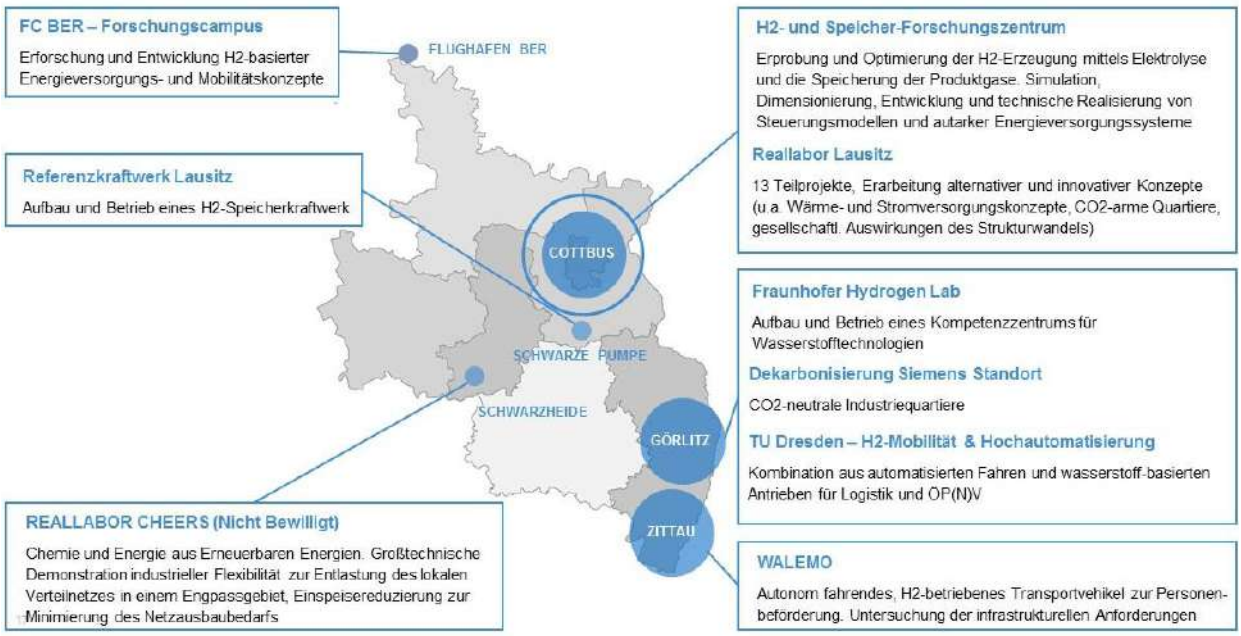
Aktuelle Projekte und Vernetzungen

Viele der derzeitigen H2-Akteure in der WRL sind bereits in verschiedenen Konstellationen miteinander in Kontakt. Es haben sich neben den bestehenden Netzwerken (Hypos, EnergySaxony und dem Cluster HZwo) erste lokale Zusammenschlüsse und Netzwerke zur Erforschung und Etablierung von H2-Technologien, zur Sektorenkopplung und zum Strukturwandel gebildet.

Bisher existiert noch kein länderübergreifendes Wasserstoffnetzwerk, welches die Aktivitäten in der WRL bündelt.



Grafik 5
H2-Netzwerke und Netzwerkbeteiligte



Grafik 6
Derzeit bekannte H2-Projekte und -Projektinitiativen in der WRL (Stand: 2020)

Potentiale für eine Wasserstoffwirtschaft in der WRL

Grundsätzliche Betrachtungen

Wasserstoff

Wasserstoff ist ein unter Normalbedingungen ungiftiges, farb- und geruchsloses Gas. Aufgrund der geringen Dichte verflüchtigt sich Wasserstoff in der Atmosphäre rasch, jedoch bedingt dies auch eine extrem hohe Diffusionsfähigkeit von Wasserstoff durch andere Materialien oder Medien hindurch.

Wasserstoff ist der am häufigsten vorkommende Stoff im Universum. Er bildet trotz seiner geringen Dichte ca. 75 % der gesamten Masse des Universums. Auch auf der Erde kommt Wasserstoff in nahezu unbegrenzter Menge vor. Hier liegt er jedoch ausschließlich in chemisch gebundener Form, z.B. als Wasser (H2O), in den verschiedensten Kohlenwasserstoffen (Erdöl, Erdgas, Kohle, Biomasse usw.) oder in anderen organischen Verbindungen vor. Daher muss Wasserstoff erst unter Einsatz von Energie gezielt hergestellt werden. Wasserstoff ist somit ein kohlenstofffreier Sekundärenergieträger, vergleichbar mit Strom oder Wärme /6/.
Wasserstoff verflüssigt sich erst bei sehr tiefen Temperaturen (< -253 °C). Charakteristisch ist die hervorragende Brennbarkeit, welche Wasserstoff zu einem sehr geeigneten Brenn- und Kraftstoff machen /7/.

Wasserstoffherstellung

Wasserstoff kann mittels verschiedener Verfahren und Ausgangsstoffen hergestellt werden. Diese werden im Nachfolgenden näher erläutert.

Reformierung

Die bisher relevantesten Primär-energiequellen zur Wasserstoffherstellung sind sowohl national als auch global (über 90 %) auf fossile Energieträger zurückzuführen /8/. Durch verschiedene Reformierungsverfahren (Unterscheidung je nach verwendetem Oxidationsmittel) werden die gasförmigen, fossilen Kohlenwasserstoffe und Alkohole in mehreren Schritten in Wasserstoff und weitere Nebenprodukte umgewandelt. Diese Technologien sind industriell etabliert und technisch weit entwickelt.

Elektrolyse

Bei der Elektrolyse wird Wasser in einem Elektrolyseur mit Hilfe von elektrischem Strom in Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt. In Abhängigkeit der eingesetzten Elektrolyt-materialien und der Betriebstemperaturen erfolgt die Einteilung von Elektrolyseuren (s. Grafik 7).

	Temperatur °C	Elektrolyt	Anlagengröße		Wirkungsgrad	Reinheit H_2	Systemkosten	Lebenserwartung	Reifegrad
Alkaline Elektrolyse (AE)	60 – 80	Kaliumhydroxid	0,25 – 760 Nm³ H_2/h	1,8 – 5.300 kW	65 – 82%	99,5% – 99,9998%	1000 – 1200 €/kW	60.000 – 90.000 h	Kommerziell seit 100 Jahren in Industrie genutzt
Proton Exchange Membran Elektrolyse (PEM)	60 – 80	Feststoffmembran	0,01 – 240 Nm³ H_2/h	0,2 – 1.150 kW	65 – 78%	99,9% - 99,9999%	1900 – 2300 €/kW	20.000 – 60.000 h	Kommerziell in mittleren und kleinen Anwendungen (<300 kW)
Anion Exchange Membran Elektrolyse (AEM)	60 – 80	Polymer-Membran	0,1 – 1 Nm³ H_2/h	0,7 – 4,5 kW	k.A.	99,4%	k.A.	k.A.	Kommerziell verfügbar in limitierten Anwendungen
Solid Oxide Elektrolyse (SOE)	700 – 900	Oxidkeramik	Bisher nur Labormaßstab		85% (Labor)	k.A.	k.A.	ca 1.000 h	FuE

Grafik 7
Kenndaten von Elektrolyseuren /7/

Der Wirkungsgrad eines Elektrolyseurs bestimmt sich dabei aus dem Verhältnis zwischen eingesetzter und nutzbarer Energie. Derzeit sind Wirkungsgrade zwischen 60 und 80 % für Wasserelektrolyseure (je nach Verfahren, bezogen auf den Heizwert) möglich.
Je nach Erzeugungspfad wird Wasserstoff mittels verschiedener Farbcodes bezeichnet.

Grauer Wasserstoff

Dieser basiert auf dem Einsatz von fossilen Kohlenwasserstoffen. Maßgeblich für die Produktion von grauem Wasserstoff ist die Dampfreformierung von Erdgas. Seine Erzeugung ist mit erheblichen CO2-Emissionen verbunden /10/.

Blauer Wasserstoff

Ist Wasserstoff, dessen Erzeugung mit einem CO2-Abscheidungs- und -Speicherungsverfahren gekoppelt wird (engl. Carbon Capture and Storage, CCS). Das bei der Wasserstoffproduktion erzeugte CO2 gelangt so nicht in die Atmosphäre und die Wasserstoffproduktion kann bilanziell als CO2-neutral betrachtet werden /10/.

Türkiser Wasserstoff

Ist Wasserstoff, der über die thermische Spaltung von Methan (Methanpyrolyse) hergestellt wird. Anstelle von CO2 entsteht dabei fester Kohlenstoff. Voraussetzungen für die CO2-Neutralität des Verfahrens sind die Wärmeversorgung des Hochtemperatur-reaktors aus erneuerbaren Energiequellen, sowie die dauerhafte Bindung des Kohlenstoffs /10/.

Grüner Wasserstoff

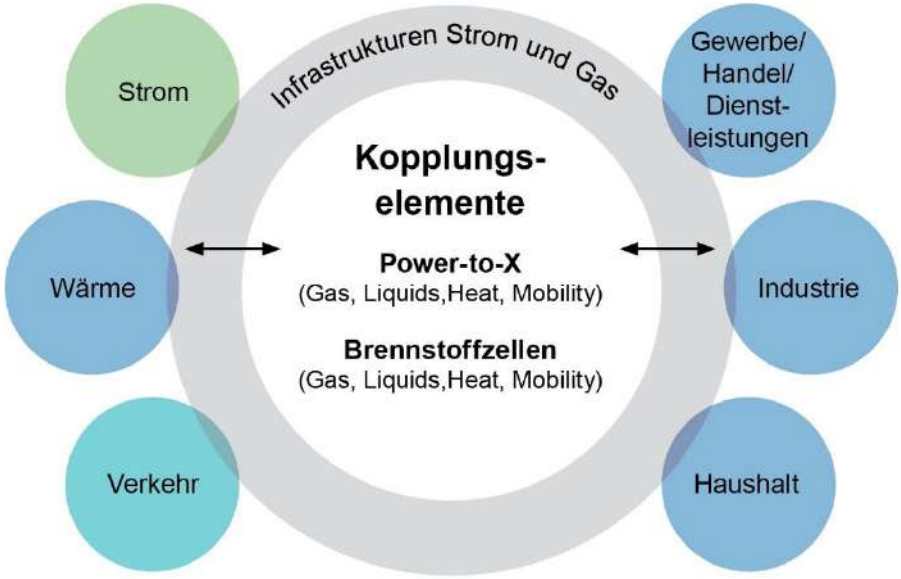
Wird durch Elektrolyse von Wasser hergestellt, wobei für die Elektrolyse ausschließlich Strom aus erneuerbaren Energien zum Einsatz kommt. Unabhängig von der gewählten Elektrolysetechnologie erfolgt die Produktion von Wasserstoff CO2-frei, da der eingesetzte Strom zu 100% aus erneuerbaren Quellen stammt /10/.

Wasserstoffwirtschaft

Unter Wasserstoffwirtschaft wird per Definition eine Energiewirtschaft mit Wasserstoff als Energieträger verstanden. Dabei werden in einer Wasserstoffwirtschaft insbesondere die der heutigen Energiewirtschaft zu Grunde liegenden fossilen Energieträger (vornehmlich Erdölprodukte) durch Wasserstoff ersetzt. Mit der Wasserstoffwirtschaft einher gehen Modelle und Überlegungen zur Sektorenkopplung. Insgesamt existieren unterschiedliche Konzepte für den Aufbau, die Etablierung und die letztendliche Umsetzung einer Wasserstoffwirtschaft. Nationale, regionale und lokale Gegebenheiten führen zu unterschiedlichen Randbedingungen die bezüglich einer potentiellen Umstellung auf eine Wasserstoffwirtschaft zu berücksichtigen sind. So auch für die WRL, wie es im Rahmen dieser Studie skizziert wird.

Sektorenkopplung

Unter Sektorenkopplung wird die systematische Vernetzung der Sektoren Strom, Wärme und Verkehr sowie u. a. der Industrie verstanden (s. Grafik 8). In der Vergangenheit wurden diese Sektoren weitgehend unabhängig voneinander betrachtet. Die Sektorenkopplung spielt eine entscheidende Rolle innerhalb einer möglichen Wasserstoffwirtschaft. Kern der Sektorenkopplung ist der Stromsektor. Es sind verschiedene Kopplungselemente zwischen den Sektoren verfügbar.
Die Sektorenkopplung ermöglicht Synergieeffekte bei der Integration von hohen Anteilen an volatilen erneuerbaren Energien. Sie wird daher als Schlüsselkonzept bei der Wasserstoffwirtschaft, der Energiewende zu erneuerbaren Energien und zur Erreichung der nationalen und internationalen Klimaschutzziele betrachtet.



Grafik 8
Sektorenkopplung /9/

Potentiale zur Nutzung von Wasserstoff in der WRL

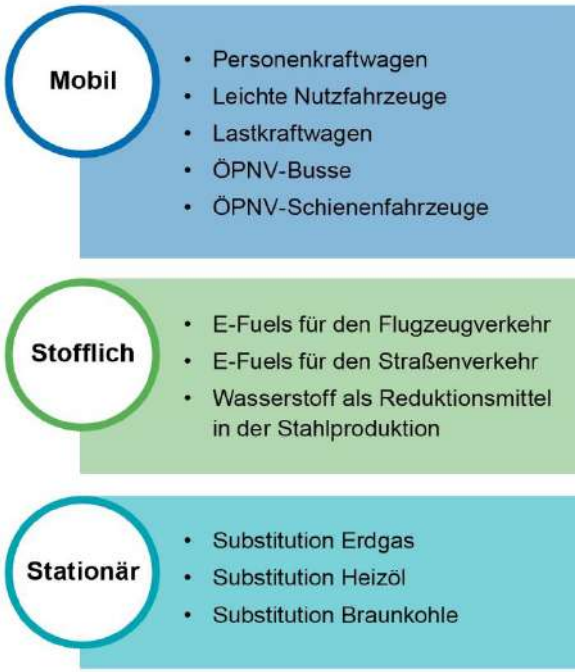
Im vorliegenden Abschnitt wird der potentielle Bedarf an Wasserstoff in der Lausitz für den Zeitraum 2020 - 2050 abgeschätzt. Dabei werden wie in Grafik 8 zu erkennen die Folgenden grundlegenden Nutzungsbereiche untersucht:

- Mobile energetische Nutzung,
- Stoffliche Nutzung,
- Stationäre energetische Nutzung.

Die Abschätzung des H2-Bedarfs im Verkehrssektor wird zum einen im Nutzungsbereich stoffliche Nutzung (Herstellung von synthetischen Kraftstoffen) und zum anderen im Nutzungsbereich der mobilen energetischen Nutzung (Kraftstoff für Brennstoffzellen) durchgeführt.

Für die Potentialabschätzung zum H2-Bedarf in der WRL werden die folgenden grundsätzlichen Annahmen getroffen:

- Konservative bis moderate Betrachtungsweise als solide Basis,
- Betrachtung der WRL und ausgewählter direkt angrenzender Gebiete.



Grafik 9
Potentielle Bereiche der Wasserstoffnutzung in der WRL

Mobile energetische Nutzung

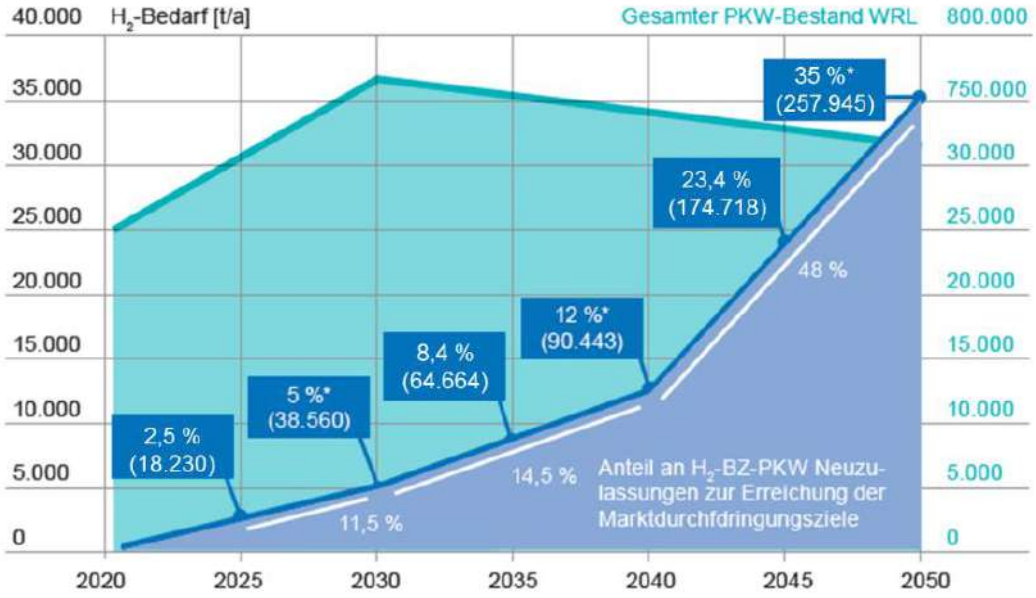
Unter der mobilen energetischen Nutzung wird die Verwendung von Wasserstoff als Treibstoff für Brennstoffzellen im Verkehrssektor verstanden.
Betrachtet werden im Folgenden Personenkraftwagen (PKW), leichte Nutzfahrzeuge (LNFZ), Lastkraftwagen (LKW), ÖPNV-Busse und -Schienenfahrzeuge.
Ausgehend vom jeweiligen Bestand und von Prognosen zur Marktdurchdringung oder politischen Vorgaben wird der Anteil an Brennstoffzellen-Fahrzeugen bis 2050 abgeschätzt. Daraus und aus durchschnittlichen jährlichen Fahrleistungen sowie spezifischen H2-Verbräuchen wird der jeweilige Wasserstoffbedarf in der WRL ermittelt.

Personenkraftwagen

Grafik 10
Brennstoffzellen-PKW

Der Fahrzeugbestand in Deutschland und der WRL wird maßgeblich durch PKW dominiert, sie bilden die anteilsstärkste Fahrzeugklasse. Nach wie vor sind Benzin (2/3 des Bestands) und Diesel (1/3 des Bestands) die häufigsten Kraftstoffarten. Bei den alternativen Antriebsarten, insb. von Elektro- und Hybridfahrzeugen sind jedoch erhebliche Zulassungs- und Bestandssteigerungen zu beobachten. Im Vergleich zu rein batterieelektrischen Fahrzeugen ist der Anteil an Brennstoffzellen-Fahrzeugen sehr gering. Zum Stand 2019 sind 432 Wasserstofffahrzeuge in Deutschland zugelassen /17/. Bezogen auf den Fahrzeugbestand von 47,1 Mio. PKW[3] ist dies lediglich ein Anteil von etwa 0,0009 %.
Eine detailliertere Auflistung nach Zulassungsbezirken und der Antriebsart Wasserstoff ist in den amtlichen Statistiken derzeit noch nicht vorgesehen. Eine Ableitung auf Zulassungszahlen von Wasserstofffahrzeugen für die WRL ist daher nur abschätzbar.
Die in der WRL zugelassene Flotte von PKW besteht derzeit aus etwa 672.540 Fahrzeugen (vgl. KBA 2019). Gemäß KBA wurden zwischen Oktober 2018 und September 2019 in Brandenburg ca. 82.651 PKW neu zugelassen. Im gleichen Zeitraum wurden in Sachsen ca. 149.008 PKW neu zugelassen.
Für das Gebiet der WRL bedeutet dies eine Neuzulassung von 31.471 PKW. Deutschlandweit beträgt die jährliche Neuzulassungsquote 7,4 %[4]. In der WRL ist diese mit 4,7 %[5] etwas geringer.
Emissionsfreie Fahrzeuge können für das Segment der PKW sowohl Wasserstoff/ Brennstoffzellenfahrzeuge als auch rein elektrisch betriebene Fahrzeuge sein.
In den letzten Jahren sind mehrere spezifische Studien über Wasserstoff als Kraftstoff und Energieträger veröffentlicht worden, die Wasserstoff langfristig eine relevante oder sogar bedeutende Rolle im Verkehrssektor einräumen. Für die zukünftige Marktdurchdringung von PKW mit Brennstoffzellen (BZ) bzw. deren Anteil am Bestand existieren verschiedene Prognosen mit teils weiten Prognosespannen von 2 - 35% in 2030 bis zu 10 - 70 % in 2050 /18/.

[3] PKW-Fahrzeugbestand ohne KFZ-Anhänger in Deutschland zum 01.01.2019.
[4] Mittelwert der durchschnittlichen Neuzulassungszahlen von PKW in Deutschland zwischen 2009 und 2019.
[5] Neuzulassungen in den Zulassungsbezirken der WRL bezogen auf den PKW-Bestand zum Stand 2018.



Grafik 11
Prognostizierte Marktdurchdringung [in % und Anzahl], Bestandsentwicklung und Anteil an Neuzulassungen von BZ-PKW sowie Darstellung des resultierenden Wasserstoffbedarfs in der WRL, *…Marktdurchdringung gemäß /42/

Für die Wasserstoffbedarfsabschätzung in der WRL wird sich am moderaten Szenario[6] der Hydrogen Roadmap /42/ orientiert, welche einen Anteil von BZ-PKW am PKW-Bestand in 2030 von ca. 5 %, 2040 von ca. 12 % und 2050 von ca. 35 % prognostiziert. Eine weitere Grundlage der Wasserstoffbedarfs-abschätzung bildet die durchschnittliche PKW-Fahrleistung von 13.727 km/a /12/. Der H2-Verbrauch eines H2-BZ-PKW wird mit durchschnittlich 1 kg/100 km[7] angegeben.
Aus einer angenommenen Marktdurchdringung von 35 % in 2050 resultiert ein Bestand von 257.945 BZ-PKW in der WRL. Um dies unter Bestandsschutz der konventionellen PKW zu erreichen, wäre es ab 2040 notwendig, dass nahezu jeder zweite neu zugelassene PKW ein BZ-PKW ist. Die BZ-PKW generieren in 2050 in der WRL damit einen Wasserstoffbedarf von knapp über 35.000 t (s. Grafik 11).

Derzeit ist vor allem ein gleichberechtigter Ausbau beider Technologien (BZ und batterieelektrischer Antrieb) erforderlich, da sich die verschiedenen Antriebsformen ihre jeweils passende Anwendung noch suchen müssen. In den letzten Jahren hat sich insbesondere die Batterietechnik weiterentwickelt, was für batterieelektrische PKW heute ein breiteres Einsatzspektrum bedingt durch höhere Reichweiten, schnellere Ladezeiten und einer gestiegenen Anzahl an Ladepunkten erlaubt.

Nach diesen Annahmen haben die BZ-PKW in 2050 einen Anteil von ca. 30 - 35 % im Segment der PKW. Die verbleibenden 65 - 70 % setzen sich größtenteils aus rein batterieelektrischen PKW zusammen. Ein geringer Anteil an PKW mit konventionellen Verbrennungsmotoren wird auch in 2050 noch zugelassen sein (Bestand, Oldtimer, usw.).

[6] Szenario „Moderate politische Unterstützung, moderates technologisches Lernen“ wie in /58/ beschrieben.

[7] Mittelwert aus derzeit am Markt verfügbaren BZ-PKW (Herstellerangaben)

Leichte Nutzfahrzeuge

Quelle: Symbio FCell

Grafik 12
Leichtes Nutzfahrzeug mit Brennstoffzelle

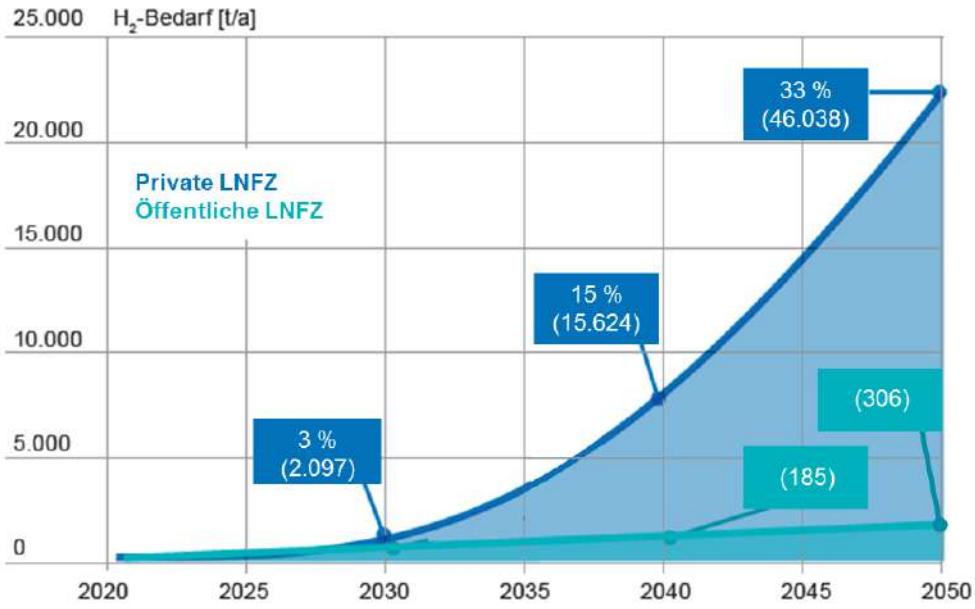
Leichte Nutzfahrzeuge (LNFZ) bis 3,5 t (kleine und mittlere Transporter) bilden eine bedeutende Klasse innerhalb des Nutzfahrzeugsegments, da sie hierin die höchsten Bestandszahlen aufweisen (ca. 75 %). Überwiegender Einsatzbereich /13/ dieser mehrheitlich dieselbetriebenen Fahrzeuge sind Dienstleistungsfahrten und Auslieferungen in urbanen Räumen, im Nahverkehr und vereinzelt auch für Langstrecken.

Die in der WRL zugelassene Flotte von leichten Nutzfahrzeugen besteht derzeit aus etwa 53.992 Fahrzeugen (vgl. /12/). Zwischen September 2018 und August 2019 wurden in Brandenburg ca. 8.509 LNFZ[8] neu zugelassen. Im gleichen Zeitraum wurden in Sachsen ca. 14.727 LNFZ[9] neu zugelassen. Das bedeutet für die WRL 4.304 Neuzulassungen von LNFZ, was einem Anteil von etwa 8,0 % des Bestandes entspricht.

Im Schnitt sind die Zulassungszahlen von LNFZ in den letzten Jahren bundesweit konstant gestiegen.

Tabelle 3
Vorgaben der Clean Vehicle Directive (CVD) für die Beschaffung von leichten Nutzfahrzeuge der Klasse N1

Quote für die Beschaffung von…	08/2021 – 12/2025	01/2026 – 12/2030
„emissions**arme** Fahrzeuge“	38,5 %	38,5 %
davon „emissions**freie** Fahrzeuge“	19,25 %	19,25 %



Grafik 13
Prognostizierte Marktdurchdringung [in % und Anzahl] für private und kommunale BZ-LNFZ sowie Darstellung des resultierenden Wasserstoffbedarfs in der WRL

[8] Anzahl der Lkw-Neuzulassungen in Deutschland von September 2018 bis September 2019 nach Bundesländern /12/ und eigene Berechnungen.

[9] Anzahl der Lkw-Neuzulassungen in Deutschland von September 2018 bis September 2019 nach Bundesländern /12/.

Die Vergabe öffentlicher Aufträge für die Beschaffung von leichten Nutzfahrzeugen ist ab 2021 durch Beschaffungsquoten der Clean Vehicle Directive (CVD) auf europäischer Ebene geregelt. Diese sieht vor, dass von 2021 bis 2030 38,5 % der neu zu beschaffenden Fahrzeuge „sauber“, also emissionsarm sein müssen (s. Tabelle 3).

Emissionsfreie Fahrzeuge können für das Segment der LNFZ sowohl Brennstoffzellenfahrzeuge als auch rein elektrisch betriebene Fahrzeuge sein. Hinsichtlich des Fahrzeuggewichts, der Zuladung und der typisch notwendigen Reichweiten sind beide Technologien einzeln, als auch in Kombination einsetzbar.

Nach gegenwärtigem Trend werden zunehmend bisher rein elektrisch betriebene leichte Nutzfahrzeugmodelle um H2-Brennstoffzellensysteme erweitert, um somit die Reichweite der Fahrzeuge zu erhöhen (sog. Range Extender). Erste derartige Fahrzeuge[10] haben bereits die Serienreife erlangt.

Für die Wasserstoffbedarfsabschätzung erfolgt die Orientierung an der DENA Leitstudie „Woher kommt der Wasserstoff in Deutschland bis 2050?“ /58/. Es wird davon ausgegangen, dass sich im Segment der emissionsfreien LNFZ bis 2050 eine nutzprofilgerechte Aufteilung von etwa 33 % BZ-Fahrzeuge (inkl. Fahrzeuge mit Range Extender) und etwa 66 % rein batterieelektrisch betriebene Fahrzeuge einstellen wird. Die Basis zur Abschätzung der Marktdurchdringung von LNFZ mit Brennstoffzellenantrieb bis 2030 bildet die Beschaffungsrichtlinie der CVD, welche sich unter Annahme einer nahezu linearen Fortführung der Beschaffungsquoten bis 2050 wie folgt entwickelt: ab 2031: 25 %; ab 2036: 30 %.

Des Weiteren wird angenommen, dass Beschaffungsquoten zukünftig auch für private emissionsfreie LNFZ eingeführt werden: ab 2026: 12 %, ab 2031: 22 %, ab 2036: 36 %, ab 2041: 50 %.

Eine weitere Grundlage der Wasserstoffbedarfsabschätzung bildet der H2-Verbrauch der Fahrzeuge. Der durchschnittliche H2-Verbrauch eines BZ-LNFZ wird mit 2,5 kg/ 100 km angegeben /18/.

Wird der Wasserstoffbedarfsermittlung (s. Grafik 13) lediglich die CVD und fortgeführte CVD bis 2050 als Basis zu Grunde gelegt, welche sich nur auf die Beschaffung LNFZ nach öffentlichen Vergaberichtlinien beschränkt, ergibt sich ein differenziertes Bild des Wasserstoffbedarfs. In diesem Bereich ist der Anteil des betreffenden Fahrzeugbestands (306 Fahrzeuge in 2050) nur gering, woraus lediglich ein geringer Wasserstoffbedarf von wenigen Tonnen pro Jahr (ca. 76 t/a in 2050) resultiert.

Der Wasserstoffbedarf in der WRL steigt hingegen schnell und stark an, sobald Beschaffungsquoten auch für privatwirtschaftlich beschaffte emissionsfreie LNFZ eingeführt werden. Deren Einfluss auf den Wasserstoffbedarf ist aufgrund der aktuell wesentlich höheren Bestands- (ca. 54.000 Fahrzeuge) und Neuzulassungszahlen enorm. Der Wasserstoffbedarf wird fortan durch die privaten LNFZ dominiert und führt zu einer jährlichen Wasserstoffbedarfsmenge von bis zu über 22.500 t in 2050.

Lastkraftwagen und Abfallsammelfahrzeuge

Quelle: Agencja Fotograficzna Caro; Hyundai

Grafik 14
LKW mit Brennstoffzelle

Lastkraftwagen (LKW) und Abfallsammelfahrzeuge (ABSF) werden heute fast ausschließlich als Dieselfahrzeuge angeboten. Im Unterschied zum PKW-Bestand variiert der LKW-

[10] Z. B. Renault Kangoo Z.E. H2: verfügbar seit 2014 in Frankreich, ab 2019 auch in Deutschland

Bestand deutlich hinsichtlich des Gewichts der Fahrzeuge. Das zulässige Gesamtgewicht reicht von 3,5 t bei kleineren Transportfahrzeugen bis 40 t bei Sattelzügen. Die in der WRL zugelassene LKW-Flotte (ohne land-/forstwirtschaftliche Zugmaschinen und sonstige Fahrzeuge) besteht derzeit aus etwa 13.854 Fahrzeugen (vgl. /12/) mit einer durchschnittlichen Fahrleistung von:

- Private LKW: 60.000 km/a,
- Öffentl. LKW: 5.000 km/a,
- Öffentl. ABSF: 30.000 km/a.

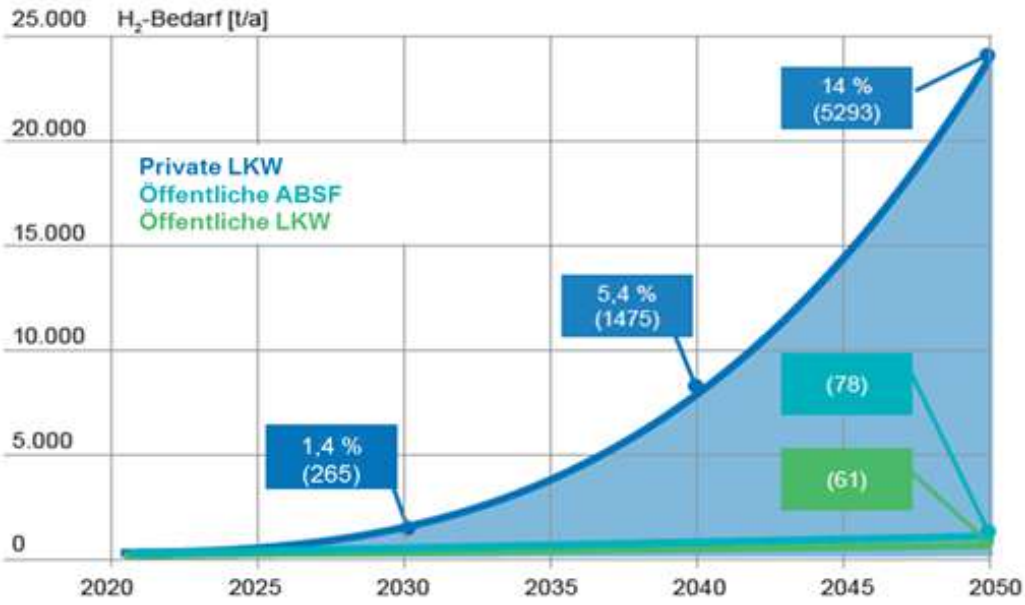
Zwischen September 2018 und August 2019 wurden in Brandenburg ca. 2.127 LKW[11] neu zugelassen. Im gleichen Zeitraum wurden in Sachsen ca. 3.682 LKW neu zugelassen. Das bedeutet für die WRL 1.076 Neuzulassungen von LKW (ohne land-/forstwirtschaftliche Zugmaschinen und sonstige Fahrzeuge), was einem Anteil von etwa 7,8 % des Bestandes entspricht. Im Schnitt sind die Zulassungszahlen von LKW in den letzten Jahren konstant gestiegen und erreichten bundesweit 2019 den bisherigen Höchststand.

Die Vergabe öffentlicher Aufträge für die Beschaffung von LKW und ABSF ist ab 2021 durch Beschaffungsquoten der CVD geregelt. Diese sieht vor, dass bis 2025 10 % und bis 2030 15 % der neu zu beschaffenden Fahrzeuge „sauber“, also emissionsarm sein müssen (s. Tabelle 4).
Emissionsfreie Fahrzeuge können für das Segment der LKW/ ABSF sowohl Brennstoffzelle als auch rein elektrisch betriebene Fahrzeuge sein.

Für die weitere Betrachtung werden ausschließlich H2-Fahrzeuge mit BZ-Antrieb untersucht, da der batterieelektrische Antrieb in dieser Fahrzeugklasse derzeit hinsichtlich Gewicht, Zuladung und Reichweite beschränkt ist.

Tabelle 4
Vorgaben der Clean Vehicle Directive (CVD) für die Beschaffung von LKW und ABSF der Klasse N2 und N3

Quote für die Beschaffung von…	08/2021 – 12/2025	01/2026 – 12/2030
„emissions**arme** Fahrzeuge“	10 %	15 %
davon „emissions**freie** Fahrzeuge“	5 %	7,5 %



Grafik 15
Prognostizierte Marktdurchdringung [in % und Anzahl] für private und kommunale BZ-LKW/ ABSF sowie Darstellung des resultierenden Wasserstoffbedarfs in der WRL

[11] Anzahl der Lkw-Neuzulassungen in Deutschland von September 2018 bis September 2019 nach Bundesländern /12/ und eigene Berechnungen.

Die Basis zur Abschätzung der Marktdurchdringung von BZ-LKW/ -ABSF bis 2030 bildet die Beschaffungsrichtlinie der CVD, welche angenommen bis 2050 mit gesteigerten Quoten (ab 2031: 12,5 %, ab 2036: 17,5 %) fortgeführt wird. Des Weiteren wird angenommen, dass auch Beschaffungsquoten für emissionsfreie private LKW eingeführt werden (ab 2026: 5 %, ab 2031: 7,5 %, ab 2036: 10 %, ab 2041: 20 %).

Der Anteil öffentlicher LKW am LKW-Bestand der WRL beträgt ca. 2,5 %. In der WRL werden ca. 220 ABSF verortet[12]. Davon sind wiederum ca. 70 % im kommunalen bzw. Mischbetrieb unterwegs /19/.

Eine weitere Grundlage der Wasserstoffbedarfsabschätzung bildet der H2-Verbrauch der Fahrzeuge. Der durchschnittliche H2-Verbrauch eines BZ-LKW (mittlere Gewichtsklasse) wird mit 7,5 kg/ 100 km angegeben /20/. Für BZ-Abfallsammelfahrzeuge wird mit einem durchschnittlichen Verbrauch von 14 kg/ 100 km gerechnet /20/.

Wird der Wasserstoffbedarfsermittlung (s. Grafik 15) lediglich die CVD (und fortgeführte CVD bis 2050) als Basis zu Grunde gelegt, welche sich nur auf die Beschaffung von LKW nach öffentlichen Vergaberichtlinien beschränkt, ergibt sich auch hier ein differenziertes Bild des Wasserstoffbedarfs. In diesem Bereich ist der Anteil des betreffenden Fahrzeugbestands (139 Fahrzeuge in 2050) gering, woraus lediglich ein geringer Wasserstoffbedarf von wenigen Tonnen pro Jahr (ca. 260 t/a in 2050) resultiert.

Der Wasserstoffbedarf in der WRL steigt hingehen schnell und stark an sobald Beschaffungsquoten auch für privatwirtschaftlich beschaffte emissionsfreie LKW eingeführt werden. Deren Einfluss auf den Wasserstoffbedarf ist aufgrund der wesentlich höheren Bestands- und Neuzulassungszahlen wesentlich größer. Der Wasserstoffbedarf wird fortan durch die privaten LKW dominiert und führt zu einer jährlichen Wasserstoffbedarfsmenge von bis zu über 23.000 t in 2050. Unter den getroffenen Annahmen führt dies zu einem Anteil von etwa 14 % (privaten) BZ-LKW am Gesamtbestand in der WRL in 2050.

Busse des Öffentlichen Personennahverkehrs

Quelle: Toyota

Grafik 16
ÖPNV-Bus mit Brennstoffzelle

Busse sind mit großem Abstand der Hauptträger des öffentlichen Straßenpersonennahverkehrs in Deutschland und der WRL. Unterschieden werden dabei der Stadtbusverkehr, der Regionalbusverkehr, der Gelegenheitsbusverkehr und der Fernlinienbusverkehr. Für die vorliegende Wasserstoffbedarfsabschätzung wird der dominierende Stadtbus- und Regionalbusverkehr betrachtet. Busse werden heute fast ausschließlich als Dieselfahrzeuge angeboten.

Die in der WRL zugelassene Bus-Flotte besteht derzeit aus etwa 1.282 Fahrzeugen (vgl. /12/). Davon sind in etwa 610[13] Busse für den öffentlichen Betrieb im Einsatz mit durchschnittliche Fahrleistungen[14] von:

- Öffentl. Busse: 49.000 km/a,
- Private Busse: 47.000 km/a.

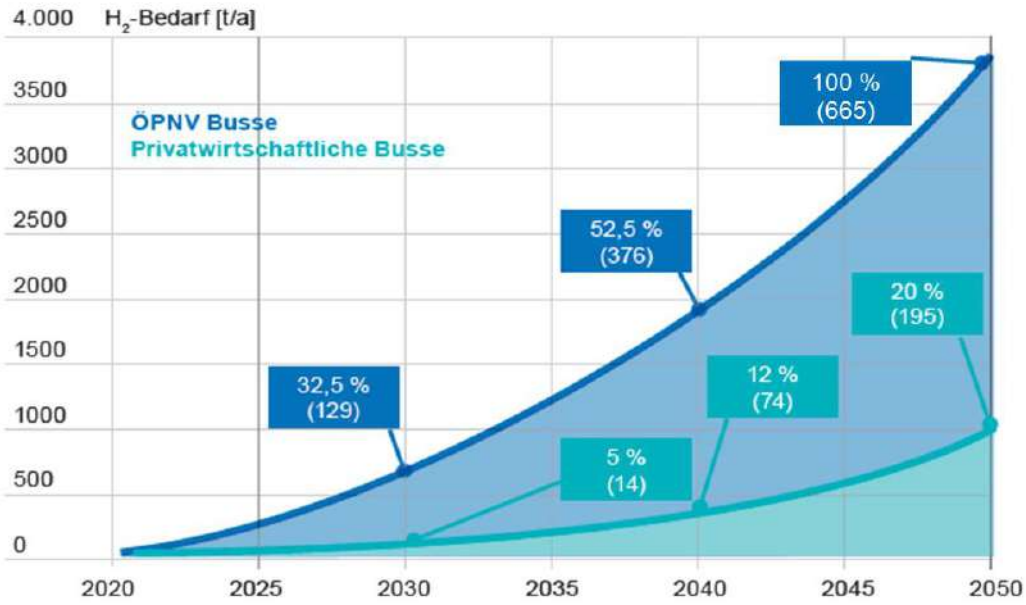
[12] Eigene Erhebungen in den Ober- und Mittelzentren der WRL

[13] Bestand Kraftomnibusse /12/ und eigene Erhebungen zum Bestand an ÖPNV-Bussen in der WRL

[14] Eigene Erhebungen in der WRL

Tabelle 5
Vorgaben der CVD für die Beschaffung von Bussen der Klasse M3

Quote für die Beschaffung von…	08/2021 – 12/2025	01/2026 – 12/2030
„emissions**arme** Fahrzeuge“	45 %	65 %
davon „emissions**freie** Fahrzeuge“	22,5 %	32,5 %



Grafik 17
Prognostizierte Marktdurchdringung [in % und Anzahl] für öffentliche und private H2-BZ-Busse sowie Darstellung des resultierenden Wasserstoffbedarfs in der WRL

Im Jahr 2018 wurden in der WRL 86 Busse neu zugelassen (vgl. /12/). Dies entspricht einem Anteil von etwa 6,7 % des Bestandes und liegt leicht unter der bundesdeutschen Neuzulassungsquote für Busse (7,7 %). Die Zulassungs- und Bestandszahlen von Bussen sind in den letzten Jahren konstant gestiegen und erreichten bundesweit 2019 den bisherigen Höchststand. Die Bestandsentwicklung von privatwirtschaftlichen Bussen in der WRL beträgt 0,6 %/a, wohingegen der Bestand öffentlicher Busse nur mit 0,1 %/a wächst (ländliche, dünn besiedelte Region unter Berücksichtigung der demografischen Entwicklung).

Die Vergabe öffentlicher Aufträge für die Beschaffung von Bussen ist ab 2021 durch Beschaffungsquoten der CVD geregelt. Diese sieht vor, dass bis 2025 45 % und bis 2030 65 % der neu zu beschaffenden Fahrzeuge „sauber“, also emissionsarm sein müssen (s. Tabelle 5). Emissionsfreie Fahrzeuge können für das Segment der Busse sowohl BZ- als auch rein elektrisch betriebene Fahrzeuge sein. Für die weitere Betrachtung werden ausschließlich Brennstoffzellen-Fahrzeuge berücksichtigt, da der batterieelektrische Antrieb in dieser Fahrzeugklasse aufgrund Gewicht, Zuladung und Reichweite beschränkt und somit nur bedingt praxistauglich ist.

Die Basis zur Abschätzung der Marktdurchdringung von BZ-Bussen bis 2030 bildet die CVD, welche angenommen bis 2050 mit gesteigerten Quoten (ab 2031: 42,5 %, ab 2036: 52,5 %) fortgeführt wird.
Des Weiteren wird angenommen, dass auch Beschaffungsquoten für emissionsfreie private Busse eingeführt werden (ab 2026: 5 %, ab 2031: 9 %, ab 2036: 12 %, ab 2041: 20 %).

Eine weitere Grundlage der Wasserstoffbedarfsabschätzung bildet der angenommene durchschnittliche H2-Verbrauch von

12 kg/100 km[15] eines BZ-Bus. Der Einfluss der CVD im Bereich der Busse ist sehr groß. Insbesondere die hohen Beschaffungsquoten für Busse, die nach öffentlichen Vergaberichtlinien beschafft werden, erzeugen eine mittlere und konstante Nachfrage nach Wasserstoff. Die im Rahmen dieser Studie fortgeführten und gesteigerten Beschaffungsquoten für emissionsfreie Busse können letztendlich zu einem Austausch des Fahrzeugbestands bis 2050 führen. In diesem Falle sogar zu einem Fahrzeugbestand aus 100 % BZ-Fahrzeugen (s. Grafik 17). Absolut betrachtet ist die Anzahl der BZ-Fahrzeuge im Bereich der Busse im Vergleich zu anderen Bereichen des Verkehrssektors (z.B. PKW) gering. Jedoch bietet sich aufgrund der Möglichkeit einer zentralen Beschaffung und der Nutzung zentraler Infrastrukturen der ÖPNV für einen schnellen Markthochlauf von BZ-Technologien an.
Der Einfluss von privatwirtschaftlichen Bussen (die im Rahmen der Studie nur geringeren Beschaffungsquoten unterliegen) auf den Wasserstoffbedarf der WRL wäre bei gleichen Beschaffungsquoten ähnlich, da die Aufteilung des Bus-Bestandes zwischen öffentlich und privat in der WRL nahezu gleichverteilt ist.
Die ÖPNV-BZ-Busse erfordern eine jährliche Wasserstoffbedarfsmenge von bis zu 3.500 t in 2050 in der WRL.

ÖPNV-Schienenfahrzeuge

Quelle: Alstom

Grafik 18
BZ-Schienenfahrzeug

Das Schienenstreckennetz[16] der WRL ist bereits zu einem großen Teil elektrifiziert. Bisher noch nicht elektrifizierte Strecken, vor allem im sächsischen Teil der WRL sind entsprechend Landes- und Bundesverkehrswegeplan[17] zur Elektrifizierung vorgesehen. Dies betrifft die Strecken Dresden - Görlitz und Cottbus - Görlitz. Die verbleibenden Strecken sind derzeit noch nicht im Bundesverkehrswegeplan zur Elektrifizierung berücksichtigt. Diese Strecken sind daher als potentielle Strecken für wasserstoffgetriebene BZ-Schienenfahrzeuge interessant und werden im Folgenden näher betrachtet. In Frage kommen die vier Strecken Dresden - Zittau, Dresden - Hosena[18], Cottbus - Forst und Görlitz - Zittau (s. Tabelle 6).

Tabelle 6
Potentielle Bahnstrecken für wasserstoffbetriebene Züge

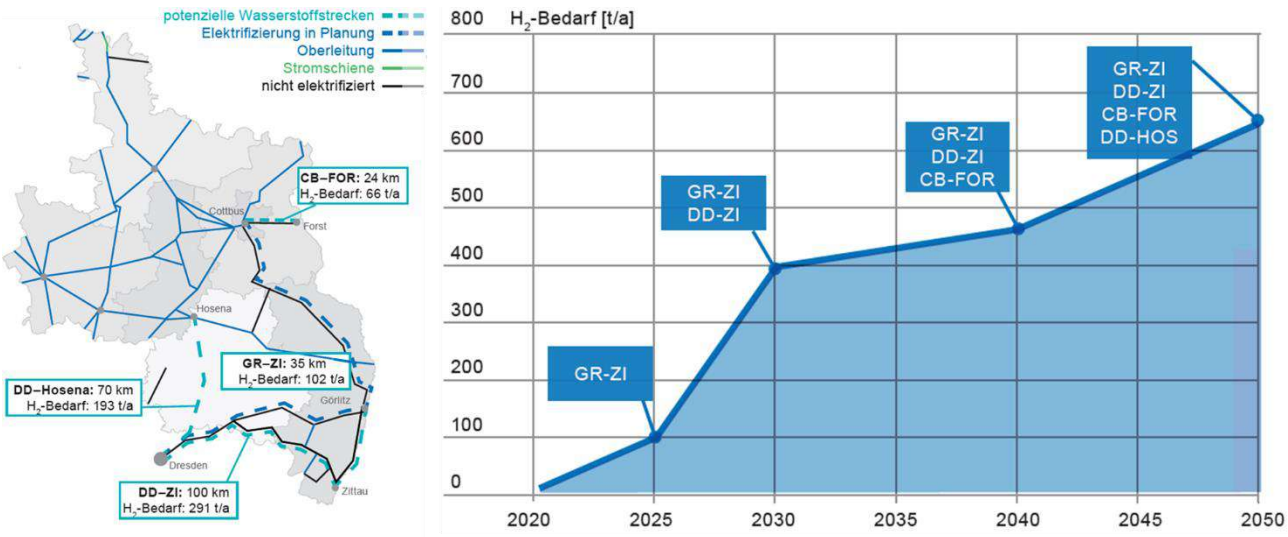
Strecke	DD - ZI	DD - Hosena	CB - FOR	GR - ZI
Länge	100 km	70 km	24 km	35 km
Taktung	60 min	60 min	60 min	60 min
Fahrten/ Tag*	38	36	36	38
Kilometer/ Tag	3800 km	2520 km	864 km	1330 km

[15] Mittelwert aus derzeit am Markt verfügbaren H2-BZ-Bussen (Herstellerangaben)
[16] Gemäß Infrastrukturregister der Deutschen Bahn; https://geovdbn.deutschebahn.com/isr
[17] Bundesverkehrswegeplan 2030. Die Elektrifizierung der Strecken DD - GR und CB - GR werden als Vorhaben des potentiellen Bedarfs, die in den Vordringlichen Bedarf aufsteigen können, geführt.
[18] Die Verbindung von Dresden nach Hosena existiert derzeit nicht als durchgehend befahrene Strecke für den Personennahverkehr. Dieser wurde zwischen Kamenz und Hosena für den regulären Betrieb 1998 eingestellt. Güterverkehr sowie gelegentlicher, eigenwirtschaftlicher Personenverkehr finden auf diesem Abschnitt nach wie vor statt /23/. Für die weitere Betrachtung der Strecke und der Wasserstoffbedarfsabschätzung wird die Taktung der Verbindung Dresden - Kamenz bis Hosena übertragen.

Der Ermittlung des potentiellen Wasserstoffbedarfs der einzelnen Strecken wird der Energiegehalt[19] des gemittelten durchschnittlichen Dieselverbrauchs[20] von 70 l/100 km zu Grunde gelegt. Vereinfachend wird angenommen, dass der aktuell gültige Fahrplan ohne Ausfälle (z.B. Schienenersatzverkehr) über den Betrachtungszeitraum von einem Jahr täglich konstant bleibt.

Das Wasserstoffbedarfspotential der WRL im ÖPNV-Schienenverkehr beträgt unter den getroffenen Annahmen insgesamt etwa 652 t/a (s. Grafik 19). Es zeigen sich bei den vier betrachteten Strecken zwei Streckenkreuzungspunkte, welche sich daher prinzipiell als Wasserstofflager- und Tankstellen, u. U. auch als potentielle Elektrolyseurstandorte eignen. Diese Kreuzungspunkte befinden sich in Dresden und Zittau. Hier könnten sich zukünftig attraktive Geschäftsmöglichkeiten für Betreiber von Solar- und Windparks bieten. Der Strom für den Betrieb der Elektrolyseure könnte lokal in der Nähe der Kreuzungspunkte erzeugt werden. Die Flächen an den Kreuzungs- und Endpunkten nicht elektrifizierter Bahnstrecken könnten daher in Zukunft für Investoren interessant werden. Die Wasserstoffversorgung der Strecke Cottbus - Forst kann in Cottbus erfolgen. Der Wasserstoffbedarf dieser Strecke ist mit 66 t/a eher gering.

Der elektrische Ausbau des Streckennetzes ist zeit- und kostenintensiv und findet daher schwerpunktmäßig in den Ballungsräumen statt. Der wasserstoffbetriebene Brennstoffzellenzug ist daher eine sinnvolle und ökologische Alternative für eine schnellere Einbindung von Gebieten des ländlichen Raums und von Nebenstrecken, sei es für den Übergang bis zur Elektrifizierung oder als Dauerlösung. Insbesondere die Verbindung Dresden - Zittau, deren Streckenführung durch das Lausitzer Bergland verläuft, ist für den dauerhaften Betrieb mit Wasserstoff-Brennstoffzellenzügen prädestiniert.



Grafik 19
Potentielle Bahnstrecken für wasserstoffbetriebene Züge und resultierende streckenspezifische Wasserstoffbedarfe (links) und Wasserstoffbedarf im Schienenpersonennahverkehr der WRL nach Inbetriebnahme der einzelnen Strecken bis 2050 (rechts)

[19] Diesel: ca. 10 kWh/l; H2: ca. 3 kWh/Nm³ bzw. 33,33 kWh/kg laut Umrechnungstabelle zu Energieträgern. /24/

[20] Gemittelter durchschnittlicher Verbrauch der auf den Strecken typischerweise im Einsatz befindlichen Züge Siemens Desiro Classic (Baureihe 642) und Stadler RegioShuttle (Baureihe 650). /25/

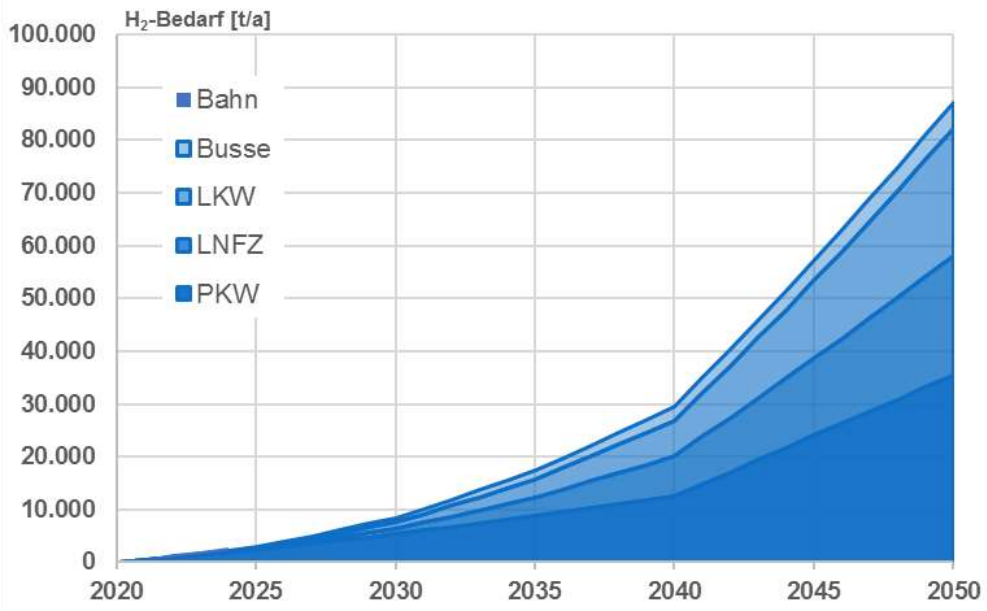
Zusammenfassung mobile energetische Nutzung

Es entsteht in der WRL zukünftig ein Wasserstoffbedarf in allen betrachteten Mobilitätsbereichen, wohingegen die Bedarfsmengen unterschiedlich verteilt sind (s. Grafik 20).

Die Grundlage zur Entwicklung eines möglichst stetigen und absehbar steigenden Wasserstoffbedarfs in der WRL werden durch die Vorgaben der CVD für nach öffentlichen Vergaberichtlinien zu beschaffenden Fahrzeugen gelegt. Dies betrifft insbesondere ÖPNV-Busse, LKW und LNFZ. Der resultierende Wasserstoffbedarf dieser Fahrzeuge ist aufgrund des geringen Anteils am Gesamtfahrzeugbestand in der WRL jedoch vergleichsweise gering. Der Einfluss der sonstigen, nicht öffentlichen Vergaberichtlinien unterliegenden (privaten) Fahrzeugen (privatwirtschaftliche LKW, LNFZ, Busse, PKW) ist aufgrund der wesentlich höheren Bestände groß. Werden auch für diese Fahrzeuge Beschaffungsquoten oder andere Beschaffungsanreize eingeführt, ist schon bei geringen Quoten/ Neuzulassungen von BZ-Fahrzeugen ein wesentlich erhöhter Wasserstoffbedarf zu verzeichnen. Unter den zu Grunde liegenden Annahmen sind in diesem Fall bis 2050 Bedarfe von insgesamt etwa 24.000 t/a bei LKW, 5.000 t/a bei Bussen und 23.000 t/a bei leichten Nutzfahrzeugen zu erwarten.

Ein ebenfalls hoher Wasserstoffbedarf von bis zu 35.000 t/a in 2050 stellt sich bei den PKW ein, sofern die prognostizierte Marktdurchdringung für Brennstoffzellen-PKW von 5 % in 2030 bis zu 35 % in 2050 erreicht wird.

Das Wasserstoffbedarfspotential für den Schienenpersonennahverkehr beträgt in der WRL auf den bisher noch nicht elektrifizierten und mittelfristig nicht zur Elektrifizierung vorgesehenen Strecken bis 2050 etwa 650 t/a. Insbesondere die Streckenkreuzungen in Zittau und Dresden könnten als Wasserstoff-Tankstationen bzw. Elektrolyseurstandorte in Betracht gezogen werden.



Grafik 20
Entwicklung des Wasserstoffbedarfs für den Verkehrssektor in der WRL

Stoffliche Nutzung

Unter der stofflichen Nutzung wird die Verwendung von Wasserstoff als chemischer Grundstoff zur Weiterverarbeitung und Veredelung von Zwischen- und/oder Endprodukten verstanden.
Betrachtet wird in der vorliegenden Studie die stoffliche Nutzung von H2 als Ausgangsstoff für die Herstellung von E-Fuels für den Straßenverkehr in der WRL und für den Flugverkehr in den angrenzenden Städten (Berlin und Dresden). Darüber hinaus wird der Wasserstoffbedarf als Reduktionsmittel für die Stahlproduktion in der WRL und angrenzenden Regionen, wie etwa in Eisenhüttenstadt, abgeschätzt.

Allgemeine Betrachtungen E-Fuels

Synthetische Kraftstoffe, die aus Strom erneuerbarer Energien hergestellt werden, bezeichnet man als E-Fuels. Dabei wird aus EE-Strom und Wasser Wasserstoff hergestellt und unter der Zugabe von Kohlendioxid (CO2) der synthetische Treibstoff gemäß Verwendungszweck hergestellt. Dies können gasförmige oder flüssige Treibstoffe wie u. a synth. Benzin, synth. Diesel und synth. Kerosin sein. Bei der Verbrennung von E-Fuels entstehen Luftschadstoffe, jedoch weitaus weniger als bei der Verbrennung fossiler Treibstoffe. Daher gelten E-Fuels als klimaneutral, weil bei ihrer Verbrennung nur so viel CO2 freigesetzt wird, wie bei optimaler Produktion gebunden worden ist. Die Vorteile von E-Fuels sind insbesondere, dass sie von konventionellen Verbrennungsmotoren ohne Umrüstungen als Treibstoff genutzt werden können. Somit ist die bestehende Fahrzeug-, Betankungs- und Transportinfrastruktur weiterhin nutzbar. Gerade in der Übergangsphase vom konventionellen Verbrennungsmotor zu alternativen Antrieben bieten E-Fuels die Möglichkeit Treibhausgasemissionen zu reduzieren und einen Beitrag zur Erreichung der Klimaziele zu leisten. Die Nachteile von E-Fuels sind, dass bei der Herstellung hohe energetische Umwandlungsverluste auftreten bzw. nur ein geringer Wirkungsgrad erreicht werden kann. Derzeit fehlen zudem noch industrielle Produktionsanlagen zur Herstellung von E-Fuels in großen Mengen. Daraus resultieren derzeit noch hohe Produktionskosten[21], die über denen von fossilen Treibstoffen liegen. Die typischen Einsatzgebiete von E-Fuels sind daher kaum bzw. nicht elektrifizierbare Bereiche, wie z.B. Luftverkehr, Schifffahrt und ggf. Schwerlastverkehr, wo keine anderen technischen Lösungen existieren.

E-Fuels für den Straßenverkehr

E-Fuels sind aufgrund der genannten hohen Energieumwandlungsverluste nur bedingt für Fahrzeuge geeignet, welche ohne größere Hindernisse elektrifizierbar sind (z. B. PKW oder LNFZ). Für einen Übergangszeitraum werden diese allerdings einen wichtigen Beitrag zur Verkehrswende im Bereich konventioneller PKW leisten. Auch werden E-Fuels langfristig voraussichtlich dort verstärkt zum Einsatz kommen, wo hohe Distanzen überwunden werden müssen und aufgrund dessen eine hohe Energiedichte des verwendeten Kraftstoffes erforderlich ist (z. B. Straßengüterverkehr per LKW).
Die Verwendung der mit CO2-freien oder -neutralen Wasserstoff hergestellten E-Fuels kann durch direkten Verbrauch oder durch Beimischung zu fossilen Treibstoffen erfolgen.

Zur Ermittlung des dafür notwendigen Wasserstoffbedarfs wird ein steigender E-Fuel-Anteil am jeweiligen Gesamttreibstoff-bedarf des Straßenverkehrs in der WRL zu Grunde gelegt. Entsprechend dieser Annahme steigt der E-Fuel-Anteil von 1 % in 2025 über 10 % (2030) und 50 % (2040) bis auf 100 % in 2050. D. h., zu diesem Zeitpunkt werden keine fossilen Treibstoffe mehr für konventionelle Verbrennungsmotoren genutzt.

[21] Stand 2019: ca. 4,50 €/l Herstellungskosten, Prognose: 2030: 2,29 €/l, 2050: 0,70 €- 1,30 € /10/, /41/

Wie auch bei der mobilen energetischen Nutzung von Wasserstoff als Treibstoff für Brennstoffzellen werden im Folgenden wiederum die Fahrzeugklassen PKW, LNFZ, LKW, ÖPNV-Busse betrachtet. Der o. g. E-Fuel-Anteil ist für alle Fahrzeugklassen gleich.

E-Fuels für PKW

Folgende grundlegende Annahmen werden für die Ermittlung des Wasserstoffbedarfs zur Herstellung von E-Fuels für den PKW-Bereich getroffen /12/:

- durchschnittliche Fahrleistung PKW/a: 13.727 km,
- durchschnittl. Verbrauch PKW (Diesel und Benzin gemittelt): 7,35 l/100 km.

Unter Nutzung dieser Annahmen sowie einer prognostizierten Marktdurchdringung von BZ-PKW (35 % bis 2050 /42/) wird der Anteil an Fahrzeugen mit konventionellen Verbrennungsmotoren stetig abnehmen. Der Anteil an batterieelektrischen (BEV) und BZ-Fahrzeugen steigt hingegen stetig an (s. Grafik 21).
Basierend auf den E-Fuel-Anteilen am Treibstoffbedarf stellt sich der in Grafik 22 dargestellte H2-Bedarf zur E-Fuel-Herstellung für PKW ein.

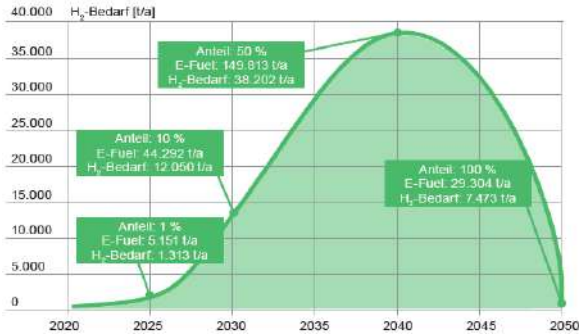
E-Fuels für leichte Nutzfahrzeuge

Für die Ermittlung des Wasserstoffbedarfs zur Herstellung von E-Fuels für LNFZ sind die nachstehenden Annahmen basierend auf /12/, /13/ definiert:

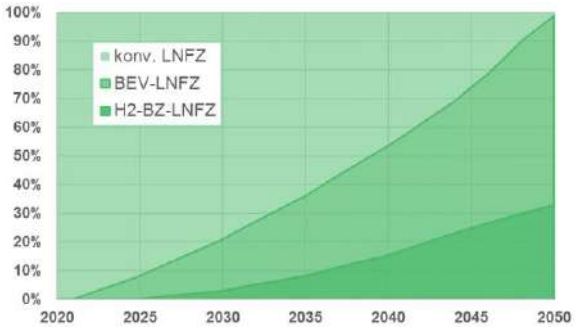
- durchschnittliche Fahrleistung LNFZ/a: 19.619 km,
- durchschnittlicher Dieselverbrauch: 14 l/100 km.

In vergleichbarer Weise zu den Betrachtungen der PKW-Bestandsentwicklung wird sich der Bestand von LNFZ mit den unterschiedlichen Antriebsformen gemäß Grafik 23 einstellen. Der daraus resultierende Wasserstoffbedarf für die E-Fuel-Herstellung ist in Grafik 24 dargestellt.

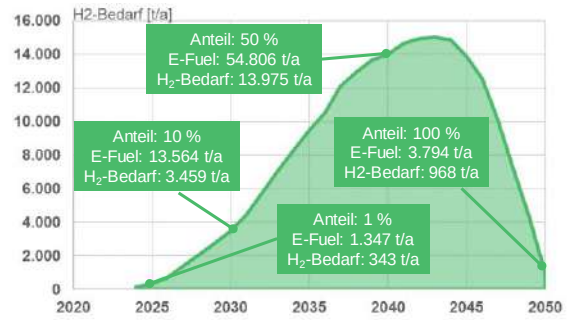
Grafik 21
Entwicklung der Zusammensetzung des PKW-Segments



Grafik 22
Entwicklung des Wasserstoffbedarfs für die E-Fuel-Produktion für konventionelle PKW



Grafik 23
Entwicklung der Zusammensetzung des LNFZ-Segments



Grafik 24
Entwicklung des Wasserstoffbedarfs für die E-Fuel-Produktion für konventionelle LNFZ

E-Fuels für LKW

Zur Herstellung von E-Fuels für LKW werden die nachstehenden Annahmen zur Ermittlung des H2-Bedarfs getroffen /12/, /13/, /14/:

- durchschnittliche Fahrleistung LKW/a: 60.000 km,
- durchschnittlicher Dieselverbrauch: 37 l/ 100 km.

Im Segment der schweren LKW nimmt der Anteil an Fahrzeugen mit konventionellen Verbrennungsmotoren nur geringfügig ab, da Fahrzeuge mit alternativen Antrieben hinsichtlich Reichweite und Gewichtsklasse der Fahrzeuge derzeit noch keine Alternative darstellen (s. Grafik 25).

Basierend auf den E-Fuel-Anteilen am Treibstoffbedarf stellt sich der in Grafik 26 dargestellte H2-Bedarf zur E-Fuel-Herstellung für LKW ein.

E-Fuels für Busse

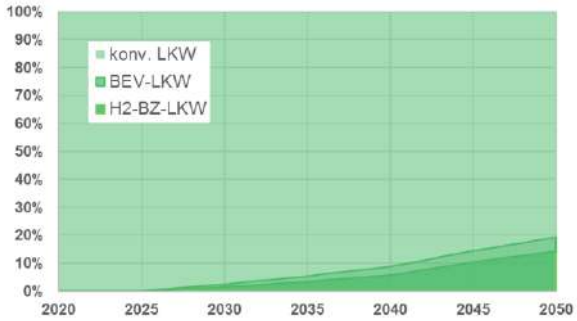
Annahmen zur Ermittlung des Wasserstoffbedarfs zur Herstellung von E-Fuels für ÖPNV-Busse und privatwirtschaftlich genutzter Busse (z.B. Reiseunternehmen) /12/:

- durchschnittliche Fahrleistung Bus/a: 48.000 km,
- durchschnittlicher Dieselverbrauch: 38 l/100 km.

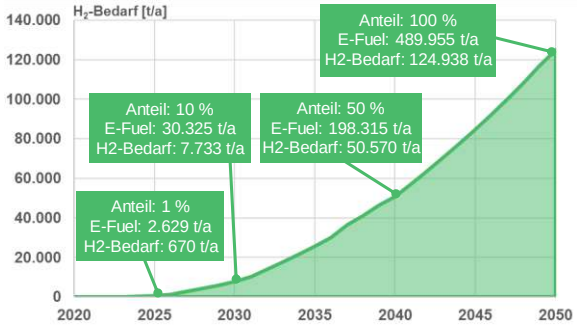
Im Segment der Busse nimmt der Anteil an Fahrzeugen mit konv. Verbrennungsmotoren stetig ab, da der Anteil an BZ-Fahrzeugen (und in nur sehr geringem Maße die batterieelektrischen Fahrzeuge) steigt (s. Grafik 27). Gemäß den definierten E-Fuel-Anteilen ergibt sich für die Busse ein Wasserstoffbedarf zur Produktion des E-Fuels (s. Grafik 28).

Zusammenfassung E-Fuels für den Straßenverkehr

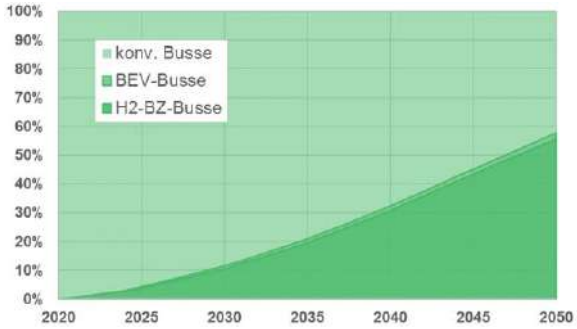
Die Verwendung von E-Fuels ermöglicht die schadstoffreduzierte Weiternutzung des Fahrzeugbestands mit konventionellen Verbrennungsmotoren.



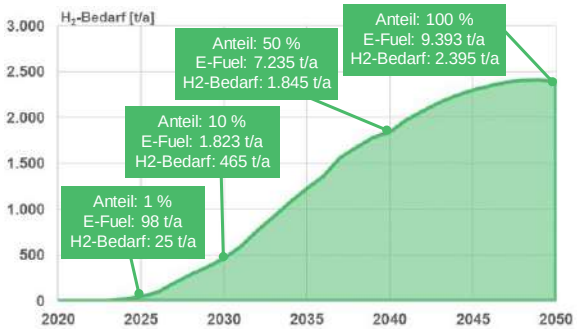
Grafik 25
Entwicklung der Zusammensetzung des LKW-Segments



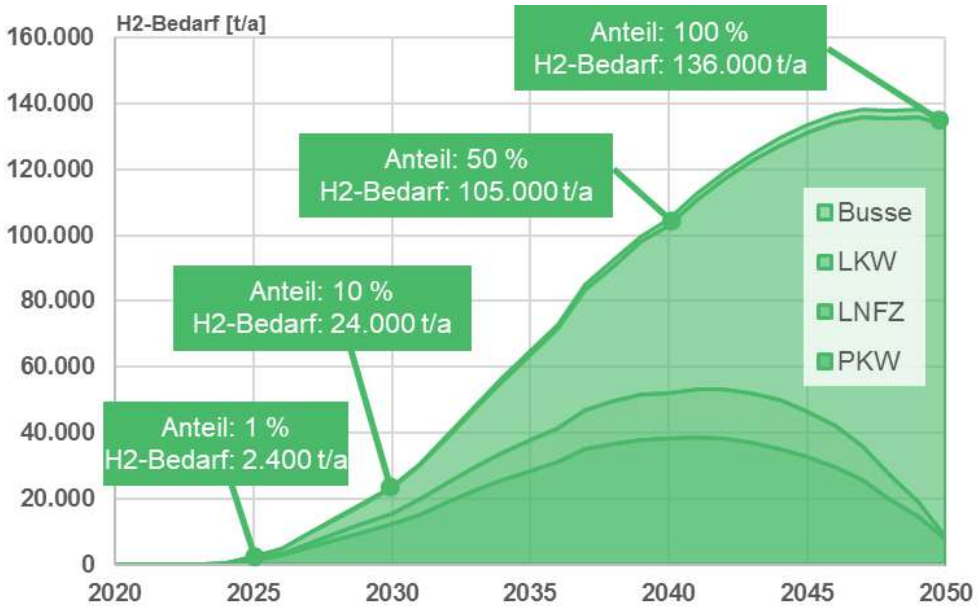
Grafik 26
Entwicklung des Wasserstoffbedarfs für die E-Fuel-Produktion für konventionelle LKW



Grafik 27
Entwicklung der Zusammensetzung des Bus-Segments



Grafik 28
Entwicklung des Wasserstoffbedarfs für die E-Fuel-Produktion für konventionelle Busse



Grafik 29
Entwicklung des Wasserstoffbedarfs für die E-Fuel-Produktion für den Straßenverkehr in der WRL

Der Anteil an E-Fuels am Treibstoffbedarf wird bis 2050 auf 100 % angehoben. Andere Technologien (z.B. Gasantrieb) werden nicht berücksichtigt, da das Ziel bis 2050 eine vollständige Dekarbonisierung, auch des Verkehrssektors, vorsieht.

In den bestandsstarken Segmenten PKW und LNFZ ist der stärkste Rückgang von konventionellen Verbrennungsmotoren in den Fahrzeugen bis 2050 zu erwarten. Der E-Fuel-Bedarf, und damit auch der Wasserstoffbedarf zu dessen Herstellung steigt anfänglich an und erreicht sein zwischenzeitliches Maximum in den 2040‘er Jahren. Im Segment der PKW beträgt der Wasserstoffbedarf zur E-Fuel-Herstellung etwa 38.000 t/a in 2040. Im Segment der LNFZ sind es ca. 15.000 t/a in den 2040‘ern. Die in den 2040’er Jahren noch mit Verbrennungsmotoren ausgestatteten PKW (Halbierung im Vergleich zu 2020) und LNFZ werden gemäß der Annahme mit 50 % E-Fuel (Beimischung) betankt.

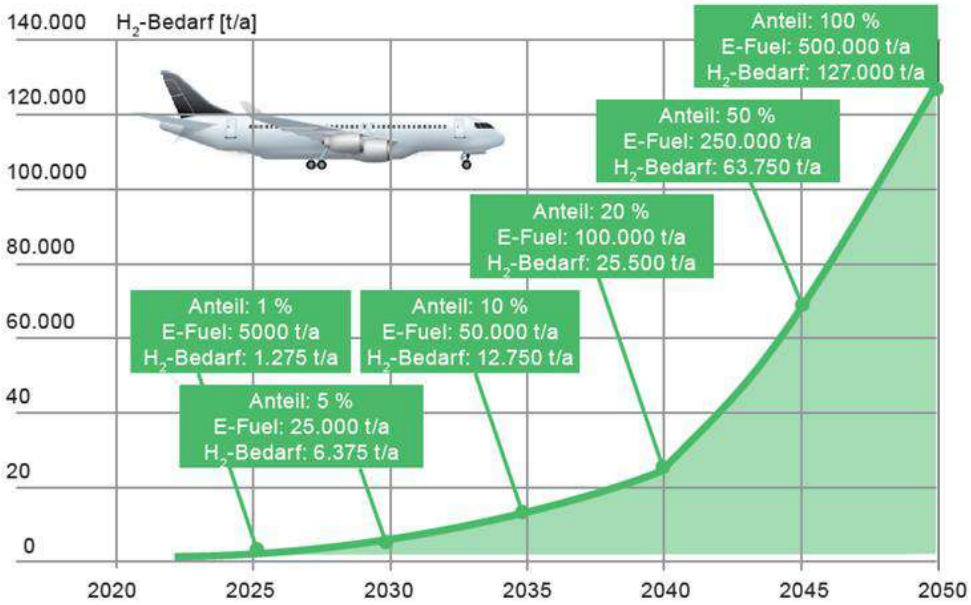
Im Segment der LKW und ABSF ist derzeit keine vergleichbar starke Durchdringung mit batterieelektrischen- und BZ-Fahrzeugen zu erwarten. Der Bestand und die Neuzulassung von Fahrzeugen erfolgt voraussichtlich auch weiterhin mit (optimierten) Verbrennungsmotoren. Bei steigender Nutzung von E-Fuels, entsteht ein mit dem E-Fuel-Anteil im Treibstoff steigender Wasserstoffbedarf. Der zu erwartende Wasserstoffbedarf ist mit etwa 125.000 t/a in 2050 insgesamt der größte Wasserstoffbedarf im Verkehrssektor zur E-Fuel-Herstellung.

Im Segment der Busse geht der Anteil von konventionellen Verbrennungsmotoren bis 2050 um etwa 50 - 60 % zurück. Der Wasserstoffbedarf zur E-Fuel-Herstellung steigt gemäß E-Fuel-Anteil am Treibstoffbedarf an. Er erreicht seinen Höhepunkt mit knapp 2.500 t/a voraussichtlich um 2050.

E-Fuels (synthetisches Kerosin) für den Flugzeugverkehr

Der Flugzeugverkehr ist langfristig auf Flüssigkraftstoffe angewiesen. Für die Dekarbonisierung des stark wachsenden Flugverkehrssektors kommen daher aus heutiger Sicht nur E-Fuels oder Biokraftstoffe in Frage /11/.

An die WRL grenzen die drei internationalen Flughäfen Berlin Schönefeld, Berlin Tegel und Dresden. Der durchschnittliche Kerosinbedarf der drei Flughäfen beträgt ca. 500.000 t/a. Wie in Grafik 30 dargestellt, wird der Anteil von synthetischen Kerosin am Treibstoffbedarf der



Grafik 30
Entwicklung des Wasserstoffbedarfs zur Herstellung von synthetischen Kerosin in der WRL

drei Flughäfen in 2025 mit 1 % angesetzt[22]. Zur weiteren Dekarbonisierung soll dieser bis 2050 auf 100 % steigen. Die anteilige Substitution wird in einem wachsenden Wasserstoffbedarf zur Herstellung von synthetischen Kerosin[23] resultieren.

Wasserstoff als Reduktionsmittel in der Stahlproduktion

Um eine Tonne Roheisen (RE) im gängigen Verfahren der Eisenerzreduktion herzustellen, werden momentan rund 300 kg Koks und 200 kg Kohlenstaub /15/ als Reduktionsmittel benötigt, wodurch es zu einem erheblichen CO2-Ausstoß kommt.

Die Nutzung von CO2-freiem oder -neutralem Wasserstoff als alternatives Reduktionsmittel zu Kohlenstaub im Hochofenprozess bietet für die Roheisenherstellung großes Potential, die hohen Emissionen in der Stahlproduktion wesentlich zu senken. Das in den letzten Jahren neu entwickelte Verfahren der H2-Direktreduktion erlaubt sogar eine Senkung der CO2-Emissionen von bis zu 95 % /16/.

Bisher wird Wasserstoff bereits in der Stahlverarbeitung als Inertgas eingesetzt, welches aus der Erdgas-Dampfreformierung (grauer Wasserstoff) gewonnen wird. Der zusätzliche Bedarf der sich durch den Einsatz von Wasserstoff als Reduktionsmittel ergibt, wird für Deutschland mit 2,4 Mio t/a abgeschätzt /16/.

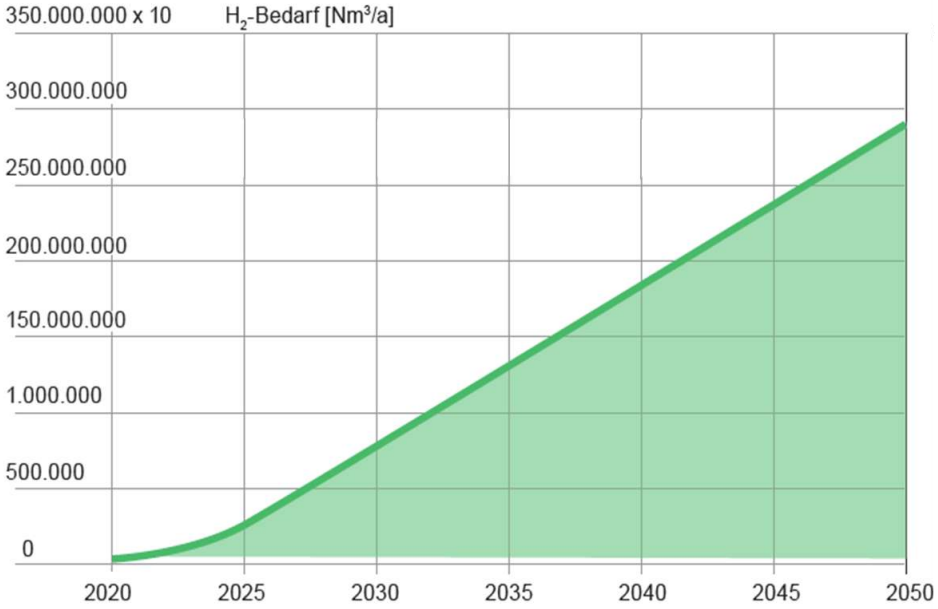
Der Ermittlung des Wasserstoffbedarfs in der WRL bzw. angrenzenden Gebieten liegen die folgenden Annahmen zu Grunde:

- zu produzierende Roheisenmenge in der WRL und direkt angrenzender Gebiete: ca. 2,0 Mio t_{RE}/a,
- ab 2025: H2 als Reduktionsmittel im Hochofenprozess mit einem Verbrauch von 2.487 kg/h sowie stetige Zunahme bei dem Zubau von H2-Direktreduktionsanlagen,
- 2050: vollständige Verfahrensumstellung auf H2-Direktreduktion mit einem H2-Verbrauch von 28.767 kg/h

Die Grafik 31 illustriert den ermittelten Bedarf an Wasserstoff für die Roheisenherstellung in der Wirtschaftsregion Lausitz sowie für angrenzende Regionen im Zeitraum 2020 - 2050.

[22] Innerhalb eines Projekts sollen 5 % des Kerosinbedarfs für den Flughafen Hamburg zukünftig mit synthetischen Kerosin gedeckt werden (entspricht 2019 ca. 17.500 t_{H2}/a). /53/

[23] Angenommen wird, dass der zur Substitution notwendige Wasserstoff in der WRL hergestellt wird.



Grafik 31
Entwicklung des Wasserstoffbedarfs für die Roheisenherstellung in der WRL

Wie bereits dargestellt, wird für diesen Zeitraum davon ausgegangen, dass der Bedarf an Wasserstoff als Reduktionsmittel für den Hochofenprozess wie auch für die H2-Direktreduktion stetig zunimmt.

Stationäre energetische Nutzung

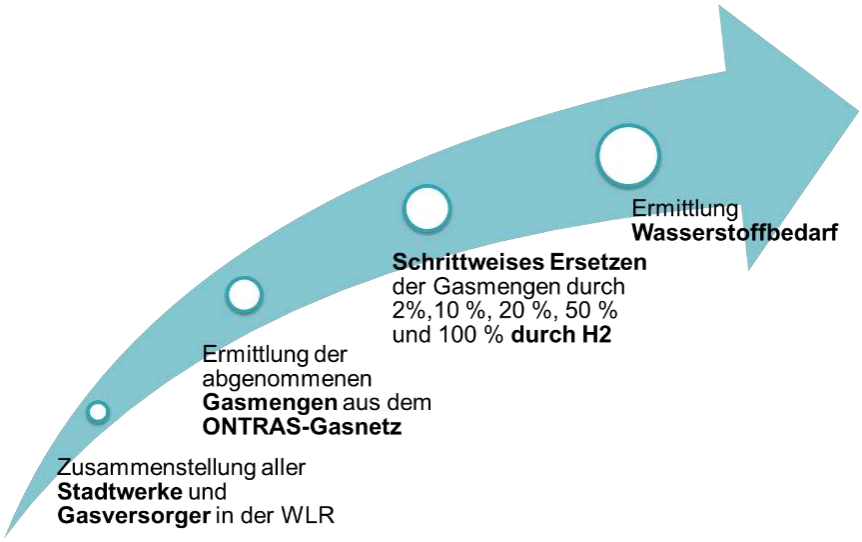
Unter der energetisch stationären Nutzung wird die Verwendung von Wasserstoff als Brennstoff für Brennstoffzellen im Energiesektor verstanden. Betrachtet wird im Folgenden die prozentuale Beimischung von Wasserstoff in das Erdgasnetz, die anteilige Substitution von Heizöl in Privathaushalten und die schrittweise Substitution von Braunkohle als Brennstoff in den Energiekraftwerken Jänschwalde, Boxberg und Schwarze Pumpe. Ausgehend vom Anlagenbestand (Ölheizungen), den derzeit und zukünftig erwarteten Beimischquoten von H2 (Einspeisung in das Erdgasnetz) und dem zu ersetzenden Energiebedarf (Braunkohlekraftwerke) werden die Wasserstoffbedarfe in der WRL ermittelt.

Substitution Erdgas

Die Einspeisung von Wasserstoff in das Erdgasnetz ist nicht neu, bis Mitte des 20. Jahrhunderts waren dem damals gebräuchlichen Stadtgas schon bis zu 50 % Wasserstoff beigemischt.
Eine flächendeckende Infrastruktur für Wasserstoff (Verteilnetz, Speicher) existiert derzeit in Deutschland noch nicht. Hierzu kann jedoch das über 500.000 km lange deutsche Erdgasnetz genutzt werden, was alle Sektoren – Industrie, Haushalt und Gewerbe, als auch indirekt Verkehr miteinander verbindet /26/.

Wasserstoff kann gegenwärtig nur begrenzt der Erdgasinfrastruktur zugemischt werden. Die Grenzen liegen derzeit bei einer Einspeisung zwischen 1 - 10 Volumenprozent [Vol.-%] /27/. Hintergrund ist, dass sich das Gasgemisch aus Wasserstoff und dem vorhandenen Erdgas in seiner chemischen Zusammensetzung sowie den Brenneigenschaften vom „reinen“ Erdgas unterscheidet. Daraus können sich Auswirkungen auf angeschlossene kritische Gasanwendungen ergeben. Die Wasserstoffverträglichkeit der Erdgasinfrastrukturkomponenten (Rohrleitungen, Verdichter, Gasdruckregelanlagen, Armaturen usw.) und angeschlossener Verbraucher (häusliche Gasendgeräte, Gasturbinen usw.) schwankt stark.

Die bisher maximal zulässigen 10 Vol.-% Wasserstoff im Gasnetz sollen laut DVGW[24] zukünftig auf 20 Vol.-% erweitert werden. Langfristig wird von Wasserstoffeinspeisungen in Höhe von 50 - 100 Vol.-% ausgegangen. Dazu sind jedoch entsprechende netz- und geräteseitige Anpassungen vorzunehmen.



Grafik 32
Vorgehensweise zur Ermittlung des Wasserstoffbedarfs für die prozentuale Substitution von Erdgas

Tabelle 7
Aus dem Erdgasnetz bezogene Energiemenge aller WRL-Stadtwerke und Gasanbieter

Stadtwerke und Gasanbieter der WRL	[2018]
Energie- und Wasserversorgung AG Kamenz	5334 GWh
Energie- und Wasserwerke Bautzen GmbH	
Versorgungsbetriebe Hoyerswerda GmbH	
Stadtwerke Weißwasser GmbH	
Stadtwerke Löbau GmbH	
Stadtwerke Zittau GmbH	
Stadtwerke Görlitz AG	
Energieversorgung Schwarze Elster GmbH	
Ver- und Entsorgungswerke Bad Muskau GmbH	
ENSO AG	
Stadtwerke Cottbus GmbH	
Stadtwerke Finsterwalde GmbH	
Stadtwerke Forst GmbH	
Städtische Werke Spremberg GmbH	
Energieversorgung Guben GmbH	
Stadt- und Überlandwerke GmbH Lübben	
Stadt- und Überlandwerke GmbH Luckau-Lübbenau	
Stadtwerke Senftenberg GmbH	
SpreeGas Gesellschaft für Gasversorgung und Energiedienstleistung mbH	
MITGAS AG	

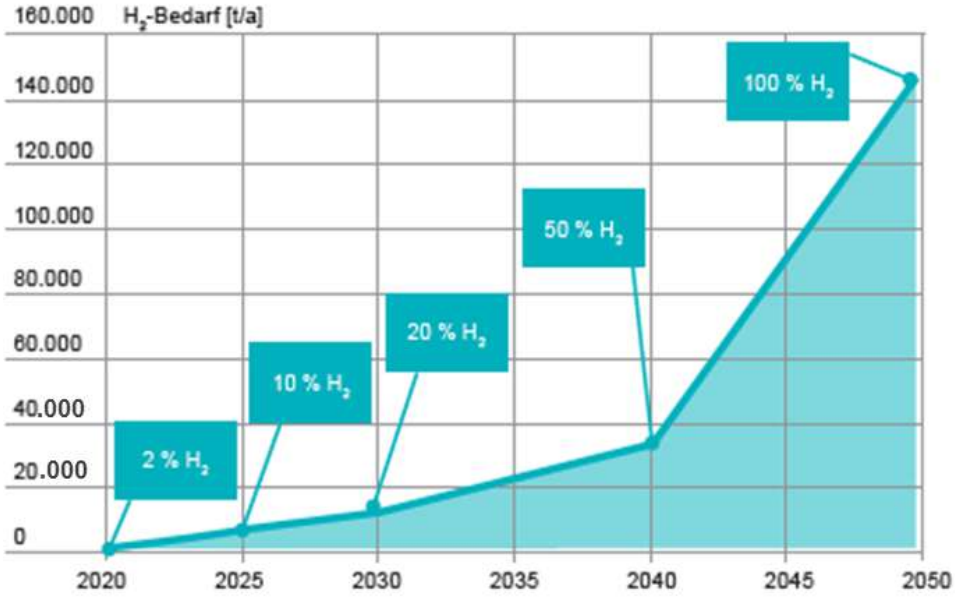
[24] Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches

Tabelle 8
Brennwerte von Erdgas, Wasserstoff und Gasgemischen

Brennwerte [kWh/m³]					
100 % Erdgas	98 % Erdgas + 2 % H2	90% Erdgas + 10 % H2	80 % Erdgas + 20 % H2	50 % Erdgas + 50 % H2	100 % H2
11,100	10,938	10,290	9,479	7,048	2,995

Der Bedarfsermittlung für die Beimischung von Wasserstoff in das Erdgasnetz liegt die in der WRL über die Stadtwerke/Gasversorger bezogene Menge Erdgas zu Grunde (s. Tabelle 7). Die prozentuale Beimischung von Wasserstoff in das Erdgasnetz führt zu einem veränderten Brennwert[25] des Gasgemisches (s. Tabelle 8). Der geringere Brennwert der Gasgemische bedingt zur Erzeugung der notwendigen Energiemenge einen Mehrbedarf an Erdgas. Die Gasnutzungsendgeräte sind derzeit auf den Brennwert des Erdgases eingestellt und haben diesbezüglich nur einen geringen Toleranzbereich, so dass hinsichtlich der Anlagentechnik Anpassungen notwendig werden. Unter der Annahme eines gleichbleibenden Energiebedarfs (s. Tabelle 7), welcher durch die Stadtwerke bzw. Gasversorger in der WRL verteilt wird und der Verwendung der in Tabelle 8 dargestellten Brennwerte zu Berechnung von Gasgemischvolumina entsteht bereits ab 2025 (bei einer Wasserstoffbeimischung von 10 Vol.-%) ein Wasserstoffbedarf in Höhe von etwa 8.000 t/a (s. Grafik 33).

Wird perspektivisch der gesamte Energiebedarf an Erdgas durch 100 % Wasserstoff substituiert, so wird allein in der WRL hierfür ein Wasserstoffbedarf von rund 150.000 t/a generiert.



Grafik 33
Wasserstoffbedarf bei steigendem H2-Anteil im Erdgasnetz

[25] Der Brennwert des Erdgases bezieht sich auf das H-Gas, das üblicherweise in Deutschland Verwendung findet. Dieses weist einen hohen Energiegehalt auf, da der Anteil an Kohlenwasserstoffen höher als beim L-Gas ist.

Substitution Heizöl

Neben Erdgas und Fernwärme ist Heizöl derzeit noch ein bedeutender Energieträger zur Raumwärme- und Warmwasserzeugung.

Nach Beschlüssen der Bundesregierung welche Ende 2019 zum sog. Klimapaket geschnürt wurden, soll diese Technologie jedoch zukünftig auslaufen, um die Klimaziele auch in diesem Sektor zu erreichen. Es ist abzusehen, dass der Einbau neuer Ölheizungen bereits ab 2026 /28/ verboten werden könnte und auf umweltfreundlichere Heiztechnologien umgestellt werden soll.

Der Bestand an Ölheizungsanlagen ist in Deutschland konstant rückläufig (ca. 4.780.000 Öl-Heizwertkessel in 2018) /29/. Insbesondere bei privaten Neubauten spielen Ölheizanlagen kaum noch eine Rolle. Die Verteilung der Ölheizungsanlagen ist in Deutschland ungleichmäßig verteilt und konzentriert sich überwiegend auf die alten Bundesländer. Der Anteil an entsprechenden Anlagen beträgt in Sachsen etwa 22 % und in Brandenburg nur noch etwa 14 % /30/.

Auszutauschende Ölheizungsanlagen können prinzipiell, vornehmlich jedoch in Gebieten ohne Erdgasleitungen durch Brennstoffzellen-Heizanlagen zur Wärmeerzeugung ersetzt werden. Durch die regionalen Landesinnungsverbände der Schornsteinfeger wird u. a. die Anzahl der Ölfeuerungsanlagen erfasst. Diese Daten werden zusammengefasst nur auf nationaler Ebene veröffentlicht (jährliche Erhebungen des Schornsteinfegerhandwerks durch den Bundesverband des Schornsteinfegerhandwerks - Zentralinnungsverband ZIV).

Zum Zeitpunkt der Studienerstellung steht die Rückmeldung der angefragten Landesinnungsverbände von Sachsen und Brandenburg noch aus, so dass die regionaldetaillierte Ermittlung der Ölfeuerungsanlagen in der WRL (auf Landkreisebene) auf Basis veröffentlichter und statistischer Daten erfolgt. Es handelt sich hierbei um eine Abschätzung. Dabei wird über die Anzahl der Wohngebäude, Wohnungen und durchschnittliche Wohnungsgrößen der Landkreise die Anzahl an Ölfeuerungsanlagen in den einzelnen Landkreisen der WRL abgeschätzt (s. Grafik 34).

Unter der Annahme der gleichmäßigen Verteilung der Ölfeuerungsanlagen über alle Landkreise hinweg, ergeben sich die in Tabelle 9 resultierenden Verteilungen.

Grafik 34
Vorgehensweise zur Ermittlung des Wasserstoffbedarfs für die anteilige Substitution von Heizöl

Tabelle 9
Abschätzung der Anzahl an Ölfeuerungsanlagen der WRL auf Landkreisebene /4/, /5/, /30/

LK	Wohngebäude (WG)	Wohnungen (Whg)	Ø Größe Whg. [m²]	Anzahl WG mit Ölfeuerungsanlagen
GR	66.723	149.916	77	14.679
BZ	75.944	155.810	79	16.708
LDS	50.877	85.414	89	7.123
EE	32.694	57.429	86,5	4.577
OSL	29.019	64.240	79	4.063
CB	15.471	58.202	72	2.166
SPN	33.569	64.299	86	4.700

Gemäß Abschätzung befinden sich in den sächsischen Landkreisen Bautzen und Görlitz die meisten Ölfeuerungsanlagen in der WRL. Zur Substitution des Heizöls durch Wasserstoff wird im Folgenden der bisher benötigte und durch Heizöl gedeckte Jahresenergiebedarf für Wohngebäude ermittelt (s. Tabelle 10). Die Grundlage bildet ein durchschnittlicher Heizölbedarf[26] in Höhe von 13,6 l/m²/a bzw. 136 kWh/m²/a /31/ /32/.

Tabelle 10
Ermittelter Jahresenergiebedarf der Ölfeuerungsanlagen in der WRL nach Landkreisen

LK	Whg. mit Ölfeuerung	Ø Größe Whg.	Beheizte Wohnfläche [m²]	Jahresenergiebedarf Heizöl [l/a]	Jahresenergiebedarf Heizöl [kWh/a]
GR	32.982	77	2.539.577	34.538.248	345.382.477
BZ	34.278	79	2.707.978	36.828.498	368.284.981
LDS	11.958	89	1.064.258	14.473.915	144.739.148
EE	8.040	86,5	695.465	9.458.327	94.583.266
OSL	8.994	79	710.494	9.662.724	96.627.238
CB	8.148	72	586.676	7.978.796	79.787.958
SPN	9.002	86	774.160	10.528.575	105.285.755
WRL					**1.234.690.823**

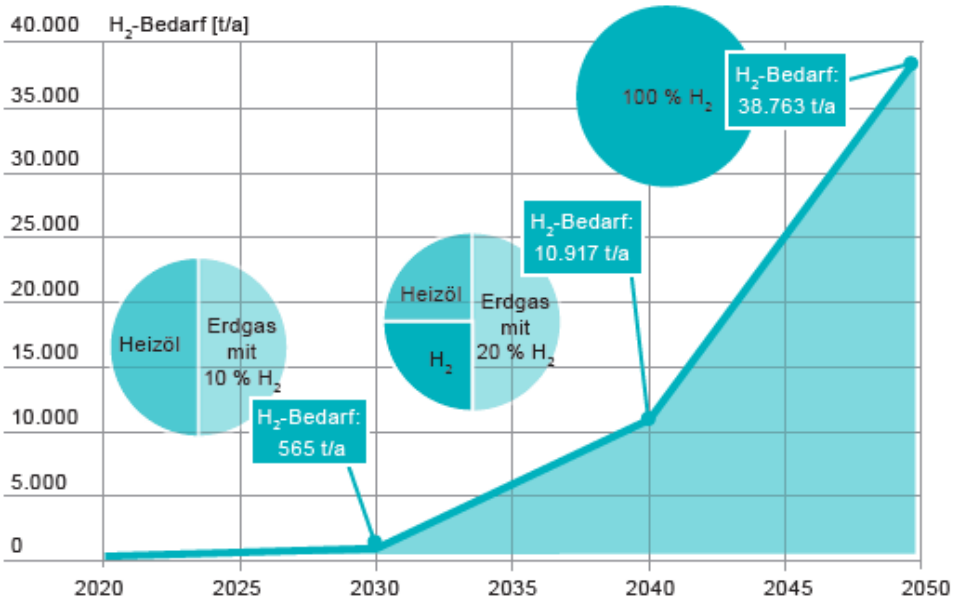
[26] Berücksichtigt werden das durchschnittliche Alter der Ölfeuerungsanlagen von etwa 16 Jahren sowie das durchschnittliche Alter des Gebäudebestands in Sachsen und Brandenburg /33/.

Würde der Jahresenergiebedarf der WRL für Raumwärme und Warmwasser, welcher bisher durch Heizöl gedeckt wird, zu allen Anteilen durch Wasserstoff[27] substituiert, so ergibt sich ein Wasserstoffbedarf in Höhe von etwa 37.000 t/a. Die kurz- und mittelfristige Substition durch Wasserstoffheizungen ist nicht absehbar, da diesem derzeit einige Hindernisse[28] im Weg stehen.

Mancherorts ist ein Anschluss an das Erdgasnetz denkbar. Etwa 50 % der Haushalte mit Ölfeuerungsanlagen in Deutschland liegen im erdgasberohrten Gebiet /33/, damit wäre ein kurzfristiger Anschluss und Umstieg auf Erdgas möglich. Diese Annahme wird für die Szenarienentwicklung für die WRL übernommen.

Der Wasserstoffbedarfsabschätzung (s. Grafik 35) liegen die folgenden Annahmen zu Grunde. Bestehende Ölheizungen haben bis auf weiteres Bestandsschutz. Es erfolgt des Weiteren keine Neuinstallation von Ölheizanlagen, sodass der Bestand weiterhin rückläufig ist. Der Anteil von Wasserstoff im Erdgasnetz steigt. Der ermittelte Jahresenergiebedarf bleibt konstant und wird schrittweise und anteilig ersetzt durch:

- bis 2030:
  50 % Erdgas (H2-Einspeisung 10%)
- bis 2040:
  50 % Erdgas (H2-Einspeisung 20 %),
  25 % Wasserstoff-Heizanlage
- bis 2050:
  100 % Wasserstoff-Heizanlage



Grafik 35
Wasserstoffbedarf bei steigender Substitution von Heizöl durch reines H2 sowie einem H2-Erdgas-Gemisch für Raumwärme und Warmwasser

[27] unterer Heizwert Wasserstoff mit 33,33 kWh pro kg

[28] Derzeit ist das Marktangebot von Wasserstoffheizungen bzw. BHKW für die private Heimanwendung nur schwach ausgeprägt. Trotz zunehmender staatlicher Förderungen hierfür sind die Anschaffungskosten noch sehr hoch. Bisher sind nur wenige Installationsbetriebe für die Montage und Wartung derartiger Anlagen ausgerüstet.

Substitution Braunkohle

Die Kraftwerksstandorte der gegenwärtigen Braunkohleverstromung Jänschwalde, Boxberg und Schwarze Pumpe sind für die Grundlasterzeugung von nationaler Bedeutung. Von besonderer regionaler Bedeutung sind die Kraftwerksstandorte als Wirtschaftsfaktor und Arbeitgeber. Für die folgende Betrachtung wird daher davon ausgegangen, dass die Kraftwerksstandorte über 2038[29] als H2-Speicherkraftwerke weiterbetrieben werden.

Tabelle 11
Übersicht der Kraftwerksblöcke in der WRL

Kraftwerk	Block	Leistung
Jänschwalde	A	500 MW
	B	500 MW
	C	500 MW
	D	500 MW
	E	500 MW
	F	500 MW
Boxberg	N	500 MW
	P	500 MW
	Q	900 MW
	R	675 MW
Schwarze Pumpe	A	800 MW
	B	800 MW

Die installierten Blöcke der Kraftwerke leisten zusammen 7.175 MW (s. Tabelle 11). Am 30.09.2018 ging im Kraftwerk Jänschwalde Block F in die Sicherheitsbereitschaft, am 30.09.2019 folgte der Block E. Für die weiteren Betrachtungen wird davon ausgegangen, dass sich die restlichen Braunkohleblöcke mit einer verbleibenden Leistung von 6.175 MW bis zum 31.12.2038 in Betrieb befinden und zum 01.01.2039 keine Braunkohleverstromung mehr stattfindet (geplantes Kohleausstiegsgesetz). Im Weiteren wird davon ausgegangen, dass der Ersatz der Braunkohlekraftwerke durch die Technologie des „Speicherkraftwerkes“ gemäß dem bestätigten Reallabor „Referenzkraftwerk Lausitz - Entwicklung eines Referenzkraftwerks in der Region Lausitz als Leitkonzept für die Transformation der braunkohlebasierten Energiewirtschaft“ durchgeführt wird.

Um ab 2038 annähernd die bisher erzeugte Leistung durch dann wasserstoffbasierte Kraftwerke zu ersetzen, ist schon im Übergangszeitraum im Vorfeld der Aufbau eines wasserstoffbasierten Kraftwerksparks notwendig (s. Grafik 36). Dazu wird ein möglicher Rahmenterminplan skizziert:

Mit der detaillierten Planung und dem Aufbau des 10 MW-Referenzkraftwerkes Lausitz kann im Jahr 2022 begonnen werden, so dass der Anlagenbetrieb im Jahr 2024 aufgenommen werden kann. Ab 2024 soll dann auch die Planung für ein 100 MW-Demonstrationskraftwerk beginnen, so dass ab 2028 die Inbetriebnahme erfolgen kann. Bei der kommerziellen Kraftwerksgröße werden im Unterschied zu Braunkohlekraftwerken etwas kleinere Leistungsklassen festgelegt. Aus heutiger Sicht könnten zukünftige wasserstoffbetriebene Kraftwerksblöcke eine Leistungsgröße von 250 MW haben. Bis zum Jahr 2038 werden 24 x 250 MW-Kraftwerksblöcke errichtet, die dann insgesamt eine Leistung von 6.000 MW haben und zum 01.01.2039 die Braunkohlekraftwerke vollständig abgelöst haben.

Die vorgenannten Leistungsgrößen beziehen sich nicht auf die Generatorleistung (Kraftwerks-Bruttoleistung) und nicht auf die Nettoleistung am Netzübergabepunkt des Kraftwerk-Übertragungsnetzes, sondern auf den Netzanschlussknotenpunkt zum Kraftwerk und stellen die jeweilige Systemleistungsaufnahme aus dem Übertragungsnetz dar.

In Tabelle 12 werden die Wasserstoffbedarfe für die drei Kraftwerks-Leistungsklassen dargestellt.

[29] voraussichtlicher „Kohleausstieg“.

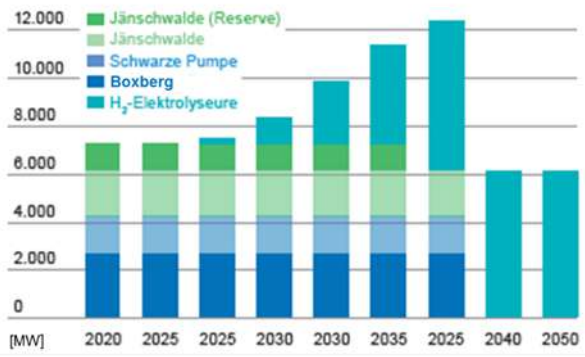
Tabelle 12
Wasserstoffbedarfe je Kraftwerk-Leistungsklasse

Leistungsklasse	Wasserstoffverbrauch [4) 5)]		
10 MW_e [1)]	2.080 Nm^3/h	187 kg/h	1) Leistungsaufnahme des Elektrolyseurs bei einer Systemeffizienz von 4,8 kWh/Nm^3
100 MW_e [2)]	21.280 Nm^3/h	1.910 kg/h	2) Leistungsaufnahme des Elektrolyseurs bei einer Systemeffizienz von 4,7 kWh/Nm^3
250 MW_e [3)]	55.560 Nm^3/h	4.995 kg/h	3) Leistungsaufnahme des Elektrolyseurs bei einer Systemeffizienz von 4,5 kWh/Nm^3
			4) Nennleistung
			5) Nm^3 ist definiert bei 0°C und 101325 Pa Absolutdruck mit der Dichte 0,0899 kg/Nm^3

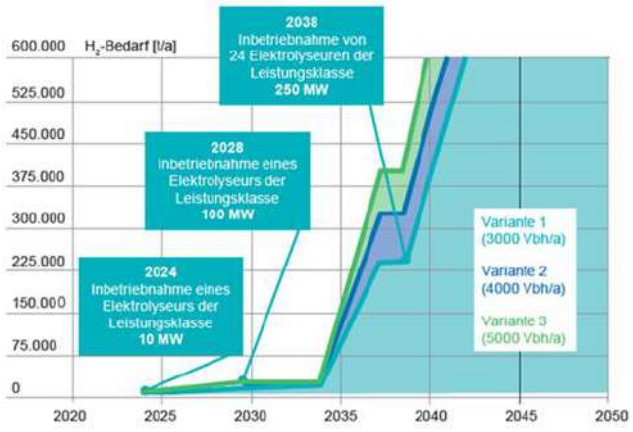
Im Gegensatz zu den Braunkohlekraftwerken, welche die Leistungsabgabe nur bis zu einer Mindestleistung von zumeist 40 % verringern können, können die neuen wasserstoffbeheizten Kraftwerke quasi ihre Leistung auch umkehren. Dazu wird bei Produktionsüberschuss aus den regenerativen Quellen stoßfrei von Brennstoffzellen- auf Elektrolyseurbetrieb umgeschaltet. Der zugehörige Umrichter passt wieder die Spannung an und der Elektrolyseur erzeugt Wasserstoff im passenden Druckniveau. Das wasserstoffbeheizte Kraftwerk kann somit auch als H2-Speicherkraftwerk bezeichnet werden.
Für das Speicherkraftwerk ist eine Elektrolyseleistung von mindestens 10 MW vorgesehen. Die Brennstoffzelle wird für eine Leistung von 2 MWe ausgelegt. Parallel zur Brennstoffzelle wird eine wasserstoffbeheizte Gasturbine mit 8 MWe installiert. Die Speicherleistung der Speicherbehälter beträgt 550 MWh.

Es werden 3.000 Vollastbenutzungsstunden (Vbh) zugrunde gelegt. Die 10 MW-Pilotanlage wird mit 3.000 Vbh betrieben, Ende des Jahres 2029 aber außer Betrieb genommen. Planung/Bau der ersten kommerziellen H2-Speicherkraftwerke erfolgt ab 2032, so dass ab 2035 die ersten vier 250 MW-Blöcke in Betrieb gehen können. Danach werden ab 2036 und 2037 jeweils sechs Blöcke in Betrieb genommen. Das 100 MW-Demonstrationskraftwerk kann 2038 vom Netz gehen, dafür werden acht weitere 250 MW-Blöcke in Betrieb genommen. Ab 01.01.2039 sind damit genau 6.000 MW-Kraftwerksleistung auf Basis von Wasserstoff in Betrieb.
Der Wasserstoffbedarf (s. Grafik 37) der sich daraus ableiten lässt wird in drei Szenarien mit jeweils unterschiedlichen Vbh betrachtet:

- Szenario 1: 3.000 Vbh,
- Szenario 2: 4.000 Vbh,
- Szenario 3: 5.000 Vbh.



Grafik 36
Entwicklung der installierten Gesamtleistung [MW] von Braunkohle und Wasserstoff der WRL-Kraftwerke

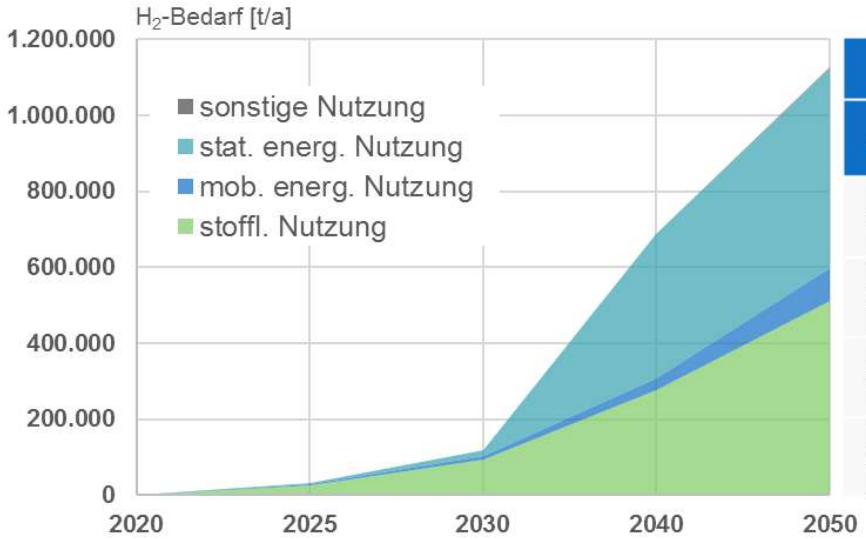


Grafik 37
Jährlicher Wasserstoffverbrauch [t/a] bei unterschiedlichen Volllastbenutzungsstunden

Wasserstoffverbrauch in der WRL

In den drei primär betrachteten Nutzungsbereichen stoffliche Nutzung, mobile energetische Nutzung und stationär energetische Nutzung bilden sich zukünftig allein in der WRL Wasserstoffbedarfe von insgesamt etwa 1,1 Mio t/a in 2050 aus (s. Grafik 38). Nicht näher ausgeführt werden die unter sonstigen Nutzungen zusammengefassten, geringen Wasserstoffbedarfe der WRL durch Anwendungen von H2 bspw. in Flurförderfahrzeugen, Notstromaggregaten, Netzersatzanlagen, usw. Unter den zu Grunde liegenden Annahmen wächst der Wasserstoffbedarf in der WRL anfänglich bis etwa 2030 kontinuierlich auf vergleichsweise niedrigem Niveau. Zu Beginn dieses Zeitraums erfolgen die Initiierung zum Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft im Bereich der mobilen energetischen Nutzung, insb. durch die verpflichtende Beschaffung von emissionsfreien ÖPNV-Bussen. Der parallele Aufbau einer dafür notwendigen Tankstelleninfrastruktur trägt dazu bei, das „Henne-Ei-Problem“[30] zu lösen, so dass auch die angenommene Marktdurchdringung von weiteren BZ-Fahrzeugen realistisch erscheint. Der Anteil der stofflichen Nutzung des Wasserstoffs überwiegt jedoch schon von Beginn an das Bedarfspotential und steigt bis 2050 gleichmäßig. Die benötigten Wasserstoffmengen zur Produktion von E-Fuels für den Flug- und Straßenverkehr sind hoch (in Abhängigkeit der Substitutions- und Beimischraten zum fossilen Treibstoff). Des Weiteren tragen die Anstrengungen zur Dekarbonisierung der Stahlherstellung zu einem hohen und steigenden Wasserstoffbedarf bei. Der starke Anstieg des Wasserstoffbedarfs in der WRL ab 2030 wird maßgeblich durch die Inbetriebnahme der wasserstoffbetriebenen Kraftwerksblöcke der H2-Speicherkraftwerke (bis zu 6.000 MW) bedingt.

Würde die Erzeugung der benötigen Mengen von Wasserstoff durch die Wasserelektrolyse realisiert werden, sind die in Grafik 38 dargestellten Elektrolyseleistungen in der WRL erforderlich.

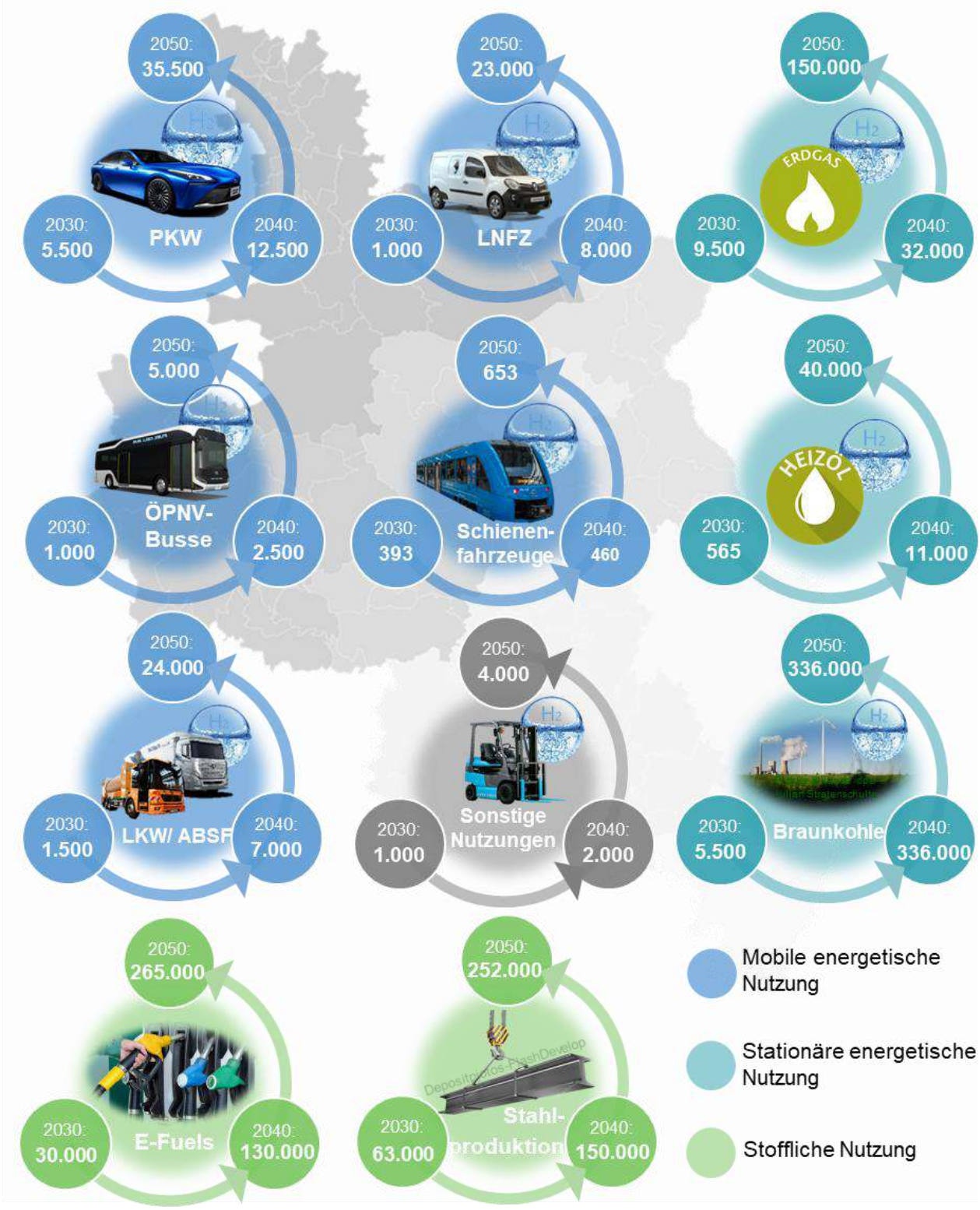


Elektrolyseleistung [MW]		
Jahr	Volllast	Teillast (50 %)
2020	5	11
2030	771	1.543
2040	4.486	8.973
2050	7.349	14.698

Grafik 38
Wasserstoffbedarfspotentiale der WRL nach Nutzungsbereichen für den Zeitraum 2020 bis 2050

[30] Bezug zum Problem, dass der Aufbau einer H2-Tankinfrastruktur aufgrund fehlenden H2-Absatzes nicht rentabel ist. Umgekehrt kommt es zu keiner nennenswerten Marktdurchdringung von H2-Fahrzeugen, mit der Begründung, dass keine ausreichende H2-Tankinfrastruktur existiert.

Die für die Jahre 2030, 2040 und 2050 resultierenden Wasserstoffbedarfe der betrachteten Nutzungsbereiche sind in Grafik 39 detailliert für die untersuchten Nutzungsbereiche dargestellt. Die Bedarfe für die sonstigen Nutzungen (z. B, Flurförderfahrzeuge, Notstromaggregate) sind nicht näher detailliert und unterliegen Schätzungen.



Grafik 39
Zusammenfassende Darstellung des H2-Bedarfs [t/a] in der WRL für den Zeitraum 2020 – 2050

Potentielle Standorte für Elektrolyseure zur Erzeugung von H2 in der WRL

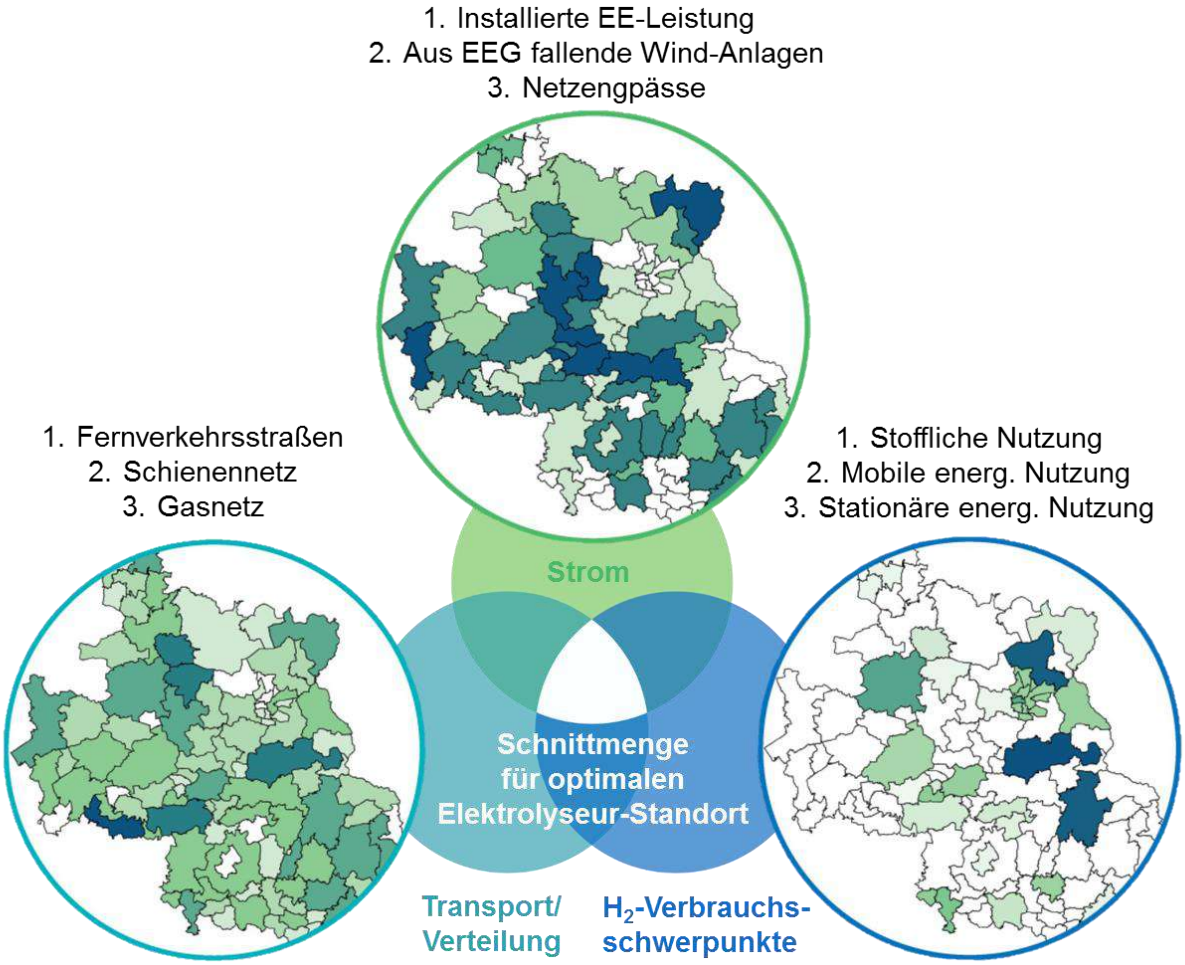
Die Abschätzung potentieller Standorte für Elektrolyseure (EL) zur Erzeugung von Wasserstoff in der WRL wird anhand der folgenden unterschiedlich gewichteten Hauptkriterien durchgeführt:

- Strom
  (Gewichtung: 3)
- H2-Verbrauchsschwerpunkte
  (Gewichtung: 2)
- Transport
  (Gewichtung: 1)

Wie in Grafik 40 zu erkennen, werden die Hauptkriterien weiterhin in Unterkriterien unterteilt.

Jedes Postleitzahlengebiet (PLZ-Gebiet) in der WRL wird anhand der einzelnen Unterkriterien mit einem Wert zwischen 0 und 1 bewertet. Unter Verwendung der definierten Gewichtungen sowie Aufsummierung und Mittelwertbildung der Werte für jedes Unterkriterium erfolgt abschließend die Bewertung eines jeden PLZ-Gebietes hinsichtlich seines Potentials als EL-Standort.

Im Folgenden werden die Vorgehensweise sowie die Ergebnisse zur Potenzialermittlung für EL-Standorte näher erläutert.



Grafik 40
Zieldreieck zur Ermittlung optimaler Elektrolyseur-Standorte (mit Nennung der Haupt-und Unterkriterien)

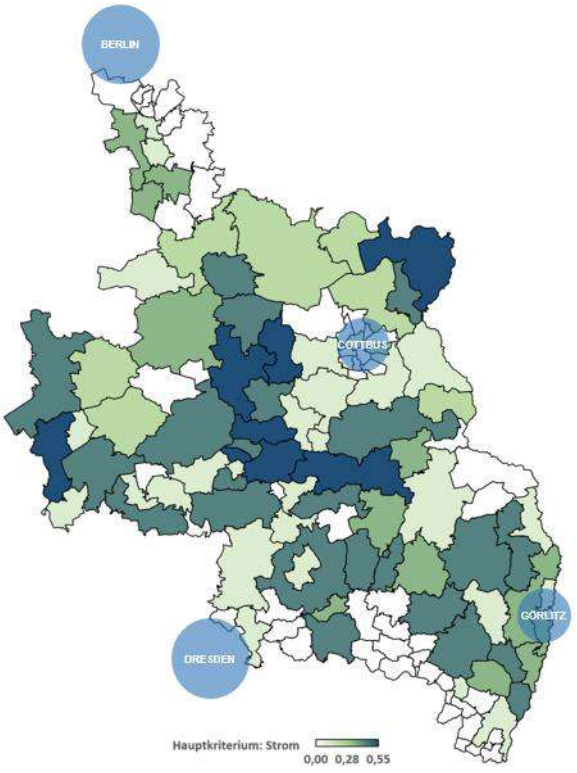
Hauptkriterium Strom

Für jedes Unterkriterium des Hauptkriteriums „Strom“ erfolgt die Definition von Werten zwischen 0 und 1 zur Bewertung der Postleitzahlengebiete. Diese sind:

- Installierte EE-Leistung (Wind, PV)
  - EE[31] < 10 MW: 0
  - 10 MW ≤ EE < 100 MW: 0,33
  - 100 MW ≤ EE < 250 MW: 0,66
  - 250 MW ≤ EE: 1
- Aus EEG fallende Windanlagen
  - WL[32] < 10 MW: 0
  - 10 MW ≤ WL < 100 MW: 0,33
  - 100 MW ≤ WL < 250 MW: 0,66
  - 250 MW ≤ WL: 1
- Netzengpässe
  - Kein Netzengpassgebiet: 0
  - Netzengpassgebiet: 1

Bei dem Unterkriterium „Installierte EE-Leistung (Wind, PV)“ wird davon ausgegangen, dass nur die Ausfallarbeit von EE-Anlagen (abgeregelte Anlagen durch Erzeugungsspitzen im Netz) zur Erzeugung von CO2-freiem Wasserstoff genutzt wird. Weiterhin wird von folgenden Zusammenhang ausgegangen: Je mehr installierte EE-Leistung in einem PLZ-Gebiet vorhanden ist, umso mehr Ausfallarbeit durch Netzspitzen wird zur Erzeugung von Wasserstoff mittels Elektrolyse bereitstehen (Voraussetzung: direkte Leitung zwischen EE-Anlage und Elektrolyseur). Daraus folgt, je mehr installierte EE-Leistung in einem PLZ-Gebiet vorhanden ist, umso höher ist das Potential für einen optimalen Elektrolyseur-Standort.
Dahingegen ist die Annahme für das Unterkriterium „Aus EEG fallende Windanlagen“, dass die erzeugte Energie solcher Windanlagen vollständig für die Erzeugung von Wasserstoff genutzt wird. D. h., je mehr EEG-freie Wind-Anlagen sich in einem PLZ-Gebiet befinden, umso höher ist die Bewertung des PLZ-Gebiets als optimaler EL-Standort.

Von Netzengpässen wird gesprochen, wenn erzeugter Strom nicht vom Erzeugungsort zum Verbraucher gelangt, weil das Stromnetz überlastet ist. Ist diesem Fall müssen Anlagen abgeregelt werden und es kommt zu Ausfallarbeit durch Netzengpässe. Ähnlich wie beim Unterkriterium „Installierte EE-Leistung (Wind, PV)“ wird beim Unterkriterium „Netzengpässe“ davon ausgegangen, dass die Ausfallarbeit von EE-Anlagen durch Netzengpässe zur Erzeugung von Wasserstoff genutzt werden kann. Zur Bewertung dieses Unterkriteriums wurden die von den in der WRL vertretenen Netzbetreiber (ENSO, E.DIS, MITNETZ) ermittelten Netzengpassgebiete herangezogen.
Das Ergebnis der durchgeführten Bewertung anhand des Hauptkriteriums „Strom“ ist in der Grafik 41 dargestellt. Dabei zeigt sich, dass insbesondere die in der WRL zentral gelegenen PLZ-Gebiete sehr hohe Bewertungen (max. 0,55) bezüglich des Hauptkriteriums „Strom“ als EL-Standorte aufweisen.



Grafik 41
Ergebnis potenzieller EL-Standorte für das Hauptkriterium „Strom“

[31] Installierte EE-Leistung (EE)

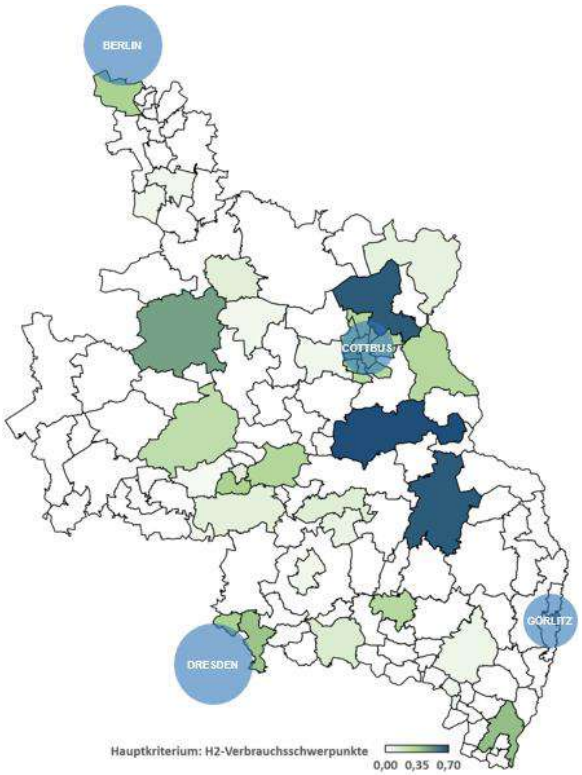
[32] Installierte Leistung von aus EEG fallende Windanlagen (WL)

Hauptkriterium H2-Verbrauchsschwerpunkte

Für dieses Hauptkriterium werden folgende Werte für die Unterkriterien zur Bewertung der PLZ-Gebiete festgelegt:

- Stoffliche Nutzung
  - Keine stoffliche Nutzung: 0
  - Stoffliche Nutzung: 1
- Mobile energetische Nutzung
  - Busdepots
    - Keine Busunternehmen: 0
    - Kleine Busunternehmen: 0,11
    - Mittlere Busunternehmen: 0,22
    - Große Busunternehmen: 0,33
  - Nicht elektrifizierte Bahnstrecken
    - Keine Haltestellen: 0
    - Haltestellen: 0,16
    - Bahnhöfe: 0,33
  - Tankstellen (direkte Nähe zu Fernverkehrsstraßen)
    - Keine Tankstelle: 0
    - Tankstelle: 0,16
    - Raststätte: 0,33
- Stationäre energetische Nutzung
  - Kein Gasversorger: 0
  - Gasversorger: 0 bis 1
  - Kraftwerksstandorte: 1

Die Bewertung der Unterkriterien erfolgt mit Hilfe des im vorherigen Abschnitt ermittelten potentiellen H2-Bedarfs in der WRL.
Für die Bewertung des Unterkriteriums „Stoffliche Nutzung“ wurden die PLZ-Gebiete ermittelt, in welchen zukünftig die Herstellung von E-Fuels erfolgen könnte (z. B. E-Fuels für Straßenverkehr an den Standorten der Kohlekraftwerke, synthetisches Kerosin in direkter Flughafennähe) bzw. die Herstellung von Roheisen bereits jetzt schon erfolgt. Für diese PLZ-Gebiete besteht ein hohes Potential für die Installation von Wasserstofferzeugungsanlagen.
An Busdepots, Bahnstrecken (H2-betriebene) und Tankstellen in direkter Nähe zu Verkehrsstraßen wird es in einer Wasserstoffwirtschaft zukünftig zu einem sehr hohen H2-Bedarf kommen. Für die Ermittlung von potentiellen EL-Standorten bezüglich des Unterkriteriums „mobile energetische Nutzung“ ist daher zu ermitteln, in welchen PLZ-Gebieten z. B. große Busunternehmen, Bahnhöfe und (Autobahn-) Raststätten vorhanden sind.
Für das Unterkriterium „Stationäre energetische Nutzung“ wurde untersucht, ob in einem PLZ-Gebiet lokale Gasversorger zur zukünftigen Einspeisung von Wasserstoff in das Gasnetz oder Kraftwerksstandorte (Weiterentwicklung zu H2-Speicherkraftwerken) vorhanden sind. Für PLZ-Gebiete mit Gasversorgern oder Kraftwerksstandorten ist dementsprechend ein hohes Potential für EL-Anlagen gegeben.
In der Grafik 42 ist das Ergebnis für das Hauptkriterium „H2-Verbrauchsschwerpunkte“ dargestellt. Insbesondere PLZ-Gebiete in den die Kraftwerksstandorte und Gasversorger mit hohem Gasbedarf liegen, haben demnach hohes Potential als EL-Standorte.



Grafik 42
Ergebnis potenzieller EL-Standorte für das Hauptkriterium „H2-Verbrauchsschwerpunkte“

Hauptkriterium Transport/Verteilung

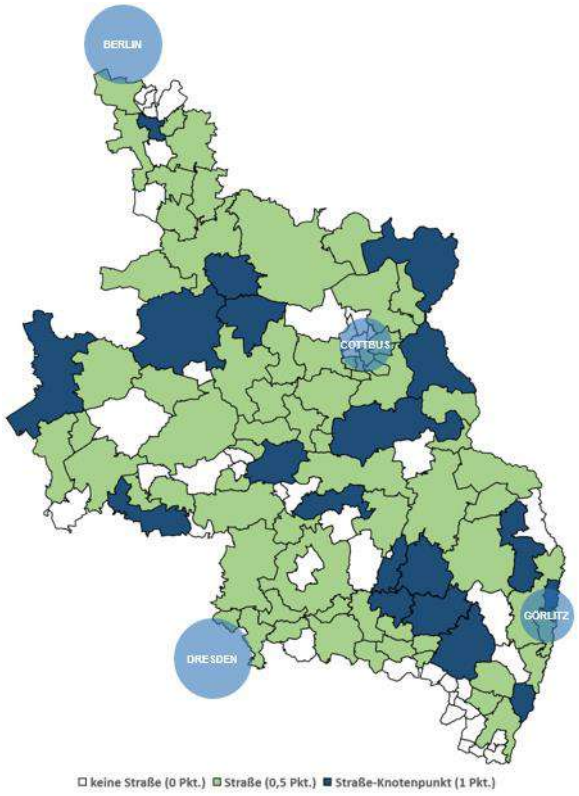
Das Hauptkriterium „Transport/Verteilung“ beinhaltet die folgenden Werte für Unterkriterien zur Bewertung der PLZ-Gebiete als mögliche EL-Standorte:

- Fernverkehrsstraßen
  - keine Straße: 0
  - durchgehende Straße: 0,5
  - Straßen-Knotenpunkt: 1
- Schienennetz
  - keine Schiene: 0
  - durchgehende Schiene: 0,5
  - Schienen-Knotenpunkt: 1
- Gasnetz
  - keine Gasleitung: 0
  - durchgehende Gasleitung: 0,5
  - Gasleitung-Knotenpunkt: 1

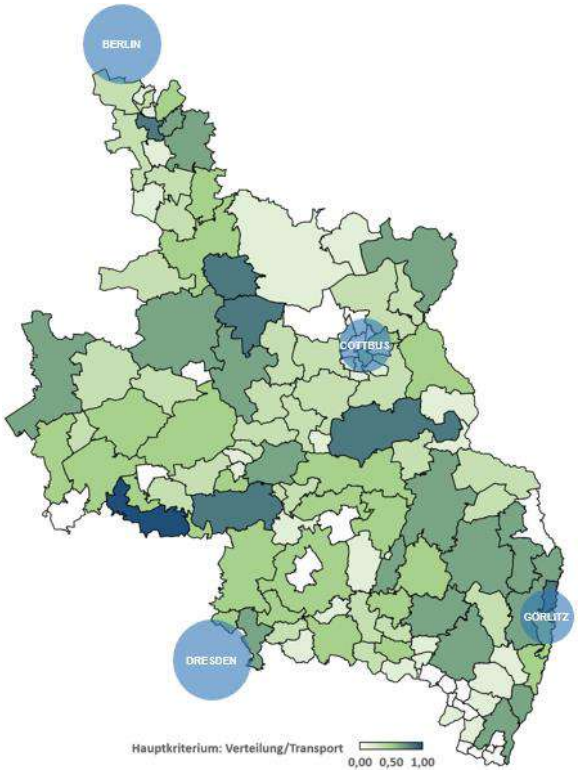
Bei dem Unterkriterium „Fernverkehrsstraßen“ wird davon ausgegangen, dass ein Transport von erzeugtem Wasserstoff zum Verbraucher per LKW erfolgen kann. Um einen schnellen Abtransport zu gewährleisten, wäre die Lage von EL-Anlagen an Fernverkehrsstraßen (Autobahnen, Bundesstraßen) sehr von Vorteil. In PLZ-Gebieten mit Straßenknotenpunkten von Fernverkehrsstraßen wäre zudem ein schneller Abtransport von Wasserstoff in mehrere Richtungen möglich. Dementsprechend haben PLZ-Gebiete mit Fernverkehrsstraßen und darüber hinaus Knotenpunkten ein sehr hohes Potential als Standortgebiet für EL-Anlagen (s. Grafik 43).

Bei den Unterkriterien „Schienennetz“ und „Gasnetz“ wird in vergleichbarer Weise bei der Bewertung der PLZ-Gebiete wie beim Unterkriterium „Fernverkehrsstraßen“ vorgegangen. Die Unterschiede hier liegen allerdings darin, dass der Transport von erzeugten Wasserstoff zum Verbraucher per Güterzug oder per Gasnetz erfolgt.

Das Ergebnis der Bewertung des Hauptkriteriums „Transport/Verteilung“ illustriert die Grafik 44. Hier zeigt sich, dass bis auf einige wenige WRL-Gebiete flächendeckend gute Bedingungen zum (Ab-)Transport von erzeugtem Wasserstoff bestehen.



Grafik 43
Ergebnis potenzieller EL-Standorte für das Unterkriterium „Fernverkehrsstraßen“



Grafik 44
Ergebnis potenzieller EL-Standorte für das Hauptkriterium „Transport/Verteilung“

Potentielle H2-Bereitstellungsstandorte in der WRL

Unter Einbeziehung aller definierten Haupt- und Unterkriterien sowie einer für einzelne Kriterien zeitlich fortlaufenden Betrachtungsweise ergeben sich die in Tabelle 13 und Grafik 45 dargestellten optimalen EL-Standortgebiete in der WRL für den Zeitraum 2020 - 2050.

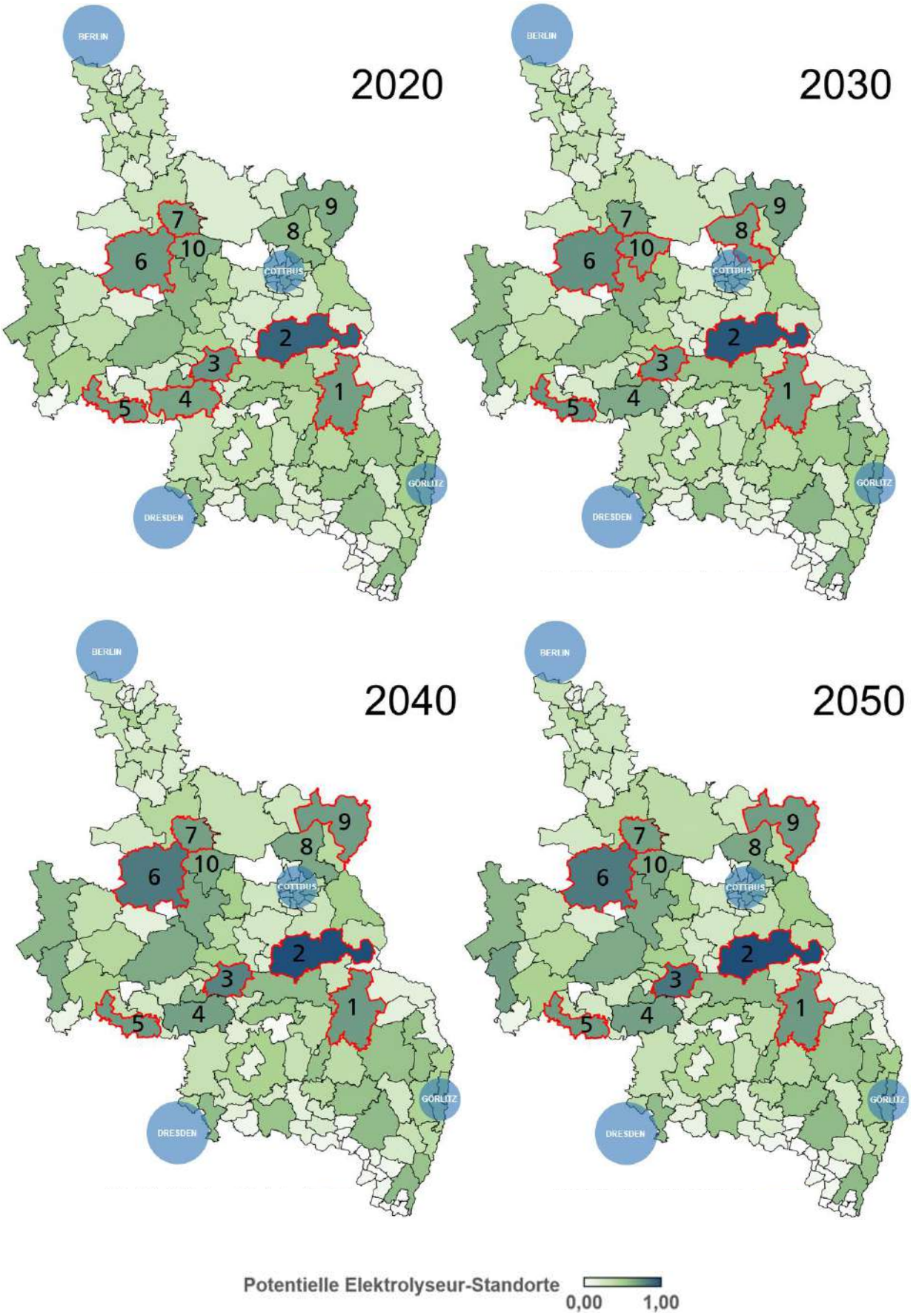
Das Hauptkriterium „Strom“ hat durch seine hohe Gewichtung den größten Einfluss auf die Standortermittlung zur Wasserstofferzeugung mittels Elektrolyse. Aufgrund dessen sind insbesondere die Gebiete an der Landesgrenze zwischen Brandenburg und Sachsen sowie die nördlichen WRL-Gebiete (speziell um Lübben, Lübbenau und Luckau sowie Guben und Peitz) als EL-Standorte zu favorisieren.
Die nördlichen Gebiete zeichnen sich im Wesentlichen dadurch aus, dass eine hohe installierte EE-Leistung vorhanden ist und aufgrund dessen zukünftig ebenfalls eine hohe Anzahl an EEG-freien Windanlagen (hierbei insbesondere das PLZ-Gebiet um Luckau; s. dazu auch nachfolgenden Abschnitt) für die Wasserstofferzeugung zur Verfügung stehen könnte.

In den WRL-Gebieten an der Landesgrenze zwischen Brandenburg und Sachsen treten gehäuft Netzengpässe auf, wodurch hier bei entsprechender regulatorischer Anpassung Ausfallarbeit zur Erzeugung von Wasserstoff genutzt werden könnte.

Bei den Betrachtungen wird davon ausgegangen, dass keine Änderung der Netzengpassgebiete bis 2050 eintritt. Bei Durchführung der angestrebten Netzausbaumaßnahmen oder bei anderweitigen sich änderten Bedingungen in den Übertragungs- und Verteilnetzen, muss eine EL-Standortbewertung anhand des Unterkriteriums „Netzengpässe“ erneut durchgeführt werden.
Besonders geeignete Standorte in der WRL für den Betrieb von Elektrolyseuren sind nach derzeitigen Stand die Gebiete um die Städte Senftenberg und Spremberg. Neben den vorab genannten Möglichkeiten zur Stromverfügbarkeit wird hier in einer zukünftigen Lausitzer Wasserstoffwirtschaft ein hoher Wasserstoffbedarf (durch z. B.: Standort für zukünftiges H2-Speicherkraftwerk, E-Fuel-Herstellung) vorhanden sein. Weiterhin bestehen sehr gute Bedingungen vorhandenen Wasserstoff per Straße, Schiene oder Gasnetz (nur Spremberg) ab- oder auch bei Bedarf anzutransportieren.
Die in Grafik 45 dargestellten Änderungen (rot eingerahmte PLZ-Gebiete mit jeweils höchster Bewertung als optimale Standorte zur EL-Wasserstoffherstellung) sind im Wesentlichen durch die über die Zeit aus dem EEG fallenden Windanlagen getrieben.
Insgesamt lässt sich jedoch feststellen, dass zwischen 2020 - 2050 keine wesentlichen Änderungen der optimalen EL-Standorte in der WRL zu erwarten sind, wodurch sich eine gewisse Investitionssicherheit für potentielle EL-Betreiber ableiten lässt.

Tabelle 13
Potentielle PLZ-Gebiete für die Wasserstoffelektrolyse in der WRL (Hinweis: stellt keine Rangliste dar)

Zuordnung	Postleitzahl	Gebiet	Gesamtbewertung
1	02943	**Weißwasser**	**0,66 – 0,71**
2	03130	**Spremberg**	**0,90 – 1,00**
3	01968	**Senftenberg**	**0,70 – 0,85**
4	01945	**Ruhland**	**0,63 – 0,68**
5	04932	**Röderland**	**0,66 – 0,71**
6	15926	**Luckau**	**0,68 – 0,83**
7	15907	**Lübben**	**0,64 – 0,70**
8	03185	**Peitz**	**0,56 – 0,66**
9	03172	**Guben**	**0,60 – 0,70**
10	03222	**Lübbenau**	**0,55 – 0,66**



Grafik 45
Potentielle PLZ-Gebiete für die Wasserstoffelektrolyse in der WRL für den Zeitraum 2020 – 2050 (rot eingerahmte PLZ: jeweils die sieben PLZ mit höchster Bewertung)

Verfügbare EE-Kapazitäten für die Wasserstoffelektrolyse in der WRL

Für die Erzeugung von grünem Wasserstoff werden in der vorliegenden Studie folgende zwei Möglichkeiten in Betracht gezogen:

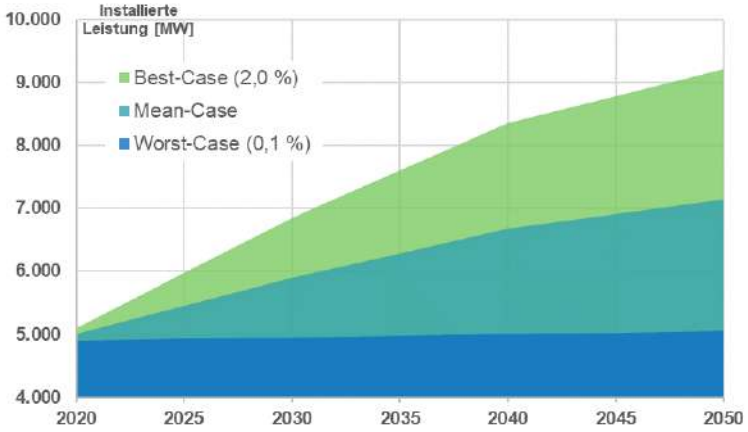
- Nutzung von Ausfallarbeit durch abgeregelte EE-Anlagen
- Aus EEG fallenden Windanlagen

Auf beide Möglichkeiten wird im weiteren Verlauf näher eingegangen.

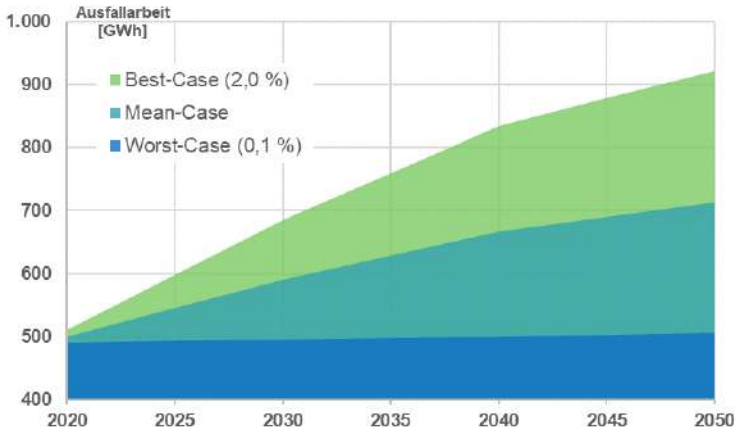
Ausfallarbeit

Stand 2020 sind in der sächsischen und brandenburgischen Lausitz ca. 5,1 GW installierte EE-Leistung (Wind, PV) mit einer jährlichen Bruttostromerzeugung von ca. 6.300 GWh (jährliche durchschnittliche Volllaststunden (Wind, PV): ca. 15 %) vorhanden /55/. Weiterhin kann mit Hilfe der abgeschätzten national anfallenden Ausfallarbeit von EE-Anlagen /56/ berechnet werden, dass in der WRL jährlich ca. 500 GWh elektrische Energie durch die Abregelung von Anlagen nicht genutzt werden kann.

Bei entsprechend regulatorischer Anpassung (z. B. Honorierung der Netzdienlichkeit von Elektrolyseuren) könnte die in der WRL anfallende Ausfallarbeit zur wirtschaftlich tragfähigen Erzeugung von grünem Wasserstoff genutzt werden. Dadurch wären zum jetzigen Stand und bei einer durchschnittlichen Elektrolyseursleistung von ca. 420 kg/MW*d die Produktion von jährlich ca. 9.000 t Wasserstoff möglich. Damit könnte in der Einführungsphase bzw. dem anfänglichen Markthochlauf einer Wasserstoffwirtschaft in etwa der ermittelte H2-Bedarf im Verkehr (mobile energetische Nutzung) in der WRL gedeckt werden. Eine WRL-eigene Deckung des weitaus höheren H2-Bedarfs für die stoffliche und stationäre energetische Nutzung wäre nicht möglich.



Grafik 46
Abgeschätzte Entwicklung der installierten EE-Leistung in der Lausitz

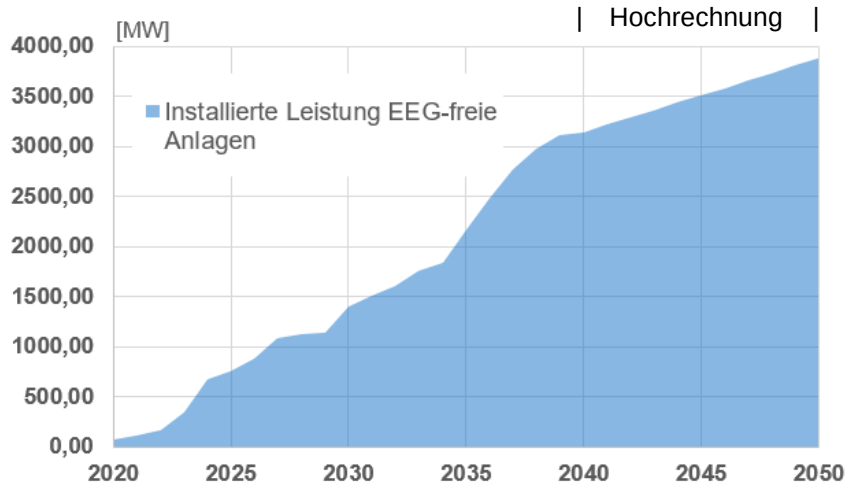


Grafik 47
Abgeschätzte Entwicklung der Ausfallarbeit in der Lausitz

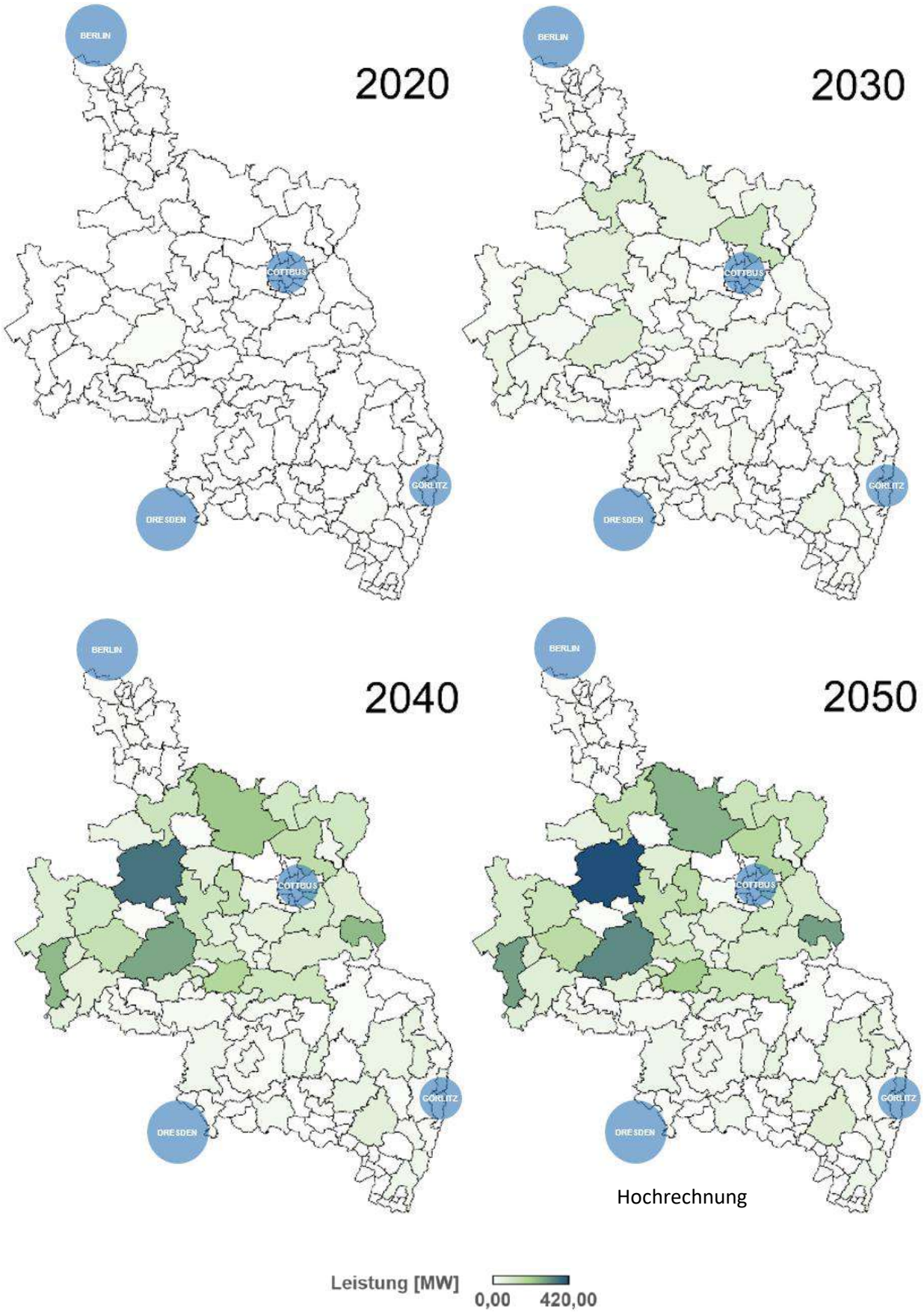
Unter Betrachtung der in Grafik 47 dargestellten abgeschätzten möglichen Weiterentwicklung (Best Case: 2,0 %[33] Zubaurate von Wind- und PV-Anlagen) der installierten EE-Leistung (Wind, PV) in der WRL wird deutlich, dass sich auch zukünftig mit Ausfallarbeit[34] einzig der H2-Bedarf des Verkehrssektors decken lassen wird.

EEG-freie Windanlagen

Eine weitere Möglichkeit zur Erzeugung von grünem Wasserstoff ist die Nutzung von aus dem EEG fallender Windanlagen. Eine Analyse der Inbetriebnahmedaten der in der Lausitz installierten Windanlagen (Stand: 2020) ergibt, dass bis 2030 bzw. 2040 ca. 1.400 bzw. 3.200 MW EEG-freie Windenenergie zur Verfügung stehen könnte (s. Grafik 48; Voraussetzungen: kein repowering, Weiternutzung von EEG-freien Windanlagen). Dies würde unter der Annahme durchschnittlicher jährlicher Volllastbenutzungsstunden (Wind) von 19 % einer Bruttostromerzeugung von ca. 2.300 bzw. 5.300 GWh entsprechen /55/.
Unter der weiteren Annahme, dass im Zeitraum 2020 - 2030 die durchschnittliche jährliche Zubaurate von neuen Windanlagen in der WRL 2,0 % beträgt, wird sich die installierte Leistung von EEG-freien Windanlagen auf ca. 3.900 MW mit einer Bruttostromerzeugung von ca. 6.500 GWh erhöhen (Annahme: durchschnittliche jährliche Volllastbenutzungsstunden von 19 %).
Mit einer durchschnittlichen Elektrolyseursleistung von ca. 420 kg/MW*d und der Voraussetzung, dass alle EEG-freien Anlagen genutzt werden, sind damit jährliche Produktionen an grünen Wasserstoff von ca. 40.000 t (2030), 94.000 t (2040) und 114.000 t (2050) möglich. Dadurch könnten die für den Zeitraum 2020 – 2050 analysierten Bedarfe für die mobile energetische und zu geringen Teilen der stofflichen und stationären energetischen Nutzung gedeckt werden. Die vollständige Deckung eines evtl. zukünftigen H2-Bedarfs in der Lausitz und dies insbesondere ab 2030 ist auch mit EEG-freien Windanlagen nicht möglich. Die Grafik 49 zeigt, dass insbesondere in der brandenburgischen Lausitz bis 2050 eine Vielzahl von EEG-freien Windanlagen für eine mögliche Erzeugung von Wasserstoff zur Verfügung stehen könnte.
Um eine annähernd vollständige Deckung des H2-Bedarfs in der WRL bis 2050 mit EEG-freien Windanlagen zu erreichen, müsste die jährliche Zubaurate von Windanlagen ab 2020 ca. 29 % betragen.



Grafik 48
Entwicklung (Schätzung für 2040 – 2050; Zubaurate: 2,0 %) der installierten Leistung EEG-freier Windanlagen in der WRL



Grafik 49
Installierte Leistung von aus EEG fallenden Windanlagen für Postleitzahlengebiete der WRL und den Zeitraum 2020 - 2050

Transport/Verteilung

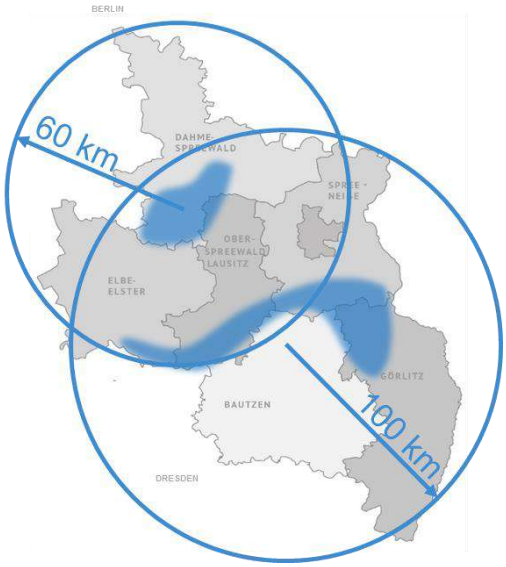
Neben einer Wasserstofferzeugungsinfrastruktur ist eine Wasserstoffverteil-[35] und Speicherinfrastruktur zum Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft von entscheidender Bedeutung. Im vorliegenden Kapitel werden die Transportmengen von zukünftig benötigtem Wasserstoff, sowie die Transportwege und die Verkehrssituation in der WRL untersucht.

Allgemein

Zu den kostenbestimmenden Faktoren beim Transport von Wasserstoff zählen die Transportmenge und Distanz. Die physikalischen und chemischen Eigenschaften und Besonderheiten von Wasserstoff müssen sowohl beim Transport, als auch bei der Speicherung Beachtung finden (sehr hohes Diffusionsvermögen, usw.). Die Wasserstofflogistik ist daher mit einem erhöhten Aufwand verbunden.
Prinzipiell kann Wasserstoff physikalisch oder stofflich gebunden gespeichert werden. Die physikalische Speicherung basiert auf der Verdichtung (350 bar bzw. 700 bar) oder Kühlung des Wasserstoffs (Verflüssigung mit Temperaturen bis -259 °C) oder einer Kombination aus beidem und ist derzeit das etablierteste Speicherverfahren für stationäre und mobile Anwendungen Die stoffliche Speicherung basiert auf festen, flüssigen oder oberflächlichen Stoffspeichern.
Weitere Speichermöglichkeiten für Wasserstoff sind im geologischen Untergrund (z.B. Salzkavernen, frühere Erdgas- oder Erdöllagerstätten) möglich. In der WRL sind derartige Wasserstoffspeicher aufgrund fehlender geologischer Voraussetzungen derzeit nicht relevant.
Der Transport von Wasserstoff erfolgt entweder in gespeicherter Form, z.B. über das Straßennetz mit LKW oder über Rohrleitungsnetze in Form von reinem gasförmigen Wasserstoff (H2-Pipeline) oder in Form von Gasgemischen (Einspeisung in das Erdgasnetz).

Transportmengen; Transportwege und Verkehrssituation in der WRL

Aus der Ableitung der Potentiale zur Nutzung von Wasserstoff in der WRL resultieren unterschiedlich hohe H2-Bedarfsmengen für verschiedene Nutzungsbereiche (s. Grafik 39).
Die Wasserstoffverteilung innerhalb der WRL wurde für die Bedarfsmengen des Verkehrssektors (mobile energetische Nutzung) auf Landkreisebene untersucht. Dabei wird von der zentralen Erzeugung des Wasserstoffs in dafür geeigneten Gebieten mit Elektrolyseurstandorten (s. oben) und dem anschließenden Transport des Wasserstoffs zu den Verbrauchern ausgegangen. Die Verbraucher bzw. Abnehmer in dieser Betrachtung sind Tankstellen mit Wasserstoffzapfpunkten. Die Transportdistanzen sind in der WRL vom Ort der geplanten Wasserstoffelektrolyse ausgehend mit etwa 100 km Radius vergleichsweise kurz (s. Grafik 50). Im Nachfolgenden wird näher auf den H2-Transport per Straßennetz und Rohrleitungsinfrastruktur eingegangen.



Grafik 50
Vom Wasserstofferzeugungsgebiet ausgehende Transportdistanzen in der WRL

Dem widersprechen allerdings die begrenzte Netzkapazität („Netzengpässe“) und derzeit gültige gesetzliche Regelungen, welche die Verwendung des Stroms hierfür sehr teuer machen („EEG-Umlage“, usw.).

[35] Es ist auch möglich den EE-Strom über das bestehende Stromnetz zu transportieren und damit eine dezentrale Wasserstoffelektrolyse durchzuführen.

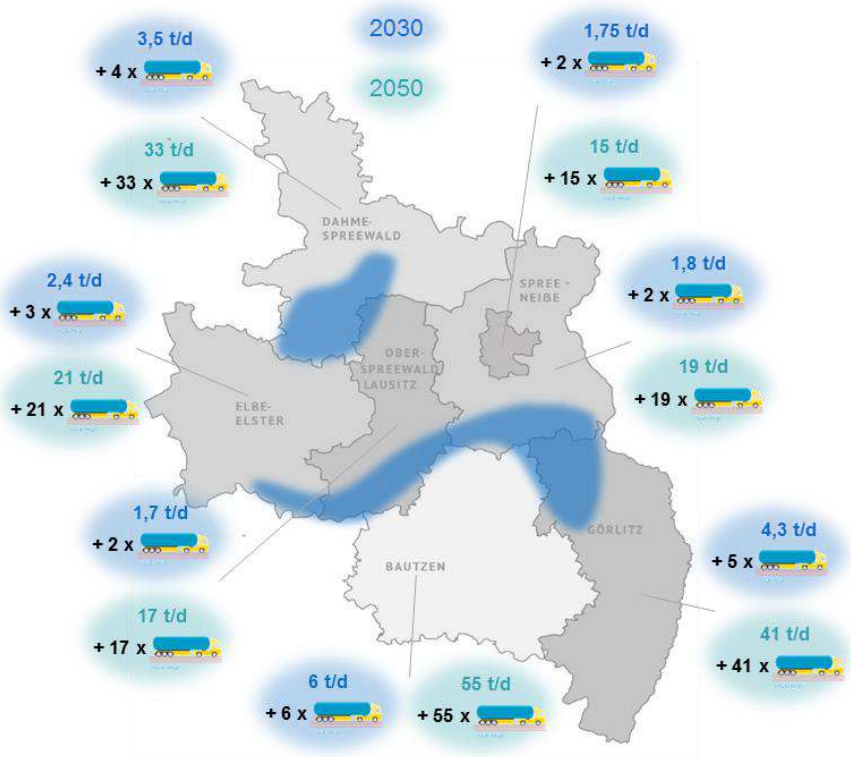
Transport per Straßeninfrastruktur

Wasserstoff kann in Speichertanks in gasförmiger oder flüssiger Form per LKW über das bestehende Straßennetz der WRL transportiert werden. Durch die WRL verlaufen in Nord-Süd-Richtung die BAB 13 sowie in Ost-West-Richtung die BAB 15 und BAB 4. Eine Vielzahl an Bundes- und Landstraßen erschließen das Gebiet der WRL.

Der gasförmige H2-Transport per LKW bietet sich für einen geringen Wasserstoffdurchsatz (bis etwa 20 t/d) und Distanzen bis etwa 300 km an. Der verflüssigte Transport per LKW bietet sich für mittlere Wasserstoffdurchsatzmengen (20 t/d - 70 t/d) und weite Distanzen (ab 300 km) an /34/.

Der Wasserstoffbedarf des WRL-Verkehrssektors (PKW, LNFZ, LKW, ABSF, Busse, Züge) von insgesamt etwa 9.000 t/a in 2030 und 90.000 t/a in 2050 wird bis auf Landkreisebene detailliert. Grundlage hierfür bilden die aktuellen Bestandszahlen der jeweiligen Fahrzeuge. Es wird ausschließlich der Transport des Wasserstoffs in gasförmiger[36] Form per LKW betrachtet. Dies bietet sich insofern an, als dass der Wasserstoff sowohl an den Tankstellen, als auch in den Fahrzeugen überwiegend in gasförmiger Form gespeichert und verbraucht wird. Ein LKW (als Container Trailer mit 500 bar) kann bis zu 1.000 kg gasförmigen Wasserstoff transportieren /7/.

In Grafik 51 sind die täglichen Wasserstoffbedarfe pro Landkreis zur Deckung des voraussichtlichen Bedarfs in 2030 und 2050, als auch die zum Transport und zur Verteilung erforderliche Anzahl an LKW dargestellt. Der Transport per LKW stellt eine zusätzliche Belastung der Straßeninfrastruktur dar und muss berücksichtigt werden. So bedingt z. B. die Versorgung und Verteilung des Wasserstoffs zur Bedarfsdeckung des Verkehrssektors im Landkreis Bautzen in 2050 bis zu 55 zusätzliche LKW pro Tag auf den Straßen.



Grafik 51
Tägliche Wasserstoffbedarfsmengen des Verkehrssektors und Anzahl an Transport-LKW auf Landkreisebene in den Jahren 2030 und 2050

[36] Der Transport in flüssiger Form bedingt weitere Peripherie (z.B. Verflüssiger). Diese ist mit zusätzlichem Energieaufwand verbunden. Aufgrund der Transportdistanzen und der erwarteten Bedarfsmengen wird diese Transportform nicht weiter betrachtet.

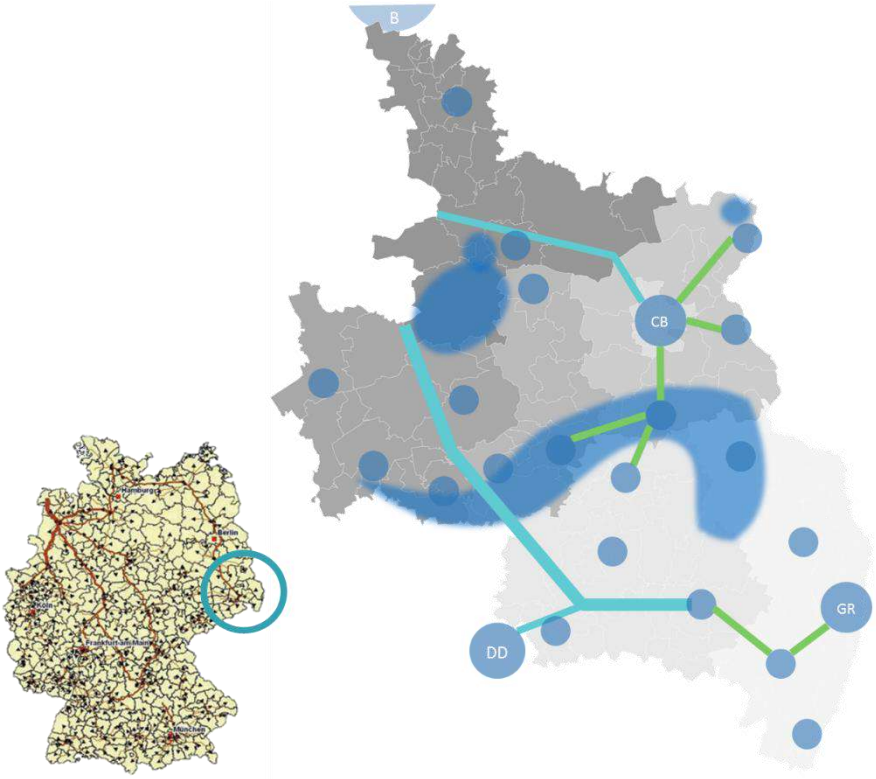
Transport per Rohrleitungsinfrastruktur

Mittlere und hohe Wasserstoffmengen (30 t/d – 100 t/d) lassen sich über kurze bis mittlere Distanzen (etwa bis 300 km) am kostengünstigsten per Wasserstoffpipeline transportieren /34/.

Zur Reduzierung der Straßeninfrastrukturbelastung durch den Transport und die Verteilung des Wasserstoffs per LKW kann die lokale Errichtung von Wasserstoffpipelines zwischen den Erzeugungsstandorten und Abnahmepunkten erwogen werden. Als Abnahme- und Verteilpunkte eignen sich aufgrund der vorhandenen Anschlüsse an das Straßen-, Strom- und Erdgasnetz und technischer Infrastruktur die bestehenden Stadtwerke in der WRL.

Die Verbindung lokaler Pipelines zu regionalen Verteilnetzen kann insbesondere zwischen größeren Abnehmern eine geeignete Option darstellen. Große Wasserstoffbedarfe entstehen einerseits durch die stoffliche Nutzung des Wasserstoffs zur E-Fuel- oder Stahlherstellung, andererseits zur stationären energetischen Nutzung in den Wasserstoffspeicherkraftwerken an den Standorten Boxberg, Jänschwalde und Schwarze Pumpe. Zwischen diesen Abnehmern mit konstantem und hohem Wasserstoffbedarf sind Verteilnetze denkbar. Der Anschluss lokaler und regionaler Verteilnetze an nationale Wasserstoffpipelines bilden einen wichtigen Beitrag zum nationalen und internationalen Wasserstofftransport. Diese Netze erlauben den Import und Export von H2 in der WRL.

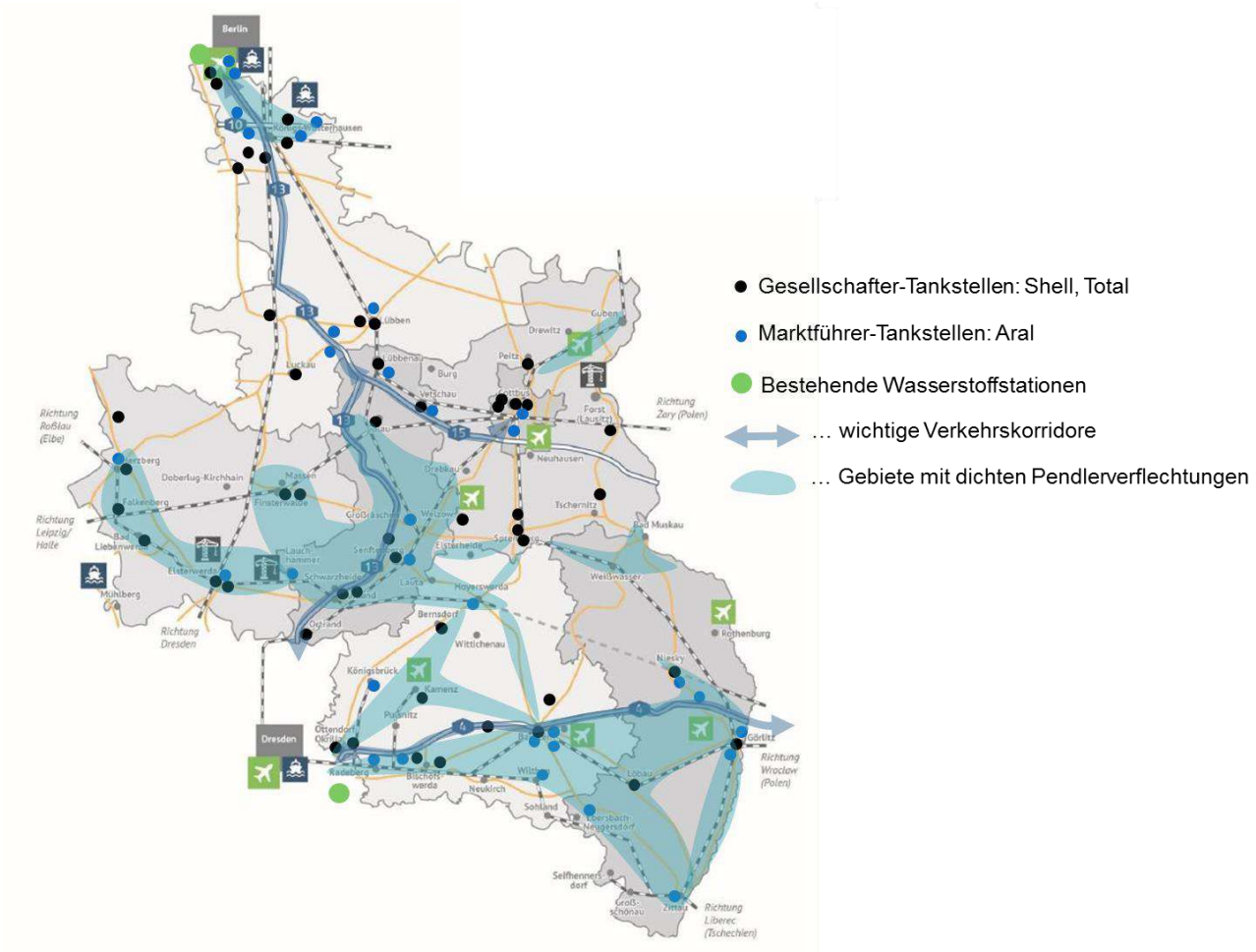
In Grafik 52 sind beispielhaft lokale Wasserstoffpipelines zwischen Erzeugungsgebieten und einzelnen Stadtwerken, als auch der Anschluss an überregionale/ nationale Wasserstoffpipelines dargestellt /18/. Die Verteilung des Wasserstoffs von den Abnahme- und Verteilpunkten zum Endabnehmer in die Fläche kann weiterhin mit dem LKW erfolgen, oder der Wasserstoff wird dort in das für H2-ertüchtigte örtliche Erdgasnetz eingespeist.



Grafik 52
Perspektivische lokale (grün) und nationale (türkis) Wasserstoffpipelines in Deutschland 2050 und Integration der Elektrolyseurstandorte sowie Abnahme- und Verteilpunkte (Stadtwerke, blau); Bild links: /18/

H2-Tankstelleninfrastruktur

Von wesentlicher Bedeutung für eine vom Verkehrssektor ausgehende Initiierung einer Wasserstoffwirtschaft in der WRL ist der Aufbau einer flächendeckenden H2-Tankstelleninfrastruktur. Derzeit befinden sich auf dem Gebiet der WRL noch keine kommerziellen Tankstellen welche Wasserstoff vertreiben. Lediglich an das Gebiet angrenzend in Dresden und Berlin-Schönefeld gibt es derzeit die Möglichkeit Wasserstoff regulär an einem Zapfpunkt zu tanken.
Für die Koordination, Planung und den Aufbau einer deutschlandweit flächendeckenden Wasserstoff-Tankstelleninfrastruktur wurde im Jahr 2015 die H2-Mobility[37] Deutschland GmbH Co. KG gegründet. Dies ist ein Zusammenschluss der Unternehmen Air Liquide, Daimler, Linde, OMV, Shell und Total mit weiteren assoziierten Partnern.
Wasserstoffstationen (reguläre Tankstelle mit einer oder mehreren Wasserstoffzapfpunkten) werden kurz- und mittelfristig in bereits bestehende Tankstellen der Gesellschafter integriert. Bis Ende 2020 werden so deutschlandweit voraussichtlich 100 Wasserstofftankstationen (vorzugsweise in und um Ballungszentren) in Betrieb genommen worden sein. Mit dem Hochlauf der BZ-Fahrzeugzahlen sollen weitere 300 Stationen /21/ flächendeckend folgen.



Grafik 53
Derzeitige Tankstelleninfrastruktur der H2 Mobility Gesellschafter Shell, Total und ergänzend des deutschen Marktführers Aral in der WRL, sowie bereits bestehende Wasserstoffstationen. Keine Darstellung sonstiger Tankstellenbetreiber.

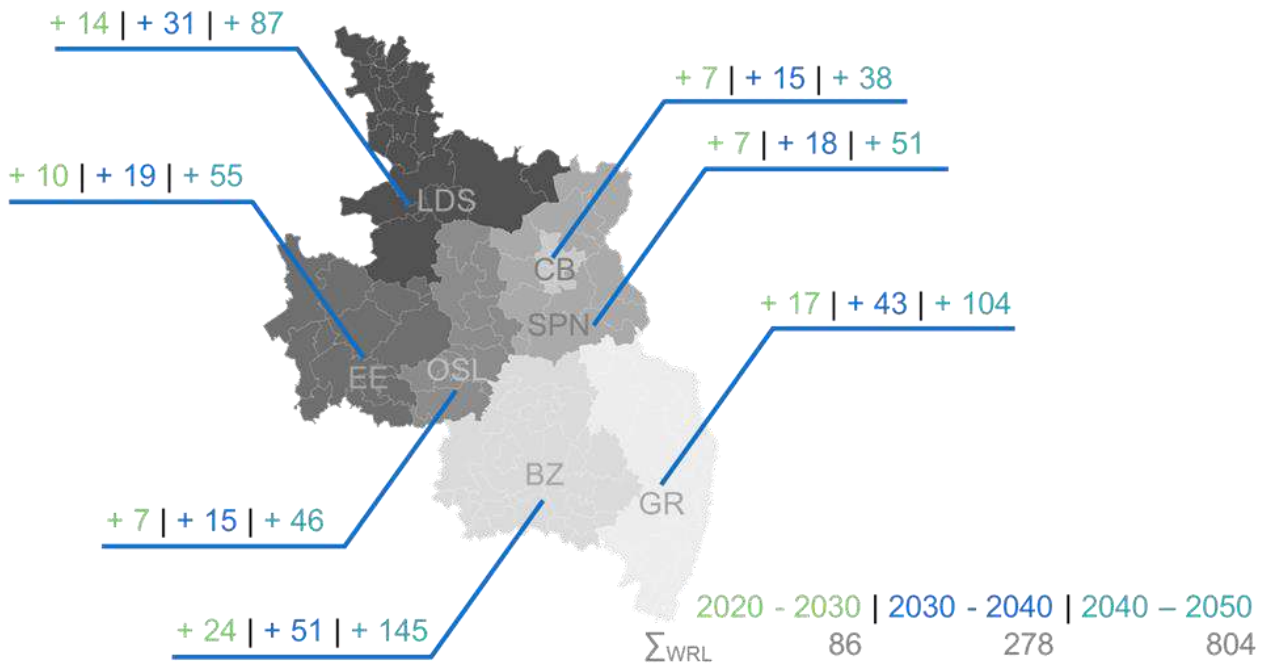
[37] www.h2.live

Im Folgenden wird auf Basis des ermittelten Wasserstoffbedarfs (Durchsatz pro Tag, s. Grafik 51) im Verkehrssektor[38] die Anzahl und Entwicklung von Wasserstoff-Zapfpunkten[39] zur Bedarfsdeckung in den Landkreisen der WRL abgeschätzt (s. Grafik 54). Als technische Grundlage dient die Größen-klassifizierung von H2-Stationen der H2 Mobility GmbH (s. Tabelle 14). Diese gibt eine Orientierung zur notwendigen Anzahl von Zapfpunkten in Abhängigkeit des erwarteten täglichen H2-Durchsatzes.

Es wird keine Aussage zur Verteilung der H2-Zapfpunkte innerhalb des jeweiligen Landkreises getroffen. Es wird davon ausgegangen, dass kurz- und mittelfristig (bis etwa 2030) vorzugsweise an bestehenden Tankstellen der H2 Mobility-Gesellschafter Wasserstoffzapfpunkte integriert werden (s. Grafik 53). Bei zunehmender Marktdurchdringung von H2-BZ-Fahrzeugen und erhöhten H2-Absatzmengen wird langfristig (bis etwa 2040) damit gerechnet, dass weitere Tankstellenbetreiber Wasserstoff-Zapfpunkte errichten und somit ein breites Angebot entsteht. Ab etwa 2040 wird mit der flächendeckenden Transformation der Tankstellen an sich, als auch des Angebots von primär fossilen Treibstoffen hin zu alternativen Treibstoffen (H2, Strom) gerechnet. Für die Betrachtung wird darüber hinaus angenommen, dass der H2-Bedarf des Verkehrssektors eines Landkreises vollständig durch die Tankstellen der jeweiligen Landkreise bedient wird.

Tabelle 14
Größenkategorien von H2-Tankstellen /7/

	Sehr klein	Klein	Mittel-groß	Groß
Zapfpunkte	1	1	2	4
Max. Durchsatz/ Tag [Kg]	80	212	420	1000
Max. Betankungen/ Tag	20	38	75	180
Versorgte Fahrzeuge pro Station	100	400	800	1600



Grafik 54
Entwicklung/ Zubau von Wasserstoffzapfpunkten pro Dekade zur Deckung der ermittelten Wasserstoffbedarfe auf Landkreisebene

[38] Ohne H2-Bedarf des Schienenverkehrs

[39] Technisch unterscheiden sich H2-Zapfpunkte aufgrund der spezifischen H2-Eigenschaften von Zapf-punkten fossiler Treibstoffe, was sich u.a. in einem geringeren Treibstoffdurchsatz pro Zapfpunkt ausdrückt. Die Anzahl der H2-Zapfpunkte ist daher für die H2-Bedarsfdeckung entscheidend. Die Anzahl an Zapfpunkten liefert keine Aussage zur Anzahl von Wasserstoffstationen, da eine Station in der Regel mehrere Zapfpunkte aufweisen kann.

Wertschöpfungs- und Arbeitsplatzpotentiale

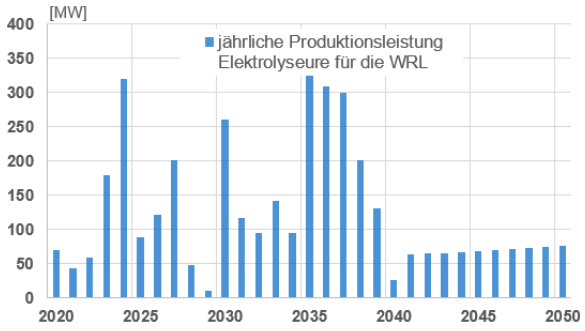
Die Einführung und Etablierung einer ganzheitlichen und starken Wasserstoffwirtschaft birgt die Chance, die WRL für die Zukunft neu aufzustellen sowie neue Wirtschaftszweige und Arbeitsplätze für die Energie- und Strukturwandelregion Lausitz zu erschließen. Dabei bietet eine WRL-eigene Produktion u. a. der folgenden H2-Schlüsselkomponenten sehr große Potentiale:

- Elektrolyseure,
- Brennstoffzellen und
- Wasserstoffspeicher.

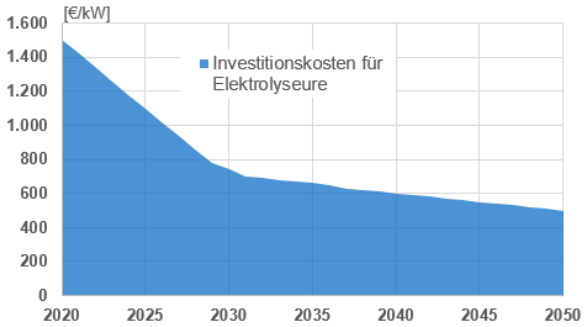
In den folgenden Abschnitten wird mit Hilfe ausgewählter Beispiele abgeschätzt, welche Wertschöpfungs- und Arbeitsplatzpotentiale sich zukünftig aus einer Herstellung der o. g. H2-Schlüsselkomponenten für die WRL ergeben könnten. Den Betrachtungen werden die analysierten Potentiale für den H2-Bedarf und die H2-Erzeugung in der WRL zugrunde gelegt.

Elektrolyseure

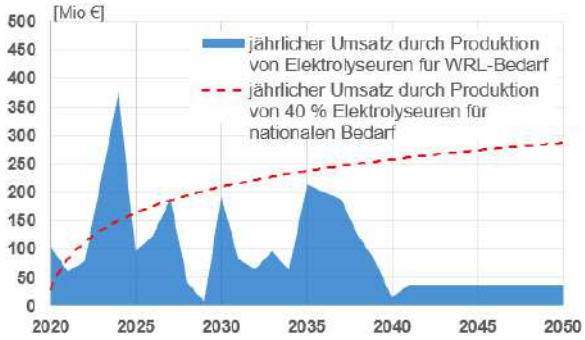
Als Grundlage zur Analyse der Wertschöpfungs- und Arbeitsplatzpotentiale durch die Herstellung von Elektrolyseuren dient die ermittelte Entwicklung von EEG-freien Windanlagen in der WRL (s. Grafik 49). Die damit verfügbare Energie würde potentiell zur Erzeugung von grünem Wasserstoff und damit zum Betrieb von Elektrolyseuren in der WRL bereitstehen. Um für EEG-freie Windanlagen in der WRL Elektrolyseure bereitstellen zu können, wären die jährlichen Produktionsleistungen wie in Grafik 55 dargestellt notwendig.
Weiterhin wird für die Betrachtung eine abgeschätzte Entwicklung der Investitionskosten für Elektrolyseure herangezogen (s. Grafik 56). Es ist zu erkennen, dass derzeitig die Anschaffungskosten für Elektrolysesysteme bei etwa 1.500 €/kW liegen. Perspektivisch werden diese z. B. durch standardisierte Produktplattformen auf ca. 700 (2030) und 500 €/kW (2050) sinken.



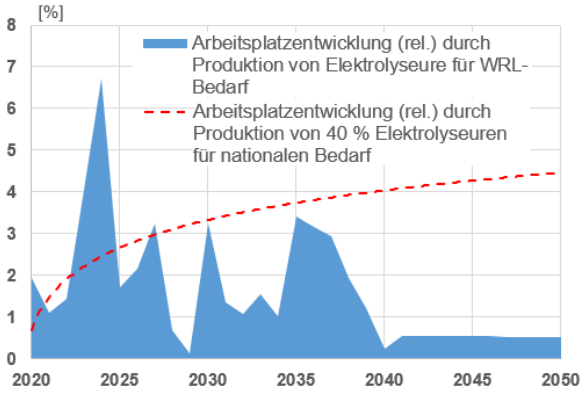
Grafik 55
Jährlicher Bedarf an zusätzlicher Elektrolyseursleistung für die WRL basierend auf Grafik 49



Grafik 56
Investitionskosten für Elektrolyseure nach /35/



Grafik 57
Entwicklung des Gesamtumsatzes bei Herstellung von Elektrolyseuren in der WRL



Grafik 58
Entwicklung (rel.) der Arbeitsplätze bei Herstellung von Elektrolyseuren in der WRL

Unter Verwendung der benötigten Produktionsleistung von Elektrolyseuren in der WRL und der Entwicklung der Investitionskosten für Elektrolyseure ergibt sich die in Grafik 57 blau dargestellte Entwicklung der jährlichen Gesamtumsätze (insgesamt 2020 - 2050: ca. 3.000 Mio. € für Deckung des WRL-eigenen Elektrolyseurbedarf). Würden durchschnittlich (bezogen auf den Zeitraum 2020 - 2050) ca. 40 % des möglichen nationalen Bedarfs an Elektrolyseuren für EEG-freie Windenergie in der Lausitz produziert werden, könnte sich eine wie in Grafik 57 rot dargestellte Entwicklung des Umsatzes ergeben.
Basierend auf den prognostizierten Umsatzentwicklungen (WRL, national) und mit Hilfe der folgenden Annahmen /36/, /59/:

- Anteil der Personalaufwendungen am Gesamtumsatz: 20%,
- Entwicklung der durchschnittlichen Lohnkosten (brutto) pro Jahr und Mitarbeiter[40]: 45.000 € (2020); 60.000 € (2050),
- 24.000 Arbeitsplätze in der Lausitz direkt oder indirekt von der Braunkohle abhängig,

erfolgt die Ermittlung der Arbeitsplatzpotentiale durch die Herstellung von Elektrolyseuren in der WRL (s. Grafik 58). Der blaue Verlauf zeigt die relative (rel.) Arbeitsplatzentwicklung (bezogen auf die 24.000 Arbeitsplätze), wenn der dem dargestellten Szenario entsprechende Bedarf an Elektrolyseuren in der WRL gedeckt werden soll. Der rote Verlauf in Grafik 58 entspricht wiederum einer relativen Arbeitsplatzentwicklung, wenn durchschnittlich ca. 40 % (Produktionshochlauf im Zeitraum 2020 - 2030) des möglichen nationalen Bedarfs an Elektrolyseuren für EEG-freie Windenergie in der Lausitz produziert werden. Unter moderater Abschätzung könnten mit der Herstellung von Elektrolyseuren in der WRL durchschnittlich ca. 4 % der vom Strukturwandel betroffenen Arbeitsplätze gesichert bzw. kompensiert werden.

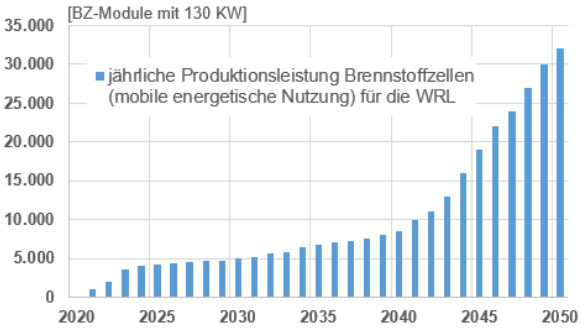
Brennstoffzellen

Die Abschätzung der Wertschöpfungs- und Arbeitsplatzpotentiale durch die Herstellung von Brennstoffzellen in der Lausitz erfolgt am Beispiel des Lausitzer Verkehrssektors. Dafür wird die ermittelte Entwicklung der mobilen energetischen Nutzung in der WRL (BZ-Fahrzeuge) herangezogen (s. Grafik 20). Des Weiteren werden folgende Annahmen getroffen:

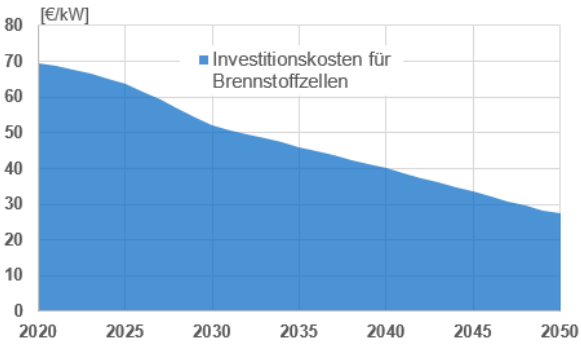
- Gemittelte BZ-Systemleistungen: 130 kW/Modul,
- Installationsszenarien je Fahrzeugklasse:
  - PKW: 1 Modul,
  - LNFZ: 1 Modul,
  - LKW: 2 Module,
  - Busse: 2 Module,
  - Züge: 3 Module.

Durch die o. g. Grundlagen bzw. Annahmen ergibt sich die in Grafik 59 illustrierte Entwicklung der jährlich notwendigen Produktionsleistung von Brennstoffzellen für die mobile energetische Nutzung in der WRL. Weiterhin sind in der Grafik 60 die abgeschätzten Investitionskosten für die großserientaugliche Herstellung von Brennstoffzellensystemen /37/ dargestellt.
Analog zu den Betrachtungen für die Herstellung von Elektrolyseuren erfolgt die Ermittlung der Wertschöpfungs- und Arbeitsplatzpotentiale durch die Herstellung von Brennstoffzellen für die mobile energetische Nutzung in der WRL.
Die Grafik 61 illustriert die Entwicklungen möglicher jährlicher Gesamtumsätze. Der blaue Verlauf zeigt dabei u. a., dass sich durch eine BZ-Herstellung für den Lausitzer Verkehrssektor ein kumulierter Gesamtumsatz im Zeitraum von 2020 bis 2050 von ca. 1.500 Mio. € ergibt. Der rote Verlauf entspricht einer Umsatzentwicklung, wenn basierend auf der in /42/ prognostizierten BZ-Fahrzeugentwicklung

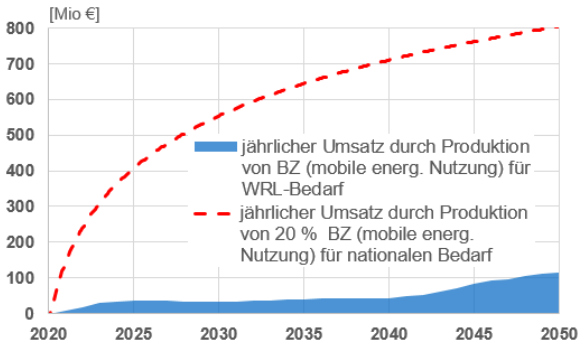
[40] Durchschnittliche Personalkosten für fachliches und akademisches Personal



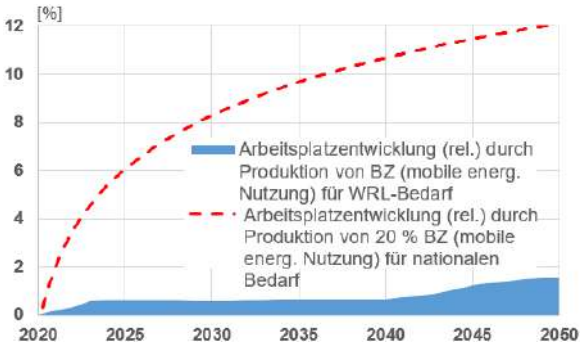
Grafik 59
Benötigte jährl. Produktionsleistungen für BZ (mobile energ. Nutzung) in der WRL basierend auf **Grafik 20**



Grafik 60
Investitionskosten für Brennstoffzellen **/37/**



Grafik 61
Entwicklung des Gesamtumsatzes bei Herstellung von BZ (mobile energ. Nutzung) in der WRL



Grafik 62
Entwicklung (rel.) der Arbeitsplätze bei Herstellung von BZ (mobile energ. Nutzung) in der WRL

in Europa bis 2050 jährlich ca. 20 % der benötigten Brennstoffzellen für den nationalen Verkehrssektor in der Lausitz produziert werden.
In Grafik 62 ist die sich aus den möglichen jährlichen Umsätzen resultierende relative Arbeitsplatzentwicklung für fachlich und akademisch ausgebildetes Personal dargestellt. Nur mit der Herstellung von Brennstoffzellen für den Lausitzer Verkehrssektor könnten bis 2030 bzw. 2050 ca. 1 % bzw. 2 % der vom Strukturwandel betroffenen Arbeitskräfte gesichert oder kompensiert werden. Durch die Herstellung von jährlich ca. 20 % der zukünftig möglichen benötigten Brennstoffzellen für den nationalen Verkehrssektor ist eine Sicherung bzw. Kompensation von ca. 8 % (2030) bzw. 12 % (2050) der vom Strukturwandel betroffenen Arbeitsplätze abschätzbar.

Druckgasspeicher

Wie bei der Brennstoffzellenherstellung werden die Wertschöpfungs- und Arbeitsplatzpotentiale für Wasserstoffspeicher am Beispiel der mobilen energetischen Nutzung in der WRL (s. Grafik 20) abgeschätzt.
Für die nachfolgenden Betrachtungen wird ein im Brennstoffzellen-Verkehrssektor üblicher Druckgasspeicher mit einem Speichervolumen für Wasserstoff von 5 kg und einem Systemdruck von 700 bar /43/ als „Basis-Tank“ definiert. Des Weiteren wird festgelegt, dass pro Basis-Tank die durchschnittliche Reichweite 500 km bei einem Verbrauch von ca. 1 kg/100 km beträgt. Dies führt zu den in der Tabelle 15 dargestellten Basis-Tanks pro Fahrzeugklasse (Personenkraftwagen (PKW), leichte Nutzfahrzeuge (LNFZ), Lastkraftwagen (LKW), Busse, Züge).

Tabelle 15
Anzahl an Basis-Tanks pro Fahrzeugklasse

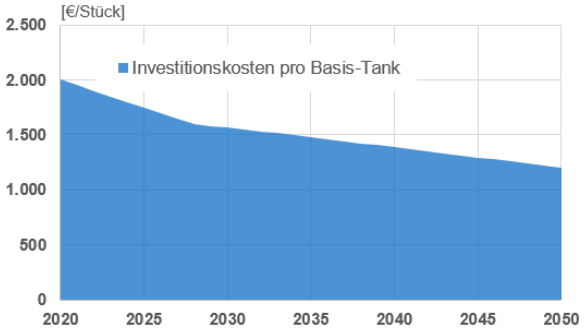
Fahrzeugklasse	H2-Bedarf [Kg/100 km]	Basis-Tanks / Fahrzeug
PKW	1	**1**
LNFZ	2,5	**2**
LKW	7,5	**8**
Busse	12	**12**
Züge	21	**21**

Auf Basis der vorab genannten Annahmen und Definitionen ergibt sich für die WRL-eigene Produktion an Basis-Tanks für den Verkehrssektor in der Lausitz die in Grafik 63 gezeigte jährliche Produktionsleistung. Die Entwicklung der Investitionskosten pro Basis-Tank im Zeitraum 2020 - 2050 können der Grafik 64 entnommen werden.
Wiederum in vergleichbarer Weise zu den Betrachtungen für die Herstellung von Elektrolyseuren und Brennstoffzellen werden die Wertschöpfungs- und Arbeitsplatzpotentiale durch die Herstellung von Basis-Tanks bzw. Druckspeichertanks in der Lausitz ermittelt.
Die jährlichen Gesamtumsätze bei der Herstellung von Gasdrucktanks für die Bedarfe in der WRL bzw. Deutschland (20 % vom zukünftig möglichen benötigten nationalen Bedarf) im Verkehrssektor zeigt die Grafik 65.
Die darauf aufbauende zukünftig mögliche Arbeitsplatzentwicklung in der WRL ist in der Grafik 66 dargestellt. Durch die Produktion von Gasdrucktanks für den Verkehrssektor könnten bis 2050 ca. 0,5 % (WRL-Bedarf) bzw. 5 % (nationaler Bedarf) der vom Strukturwandel betroffenen Arbeitsplätze gesichert bzw. kompensiert werden.

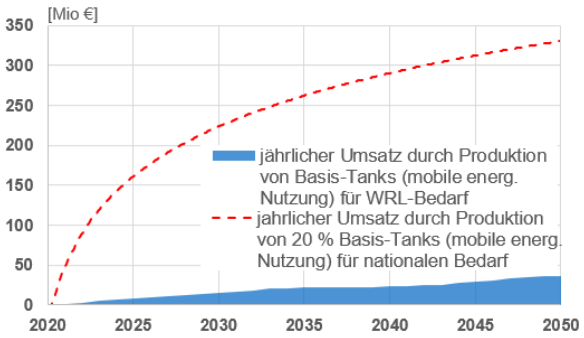
Zusammenfassung und Diskussion

Allein durch eine WRL-eigene Produktion von Elektrolyseuren, mobilen Brennstoffzellen und Druckgastanks für den deutschen Markt wäre bis 2030 bzw. 2050 lässt sich eine Sicherung bzw. Kompensation von ca. 15 % bzw. 21 % der vom Strukturwandel betroffenen Arbeitsplätze möglich. Unter Einbeziehung der Produktion weiterer H2-Technologien, -Systeme und -Komponenten (z.B. stationäre Brennstoffzellen und Tanks, Verdichter, Mess- und Automatisierungtechnik, Leistungselektronik) sowie dadurch entstehender Zuliefer- und Dienstleistungsindustrie als auch des globalen Exports, lässt sich eine Verdrei- bis Vervierfachung gesicherter Arbeitsplätzen (2030: 45 % - 63 %; 2050: 63 % - 83 %; bezogen auf durch den Strukturwandel betroffener Arbeitsplätze) abschätzen.

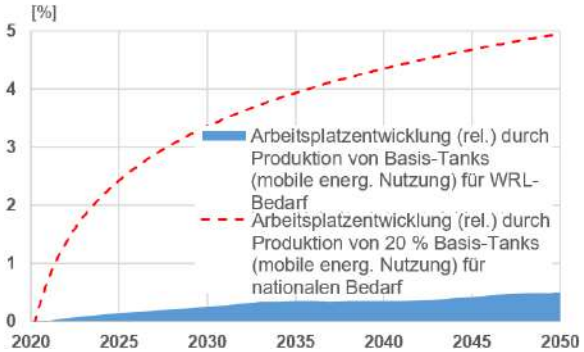
Grafik 63
Benötigte jährl. Produktionsleistungen an Basis-Tanks (mobile energ. Nutzung) in der WRL basierend auf Grafik 20



Grafik 64
Investitionskosten pro Basis-Tank **/37/**



Grafik 65
Entwicklung des Gesamtumsatzes bei Herstellung von Basis-Tanks (mobile energ. Nutzung) in der WRL



Grafik 66
Entwicklung (rel.) der Arbeitsplätze bei Herstellung von Basis-Tanks (mobile energ. Nutzung) in der WRL

Gesellschaftliche Akzeptanz

Die gesellschaftliche Akzeptanz von Wasserstofftechnologien gilt als ein entscheidender Faktor für deren erfolgreiche Einführung und Etablierung /43/. Zur Ermittlung der generellen Akzeptanz in der Wirtschaftsregion Lausitz wurden nationale und internationale, sektorenspezifische Befragungen ausgewertet, die in ihrer Tendenz ein vergleichbares Bild zeigen. Berücksichtigung finden neben der Öffentlichkeit insbesondere auch die Sichtweisen weiterer Akteure, die im Innovationssystem eine wichtige Rolle spielen.
Wasserstofftechnologien werden von den Bürgern in der Europäischen Union grundsätzlich positiv wahrgenommen. Von den befragten europäischen Experten befürworten sogar knapp 90 % Wasserstofftechnologien und -systeme als eine mögliche Lösung für Energie- und Umweltprobleme /44/. Zur Darstellung der Akzeptanz wird nachfolgend exemplarisch auf spezifische potentielle Anwendungsgebiete bzw. ausgewählte Teilbereiche eingegangen.

PKW mit Brennstoffzellen

Trotz hoher Bekanntheitsgrade von BZ-Fahrzeugen stellen batterieelektrische Fahrzeuge eine scharfe Konkurrenz dar. Aspekte, die den Befragten wichtig sind, beinhalten Umweltvorteile, Kraftstoffpreis, Reichweite und Sicherheitsaspekte. Trotz positiver Einstellung sind auch hier der Anschaffungspreis sowie Zweifel an der technologischen Reife, die vom Kauf abhalten. Ein weiterer Grund ist das Fehlen von Tankstellen. Zudem gilt es, stärker über Wasserstofftechnologien und ihren Entwicklungsstand zu informieren, um in der Bevölkerung bestehende Unsicherheiten zu reduzieren, die aus Expertensicht keine Grundlage haben /44/. Obwohl die Nutzung von H2 überwiegend als gefährlich angesehen wird (60 %) kann sich die Mehrheit der Bürger (86 %) vorstellen ein H2-Verbrennungsfahrzeug zu kaufen (s. Grafik 67). Es besteht allerdings ein hoher Bedarf der Öffentlichkeit nach Information zu H2 /45/.

Die in /44/ befragten Experten präferieren BZ-Fahrzeuge gegenüber allen anderen Antriebsformen. Zu den größten Herausforderungen für H2-Mobilität gehört aus ihrer Sicht eine ausreichende Zahl an Tankstellen sowie wettbewerbsfähige Kosten. Als dringlichste Aufgabe resultiert daraus die Errichtung einer Betankungsinfrastruktur sowie die Förderung von Forschung und Entwicklung.

ÖPNV und Schienenfahrzeuge

Hinsichtlich der erwarteten Marktentwicklung für unterschiedliche Anwendungen erwarten die Experten eine besonders positive Marktentwicklung für wasserstoffbetriebene Busse /44/. Die Umrüstung des öffentlichen Nahverkehrs auf schadstoffärmere Antriebe sehen befragte Bürger eher positiv /48/.
Bisherige Erfahrungen mit Brennstoffzellen-Bussen zeigen, dass diese bereits erfolgreich und ohne Akzeptanzprobleme im ÖPNV in deutschen Städten getestet werden /49/. Insgesamt bewerten die Fahrgäste die Technologie sehr positiv /50/. Die Umweltfreundlichkeit stand bei 72 % der Befragten im Vordergrund der allgemeinen Wahrnehmung. Eine Akzeptanzanalyse der Brennstoffzellentechnologie im Busverkehr in fünf europäischen Städten ergab, dass alle Stakeholder der Technologie grundsätzlich offen gegenüberstehen. Für die Busfahrer und die Fahrgäste stehen allerdings die Zuverlässigkeit und die Sicherheit der Busse im Vordergrund /51/.

E-Fuels

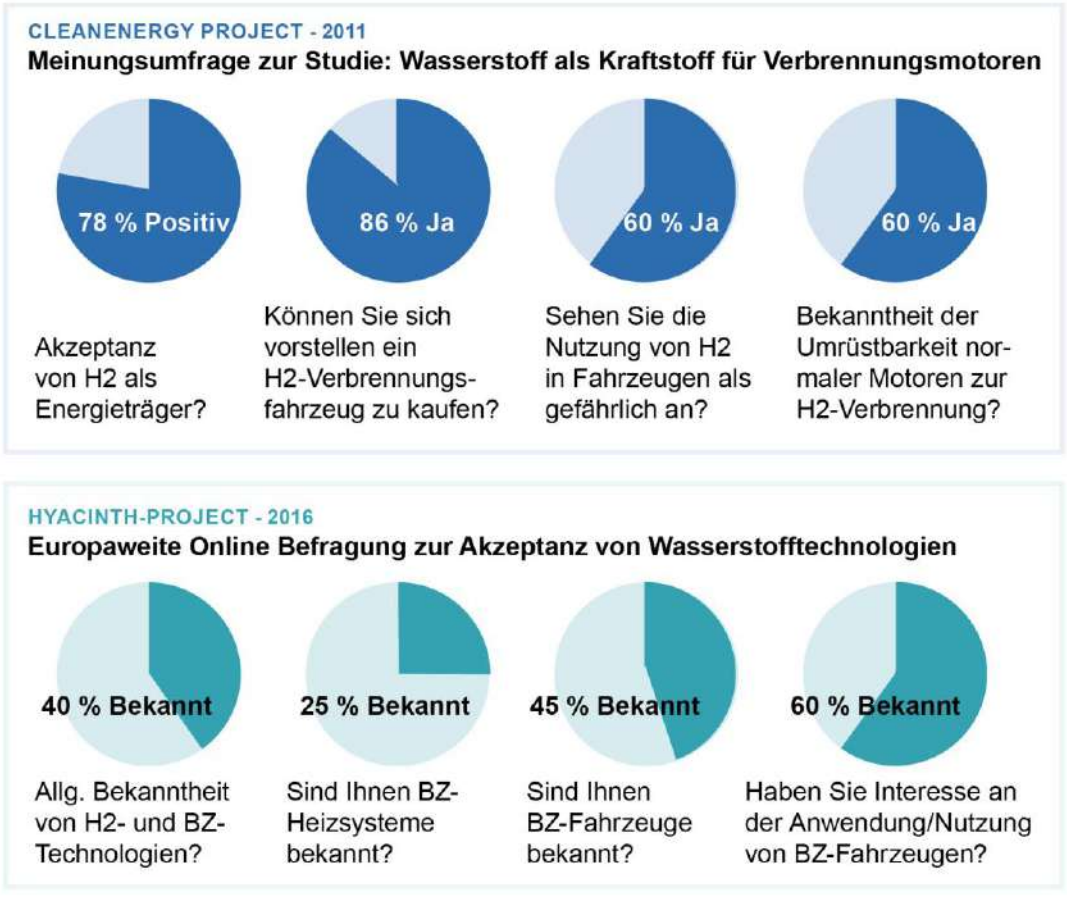
E-Fuels haben derzeit einen sehr geringen Bekanntheitsgrad /52/. Erwartete hohe Kosten für e-fuels werden als größtes Hemmnis angesehen. Keine Akzeptanz besteht für weitere EE-Erzeugungsanlagen (z.B. Wind). Die Akzeptanz für die Herstellung von e-fuels ist stark abhängig von der Anlagengröße und Produktionsmenge. Für bestehende Raffinerieanlagen ist dies gegeben.
Hohe Akzeptanz haben kleine, dezentrale Produktionsstätten z. B. in Gewerbegebieten aufgrund des geringen Platzbedarfs sowie keiner Lärm-, Schadstoff- oder Geruchsemissio-

nen. Geringe Akzeptanz besteht bei hochskalierten, zentralen PtX-Anlagen. Insgesamt kann von einer potentiell hohen Nutzerakzeptanz ausgegangen werden, da keine Änderung des Nutzungsverhaltens erforderlich ist und bestehende Tankstelleninfrastruktur genutzt werden kann.

Brennstoffzellen-Heizungen

Brennstoffzellenheizsysteme spielen vor dem Hintergrund des zukünftigen Verbots der Neuinstallation von Ölfeuerungen sowie für nicht an das bestehende Erdgasnetz angeschlossene Haushalte eine wichtige Rolle. Allerdings sind sie nur etwa einem Viertel der befragten Bürger bekannt (s. Grafik 67). Als derzeit wichtigste Hinderungsgründe für einen tatsächlichen Kauf werden dabei zunächst der Preis und nachfolgend ein wahrgenommener Mangel an technologischer Reife genannt /44/. Für die befragten Experten stellen für stationäre Anwendungen die Kosten die wichtigste Herausforderung dar. Der technologische Reifegrad sowie Sicherheitsaspekte werden als am wenigsten kritisch beurteilt. Laut Meinung der Experten wird die öffentliche Akzeptanz durch die Verfügbarkeit von grünem Wasserstoff beeinflusst. Als zentrale Punkte werden die Notwendigkeit von Geschäftsmodellen für die H2-Infrastruktur und die weitere Förderung von Forschung und Entwicklung angesehen.

Für eine weiterführende regionsspezifische Ermittlung der Akzeptanz empfiehlt sich die Gestaltung eines Akzeptanz-Managements /49/. Entlang der Wertschöpfungskette lassen sich so bspw. die Teilbereiche Erzeugung, Transport, Lagerung und Nutzung im Hinblick auf relevante Kriterien, wie Sicherheit, Nachhaltigkeit, Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit untersuchen.



Grafik 67
Ausgewählte Ergebnisse (/44/, /45/) zur gesellschaftlichen Akzeptanz von H2-Technologien

Handlungsempfehlungen und -maßnahmen zum Aufbau sowie zur langfristigen Etablierung einer H2-Wirtschaft in der WRL

Das vorliegende Kapitel beschäftigt sich mit Handlungen und Maßnahmen die kurz-, mittel- und langfristig (2020 – 2050) notwendig sind, um die analysierten H2-Potentiale in der WRL ausschöpfen und zukünftig weiter ausbauen zu können. Dahingehend werden in einem ersten Schritt WRL-spezifische Schlussfolgerungen aus dem vorangegangen Kapitel aufgezeigt sowie bereits erarbeitete Schlussfolgerungen zu H2-Potentialen auf nationaler und europäischer Ebene aus externen Studien dargestellt. Darauf aufbauend werden allgemeine (z. T. ebenfalls aus externen Studien) und konkrete WRL-spezifische Handlungsempfehlungen, -maßnahmen und Projektideen dargestellt, welche für einen Aufbau und die langfristige Etablierung einer Wasserstoffwirtschaft in der WRL zielführend sind.

Schlussfolgerungen aus der Potentialanalyse und externen Studien

Aus dem vorangegangen Kapitel zur Analyse der H2-Potentiale in der WRL lassen sich folgende WRL-spezifische Schlussfolgerungen ableiten:

- H2-Akteure, -Projekte und erste grundlegende Vernetzungen in der WRL sind bereits vorhanden,
- starkes Potential zur zukünftigen Produktion von H2-Technologien und -Systemen durch in der WRL ansässiger Unternehmen (z.B. durch Unternehmen in den Bereichen Energietechnik, Automobilzulieferung, Automatisierung, Leichtbau),
- F&E zu vielen Bereichen der H2- Wertschöpfungskette an Hochschulen und F&E-Einrichtungen in der WRL bereits im gutem Maße vorhanden,
- hohes Potential zur H2-Nutzung aller Bereiche (stoffl., mobil., stat.),
- momentan nahezu keine H2-Erzeugungskapazitäten vorhanden,
- wirtschaftlich tragfähige Erzeugung von CO-freien oder -neutralen H2 aufgrund bestehender regulatorischer Rahmenbedingungen (insbesondere Strompreis) momentan nicht möglich,
- mittels H2-Erzeugung aus EE (grüner H2) wird sich der potentielle H2-Bedarf in der WRL nicht decken lassen – Nutzung von türkisen H2 und/oder Import von blauem/ türkisen/grünen H2 ist notwendig,
- WRL-eigene H2-Erzeugung ist Schlüssel für H2-Einführung und anschließenden -Markthochlauf
- für eine H2-Einführung in der WRL bzw. als Keimzelle für eine H2-Wirtschaft eignet sich insbesondere die mobile energetische H2-Nutzung (spez. ÖPNV, komm. Fuhrparks), da hierfür keine großen und langfristigen infrastrukturellen Investitionen im Vergleich zu anderen H2-Bereichen (stat., stoffl.) notwendig sind.
- momentan keine H2-Anwendungen und -Geschäftsmodelle von Unternehmen in der WRL vorhanden,
- keine H2-Speicher- sowie -Beladungs- und -Tankstelleninfrastruktur in der WRL vorhanden,
- bestehende Straßeninfrastruktur in der WRL für einen (wirtschaftlich tragfähigen) H2-Transport des kurz- bis mittelfristigen H2-Bedarfs in der WRL nutzbar bzw. ausreichend,
- für analysierten langfristigen H2-Bedarf in der WRL sollte für einen (wirtschaftlich tragfähigen) H2-Transport die Anpassung/ Ertüchtigung des Erdgasnetzes und/oder der Bau von H2-Pipelines erfolgen,
- hohes Wertschöpfungs- und Arbeitsplatzpotential durch die Produktion von H2-Technologien,
- Akzeptanz von H2-Technologien und dabei insbesondere im Verkehrssektor gut bis sehr gut,
- Akzeptanz für großflächigen Ausbau von EE-Anlagen mäßig.

In einer von den Fraunhofer-Instituten ISE und IPA erstellten und von der NOW GmbH koordinierten Studie /35/ wurden Chancen und Herausforderungen für nachhaltigen Wasserstoff in den Sektoren Verkehr, Strom und Wärme in Deutschland detailliert analysiert. Der Fokus der Betrachtungen lag auf dem Einsatz der Wasserstoffelektrolyse, da davon ausgegangen wurde, dass diese ein bzw. der wichtigste Schlüssel für eine breit angelegte Wasserstoffwirtschaft in Deutschland sein wird. Im Ergebnis der Studie wurden die nachfolgend dargestellten zentralen Schlussfolgerungen für die Wasserstoffelektrolyse in einer zukünftigen nationalen Wasserstoffwirtschaft dargelegt.

1. Die Elektrolysebranche muss sich zu einer Gigawatt-Industrie entwickeln.
2. Der Markthochlauf ist wichtiger als Forschungsförderung.
3. Ein stabiles Absatzniveau von 20 bis 50 MW Elektrolyseursleistung pro Jahr und Hersteller ist zur Industrialisierung notwendig.
4. Geeignete Herstellungsverfahren für die Industrialisierung von Elektrolyseuren sind größtenteils verfügbar.
5. Eine größere Nachfrage sorgt für mehr Wettbewerb und Akteursvielfalt entlang der Zulieferkette von Elektrolyseuren.
6. Die Industrialisierung der Elektrolysebranche wird international und nicht auf Deutschland beschränkt stattfinden.
7. Klare regulatorische Rahmenbedingungen insbesondere bei den Strombezugskosten sind notwendig.
8. Der Iridium-Bedarf in der PEM-Elektrolyse muss reduziert werden, damit diese Technologie im Multi-Gigawattbereich verfügbar werden kann.
9. Öffentlichkeitsarbeit ist weiter notwendig.

Ein Ende 2019 veröffentlichter Bericht /40/ des in der Europäischen Kommission angesiedelten Strategischen Forums für wichtige Vorhaben von gemeinsamem europäischem Interesse (engl. kurz: IPCEI) umfasste u. a. die Ermittlung der in Zukunft sechs wichtigsten strategischen Wert-schöpfungsketten in Europa. Diese haben nach Ansicht der Ersteller ein enormes Potential die starke industrielle Wettbewerbsfähigkeit Europas langfristig zu gewährleisten und auszubauen. Als eine wichtige Wertschöpfungskette wurden „Wasserstofftechnologien und -systeme“ definiert. Für diese erfolgte eine umfangreiche SWOT-Analyse, welche in der Grafik 68 zusammenfassend dargestellt ist und der vorliegenden Studie als Schlussfolgerung zum aktuellen Stand von H2 auf europäischer/globaler Ebene dient.

Grafik 68
SWOT-Analyse H2-Technologien und -Systeme für Europa /40/

Handlungsempfehlungen und -maßnahmen für die WRL

Aus den im vorherigen Abschnitt dargestellten Schlussfolgerungen für H2-Potentiale auf regionaler (WRL), nationaler und europäischer Ebene lassen sich (WRL-spezifische) Handlungsempfehlungen und -maßnahmen für vier unterschiedliche Handlungsfelder (Politik, Forschung, Industrie als Hersteller von H2-Technolgien, Anwender für Einsatz von H2-Technologien) zum Aufbau und für die langfristige Etablierung einer Wasserstoffwirtschaft in der WRL ableiten. Diese sind zusammenfassend in Grafik 69 illustriert.

Grafik 69
Allg. Handlungsempfehlungen und -maßnahmen zum Aufbau und der langfristigen Etablierung einer Wasserstoffwirtschaft in der WRL

Projektideen zur Entwicklung einer Wasserstoffwirtschaft in der WRL

Um Einführungs- und Markthochlaufphasen für eine zukünftige Wasserstoffwirtschaft in der WRL zu realisieren, ist es notwendig auf Grundlage der im vorherigen Abschnitt dargestellten Handlungsempfehlungen sowie der Nationalen Wasserstoffstrategie konkrete (WRL-spezifische) Projektideen zu entwickeln. Hierfür bietet es sich an, diese in kurz-, mittel- und langfristige Projektideen zu unterteilen. Kurzfristige Projektideen müssen für eine schnelle Umsetzung geeignet sein und dienen der Einführungsphase. Weiterhin dürfen diese nur begrenzte Investitionsrisiken bei dessen Umsetzung bergen. Mittel- und langfristige Projektideen gliedern sich in die Markthochlaufphase ein und charakterisieren sich durch - z. B. Investitionsbeschaffung und Genehmigungsverfahren - längere Planungsphasen. Im Nachfolgenden werden ausgewählte und für eine zukünftige Wasserstoffwirtschaft in der WRL wichtige Projektideen näher erläutert.

Kurzfristige Projektideen

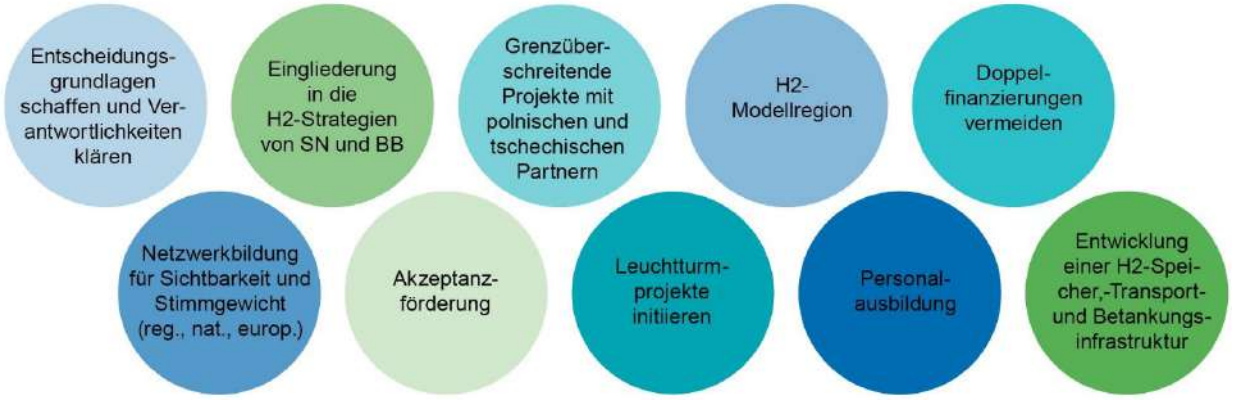
Lausitzer H2-Netzwerk und Wasserstoff-strategie für die WRL

Um die Kompetenzen im Bereich Wasserstoff innerhalb der WRL zu bündeln und zu koordinieren sowie um für die Region eine Sichtbarkeit und ein Stimmgewicht auf überregionalen, nationalen und europäischen Ebenen zu erzielen, ist die schnelle Gründung eines lausitzweiten H2-Netzwerkes (s. Grafik 70) von großer Bedeutung. Dieses Netzwerk sollte auf den bereits bestehenden Aktivitäten im Bereich Wasserstoff aufbauen und durch in der Region ansässige Akteure initiiert und federführend vorangetrieben werden. Die länderübergreifende Finanzierung sowie die administrative Organisation des Netzwerkes muss der Wirtschaftsregion Lausitz GmbH obliegen. Um eine schnellstmögliche Gründung zu gewährleisten, sollten ein bis zwei Akteur(e) jeweils aus den Bundesländern Sachsen und Brandenburg dieses Netzwerk anfänglich initiieren. Im weiteren Verlauf sind alle weiteren relevanten Akteure und dabei insbesondere in der Region ansässigen Unternehmen in das Netzwerk mit einzugliedern bzw. einzubeziehen. Grundlegende Aufgaben und Ziele des Netzwerkes müssen sein:

- Kompetenzbündelung durch Verbindung der brandenburgischen und sächsischen H2-Akteuren und –Aktivitäten,
- Entwicklung einer Wasserstoffstrategie für die WRL,
- Initiierung und Durchführung von H2-Projekten und
- Schaffung von Arbeitsplätzen in Industrie, Handwerk, Dienstleistung für die Strukturwandelregion Lausitz.

Wichtige Inhalte der Wasserstoffstrategie für die WRL sind in der Grafik 71 dargestellt.

Grafik 70
Lausitzer H2-Netzwerk



Grafik 71
Wasserstoffstrategie für die WRL

Anschaffung von H2-Fahrzeugen für ÖPNV und kommunale Fuhrparks

Durch die europäische CVD werden ÖPNV-Busunternehmen sowie kommunale Unternehmen verpflichtet, zukünftig bei der Neubeschaffung einen definierten Prozentsatz an emissionsfreien Fahrzeugen in ihren Fuhrpark zu integrieren. Speziell für den ländlichen Busverkehr, welcher durch längere Strecken als der Stadtverkehr gekennzeichnet ist, werden diese Neuanschaffungen H2-betriebene Busse sein müssen. Insbesondere bei dem Lausitzer Unternehmen Cottbusverkehr GmbH sind hierfür die Planungen weit fortgeschritten. Es ist zu empfehlen, dass weitere Busunternehmen in der WRL eine detaillierte Planung zur Anschaffung von H2-Bussen vorantreiben. Auch wäre es erstrebenswert, wenn mehrere Busunternehmen für die Planungsdetails und den späteren Betrieb eng miteinander kooperieren. Dies würde maßgeblich zu einer Risikostreuung beitragen.
Momentan ist im Vergleich zu Dieselbussen die Anschaffung und der Betrieb von H2-Bussen noch um ein vielfaches höher. Es ist allerdings abzusehen, dass sich die Förderquoten von H2-Bussen erhöhen werden. Auch bedarf es, zumindest in dem Zeitraum noch nicht vorhandener H2-Tankstellen, Überlegungen zur H2-Bereitstellung für Busdepots und zur Betankung von H2-Bussen. Für die H2-Bereitstellung könnte z. B. bei evtl. entsprechend regulatorischer oder förderpolitischer Anpassung die bilanzielle Bereitstellung von H2 per Gasnetz in Betracht gezogen werden, sofern die relevanten Busdepots an das Erdgasnetz angeschlossen sind.

Sobald H2-Tankstellen verfügbar sind, sollten Kommunalunternehmen für eine zukünftige Wasserstoffwirtschaft in der WRL als emissionsfreie Varianten einen gewissen Bestand an H2-Fahrzeugen aufbauen. Dies würde in der Einführungsphase maßgeblich zur Erhöhung des regionalen H2-Bedarfs im Verkehrssektor beitragen. Der Nutzen von H2-Fahrzeugen im ÖPNV und für kommunale Fuhrparks ist, dass hiermit ein wesentlicher Beitrag zur Lösung des „Henne-Ei-Problems“ geleistet werden kann. Es ist sogar davon auszugehen, dass H2-Busse und kommunale H2-Fahrzeuge eine maßgebliche Keimzelle für den Hochlauf einer Wasserstoffwirtschaft sind, da dadurch ein konkreter Bedarf bzw. Markt für CO2-freien / -neutralen Wasserstoff entstehen wird. Darüber hinaus trägt insbesondere der H2-Busverkehr durch deren Betrieb im öffentlichen Raum wesentlich zu einer Akzeptanzförderung für H2-Technologien bei.

Initiierung und anfänglicher Aufbau einer Tankstelleninfrastruktur für den Straßenverkehr

Als wesentlicher Beitrag zur Lösung der „Henne-Ei-Problematik“ im Straßenverkehr ist gemeinsam mit bzw. durch H2-Mobility die Errichtung von H2-Tankstellen notwendig. Diese sollten vorrangig in der Einführungsphase in Gebieten aufgebaut werden, wo hohe Pend-

lerverflechtungen bestehen sowie Fernverkehrsstraßen und H2-Mobility-Tankstellen vorhanden sind. Prädestinierte Standorte für eine kurzfristig annähernd flächendeckende H2-Versorgung des Straßenverkehrs unter Verwendung der vorab genannten Kriterien sind:

- Cottbus,
- Finsterwalde,
- Spremberg,
- Görlitz und
- Bautzen.

Produktion von Teilkomponenten für H2-Technologien

Eine „no-regrets"-Option sowie ein Einstieg in eine Wasserstoffwirtschaft ist die Produktion von Teilkomponenten für H2-Technologien für den globalen Markt. Dies könnte durch in der Lausitz ansässige Unternehmen realisiert werden, welche über einen den Teilkomponenten entsprechende Maschinenpark verfügen, wodurch keine oder mindere Investitionen in die Maschinenneubeschaffung erfolgen müssen. Hierfür ist es notwendig den globalen Markt hinsichtlich der Nachfrage für relevante H2-Technologien zu analysieren.

Durchführung anwendungsnaher Forschungsprojekte

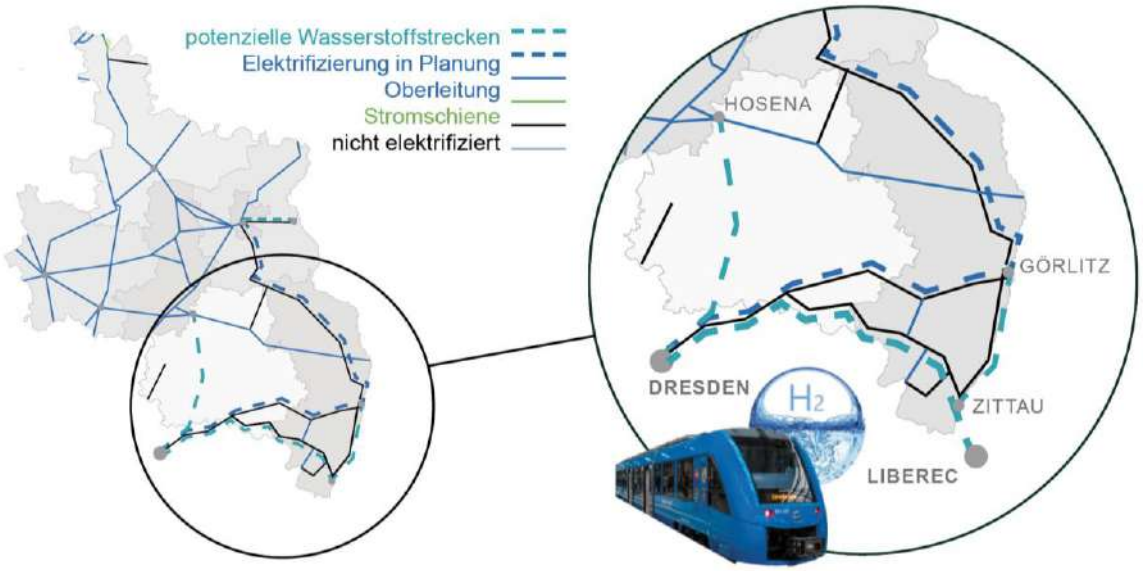
Insbesondere Forschungsprojekte mit anwendungsnahen Schwerpunkten, welche schnell in die Lausitzer Wirtschaft übertragen werden oder in der Gründung von Start-ups resultieren, können maßgeblich zu einer starken Wertschöpfung und der Schaffung einer Vielzahl von neuen Arbeitsplätzen beitragen. Die Lausitzer Forschungseinrichtungen müssen daher verstärkt im Bereich H2 im Rahmen anwendungsnaher F&E-Projekte tätig werden.
Relevante bzw. kritische Themen, für welche erhöhter F&E-Bedarf besteht, sind bereits in einer Vielzahl von Studien und Berichten (z. B. /35/, /40/) vorhanden. In Tabelle 16 sind ausgewählte, relevante F&E-Themen im Bereich der Wasserstofftechnologien zusammengefasst.

Tabelle 16
Ausgewählte relevante F&E-Themen im Bereich H2

Erhöhung des Wirkungsgrads der Gesamtkette (H2-Erzeugung bis -Nutzung)
Entwicklung von Elektrolyseuren und weiteren wasserstoffproduzierenden Anlagen im Großmaßstab (>1 GW)
Erhöhung Stromdichten von Elektrolyseuren
Verringerung Herstellungskosten und Erhöhung der Lebensdauer von H2-Technologien
Erhöhung Druckfestigkeit (bspw. bis 100 bar) von Elektrolyse-Stacks und -systemen
Entwicklungen in den Bereichen Gasanalytik, H2-Trocknung und Verdichtung
Scale-up Produktion von H2-Technologien (Automatisierung und Messverfahren)
Verbesserung der Materialverträglichkeit für eingesetzte verfahrenstechnische Komponenten wie Rohre, Dichtungen, Ventile, Behälter
Kreislaufwirtschaft – Entwicklung, Produktion, Recycling
Entwicklung von H2-Schlüsselkomponenten der nächsten Generation
Entwicklung neuer Wasserstoffderivate als Energieträger
Erforschung alternativer (zur Elektrolyse) Methoden zur Wasserstofferzeugung
Entwicklung neuartiger Technologien für alternative Wasserstoffspeicherung und -transport
Entwicklung von emissionsfreien mittelschweren und schweren Fahrzeugen zur Erreichung der europäischen THG-Ziele (Mobilitätspaket)
Erforschung und Entwicklung sicherer, robuster autonomer H2-Fahrzeuge für den ÖPNV

Ausbildungszentren für fachliche und akademische Ausbildung schaffen

Schon jetzt zeigt sich in den bereits laufenden H2-Projekten in der Lausitz ein Mangel an Personal mit erforderlichen H2-Kompetenzen bzw. die Notwendigkeit einer zielgerichteten Personalausbildung im Bereich Wasserstoff. Für die zukünftige fachgerechte Produktion und Anwendung von H2-Technologien bedarf es entsprechendem Personals. Ebenfalls ist für die Lausitzer H2-Akteure, welche im Bereich der F&E tätig sind, die akademische Ausbildung im Bereich H2 von höchster Bedeutung.



Grafik 72
Leuchtturmprojekt – H2-betriebene Zugstrecke Dresden - Bischofswerda - Zittau - Liberec

Die zuständigen Institutionen und Unternehmen sollten dafür bestehende Ausbildungsberufe (z. B. Industriemechaniker, Kfz-Mechatroniker) um das Themenfeld Wasserstoff erweitern. Universitäten und Hochschulen sollten für die akademische Ausbildung Wasserstoffprofessuren mit entsprechend dazugehörigen entwickelten Lehrfächern einrichten.
Da Ausbildungsfachkräfte zum derzeitigen Zeitpunkt kaum verfügbar sind, sollten zur Kapazitätsbündelung Ausbildungszentren für H2-Technologien geschaffen werden. Kurzfristig einzurichtende fachliche Ausbildungszentren könnten in den Berufsschulen der in der Lausitz zentralgelegenen Städte Bautzen und Cottbus angesiedelt werden. Akademische Ausbildungszentren müssen die BTU Cottbus-Senftenberg, die Hochschule Zittau/Görlitz sowie die Berufsakademie Bautzen sein.

Mittelfristige Projektideen

Betrieb einer H2-betriebenen Zugstrecke als Leuchtturmprojekt

Um eine Wasserstoffwirtschaft zu initiieren, sind Leuchtturmprojekte von entscheidender Bedeutung. Dadurch können z. B. eine Wasserstoffnachfrage oder eine Nachfrage nach weiteren dem Leuchtturmprojekt sich anschließenden H2-Technologien generiert aber auch wie beim Einsatz von H2-Bussen im ÖPNV die öffentliche Akzeptanz für H2-Technologien wesentlich gestärkt werden Ein Leuchtturmprojekt im Bereich H2 ist der Betrieb einer H2-Zugstrecke. In Frage kommende Strecken wurden im vorherigen Kapitel zur H2-Potentialanalyse analysiert. Durch die Streckenlänge (hoher H2-Bedarf) und einen grenzüberschreitenden Betrieb, welcher maßgeblich zu einer erhöhten überregionalen bzw. nationalen Sichtbarkeit der Lausitzer H2-Aktivitäten beitragen würde, erscheint für das Leuchtturmprojekt „H2-Zugverkehr“ die Strecke Dresden über Zittau nach Liberec am geeignetsten (s. Grafik 72). Da die notwendigen Technologien bereits am Markt sind, könnte dies prinzipiell auch als kurzfristige Projektidee realisiert werden. Allerdings werden der Fahrzeugkauf wie auch die Möglichkeiten zur Betankung längere Planungs- und Anschaffungszeiten mit sich bringen.
Die für die Elektrifizierung vorgesehene Zugstrecken Dresden - Görlitz und Görlitz - Cottbus sollten nicht übergangsweise mit H2-Zügen betrieben werden, da dies unter der Voraussetzung der Nutzung von CO-freien oder -neutralen Wasserstoff einer schnellen Umsetzung der Elektrifizierung entgegenstehen bzw. eine Anbindung der Städte Bautzen und Görlitz an den Schienenfernverkehr verhindern könnte.

Entwicklung der Lausitz zu einer Modellregion für Wasserstoff, Leichtbau und autonome Mobilität im ÖPNV - WALEMO

Ein weiteres Leuchtturmprojekt ist das geplante Innovationscluster WALEMO, mit dem Ziel, der Entwicklung der Lausitz zur Modellregion für Wasserstoff, Leichtbau und autonome Mobilität im öffentlichen Nahverkehr – ein Projekt, eine Region (vgl. auch Grafik 73). Das Projekt leistet einen wesentlichen Beitrag zur Entwicklung, Erprobung und regionale Produktion von autonomen H2-Leichtbaufahrzeugen (Shuttles) zum zuverlässigen und sicheren Einsatz in ländlichen Regionen und somit zur Lösung des Problems der „letzten Meile“ im ländlichen ÖPNV.
WALEMO steht sowohl für die Einführung eines bedarfsgerechten, autonomen und sauberen ÖPNV in der Fläche zur Verbesserung der öffentlichen Mobilität auf dem Land als auch für die Herstellung der notwendigen Hochtechnologie – Systeme, Fahrzeuge, Infrastruktur. Dabei werden etablierte Lausitzer Unternehmen insbesondere der Automobilindustrie (z.B. Capron, Lakowa, Havlat, Miunske, ZVON, Eurospeedway Lausitz), Start-ups und Forschungseinrichtungen (Fraunhofer, HS Zittau/Görlitz, BTU Cottbus) sowie zukünftig geplante Forschungszentren (z.B. Testzentrum autonome Wasserstoffmobilität der TU Dresden in Görlitz) in der Region konsequent zusammengeführt.

Im Ergebnis des Projektclusters steht die Erschließung neuer Geschäftsfelder und der Aufbau einer zukunftsweisenden, durchgängigen Wertschöpfungskette von der Fahrzeugherstellung, dem Infrastrukturaufbau (AF-Verkehrsleitsysteme, H2-Tankstellen) bis hin zum Betrieb der bedarfsgerechten, sauberen ÖPNV-Fahrzeuge in der Lausitz.

Aufbau von Anlagen zur H2-Erzeugung im Megawatt-Bereich

Für eine Wasserstoffwirtschaft in der WRL sollten kurz- bis mittelfristig neben den bereits in Betrieb oder in Planung befindlichen Anlagen in Cottbus, Schwarze Pumpe und Görlitz weitere Anlagen zur H2-Erzeugung im Megawatt-Bereich errichtet und betrieben werden. Hierbei spielt es evtl. eine untergeordnete Rolle, ob es sich dabei um blauen, türkisen oder grünen Wasserstoff handelt.
Auch ist es nicht zwingend notwendig, dass die Anlagen einzig für eine wirtschaftliche Wasserstofferzeugung genutzt werden. Bspw. könnten sich diese Anlagen auch in einem Forschungsbetrieb eingliedern, wobei hierbei freilich geklärt werden muss, inwieweit ein gewinnbringender oder kostendeckender H2-Verkauf rechtlich möglich ist. Von Bedeutung für einen Bau und Betrieb weiterer H2-Erzeugungsanlagen ist allerdings, dass damit ein regionaler Markt für (CO2-freien, -neutralen) Wasserstoff entstehen kann. Weiterhin wäre

Grafik 73
Vision ein es autonomen H2-basierten ÖPNV zur Lösung des Problems der „letzten Meile“ in der Lausitz

dies bspw. durch die Belieferung von zukünftigen H2-Tankstellen in der WRL ein Beitrag zur Lösung des „Henne-Ei-Problems“ für H2.

Initiierung und Testbetrieb für H2-Transport per Gasnetz und Anwendung von Mischgas

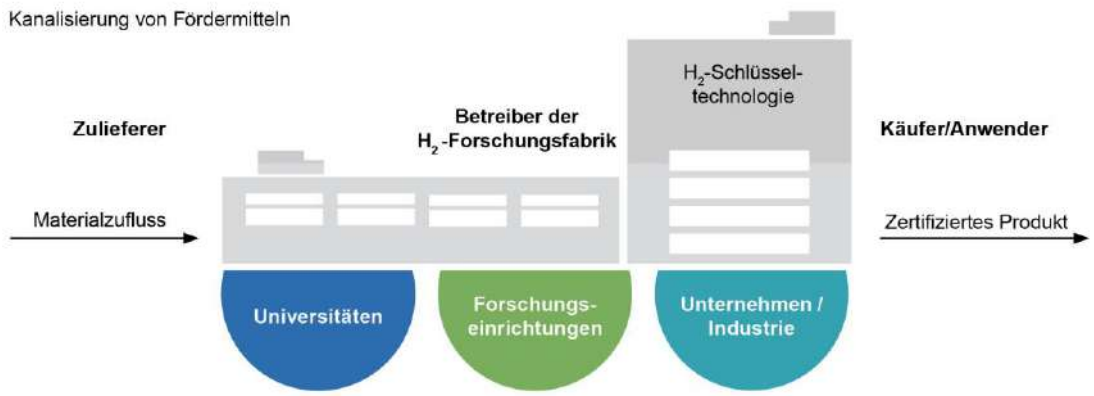
Wie in den vorangegangenen Abschnitten erläutert, kann ein H2-Transport – dies betrifft nicht nur die WRL – anfänglich per LKW wirtschaftlich realisiert werden. In späteren Phasen wird der prognostizierte H2-Bedarf stark ansteigen, wodurch erhebliche Mengen an H2 transportiert werden müssen. Hierfür ist der Transport per Erdgasnetz oder H2-Pipeline wirtschaftlich sinnvoller. Für den Transport per Erdgasnetz ist praktisch zu klären, welche Auswirkungen die Beimischung von H2 auf die Komponenten des Netzes und die Verbraucheranlagen haben und welche konkreten Ertüchtigungsmaßnahmen dadurch realisiert werden müssen. Dies kann durch den Testbetrieb mit anfänglich evtl. 2 - 10 % und später weiter erhöhten Wasserstoff-beimischung in einem vergleichsweise kleinen lokalen Gasnetz und mit einer überschaubaren Menge an Endverbrauchern wie z. B. dem ca. 20 km langen Netz der Ver- und Entsorgungswerke Bad Muskau GmbH geschehen. Dadurch werden sich mögliche Investitionen für Umrüstung und Ertüchtigung in einem überschaubaren Rahmen halten.

Prüf- und Zertifizierungszentrum

Mit dem Fraunhofer Hydrogen Lab Görlitz (HLG) auf dem Innovationscampus Siemens Görlitz erfolgte bereits die Ansiedlung bzw. Gründung eines national tätigen und breit aufgestellten Forschungszentrums, welches von den umfangreichen Kompetenzen und anwendungsnahen Forschungsaktivitäten der gesamten Fraunhofer-Gesellschaft in allen Bereichen der Wasserstoffwertschöpfungskette umfangreich profitieren und dadurch maßgeblich zu einer zukünftig starken H2-Wirtschaft in der WRL beitragen wird.
Das HLG sollte über die Forschungstätigkeiten hinaus, gemeinsam mit weiteren Lausitzer H2-Akteuren zu einem Prüf- und Zertifizierungszentrum weiterentwickelt werden.
Gleichzeitig sollte die Mitarbeit in Normungsausschüssen auf nationaler und internationaler Ebene sowie der Entwicklung von Standards für H2-Technologien erfolgen. Die Transferierung der Ergebnisse z. B. über das Lausitzer H2-Netzwerk in die Lausitzer Unternehmen zur Produktion von H2-Technologien aber auch die Mitwirkung von Lausitzer Unternehmen an der Entwicklung von Standards könnte diesen zukünftig einen entscheidenden Wettbewerbs- und Marktvorteil bringen.

H2-Fabrik als Leuchtturmprojekt

Ebenfalls ein Leuchtturmprojekt ist der Aufbau und Betrieb einer (Forschungs-)Fabrik zur Produktion von Komponenten und Systemen für die Wasserstoffwirtschaft (s. Grafik 74). Produziert werden in erster Linie H2-Schlüsselkomponenten wie Elektrolyseure, Brennstoffzellen oder Speicher. Dazu müssen neben einer starken politischen Initiative wichtige



Grafik 74
Aufbau einer H2-Fabrik

Lausitzer H2-Akteure aus Industrie und Forschung mit einbezogen werden und gemeinsam am Aufbau und Betrieb der Fabrik beteiligt sein. Dadurch wird neben der Risikostreuung vor allem eine Kompetenzbündelung erzielt. Eine solche H2-Fabrik trägt maßgeblich zu einem Knowhow-Aufbau, der Fachkräfteausbildung und durch die generierten Produktionsmengen zu einem Markthochlauf bei. Ferner unterstützt dies wesentlich die Entwicklung und praktische Erprobung von Standards für H2-Technologien.

H2-Gewerbegebiet zur H2-Technologieproduktion sowie als lokaler H2-Verteil- und Logistikhub

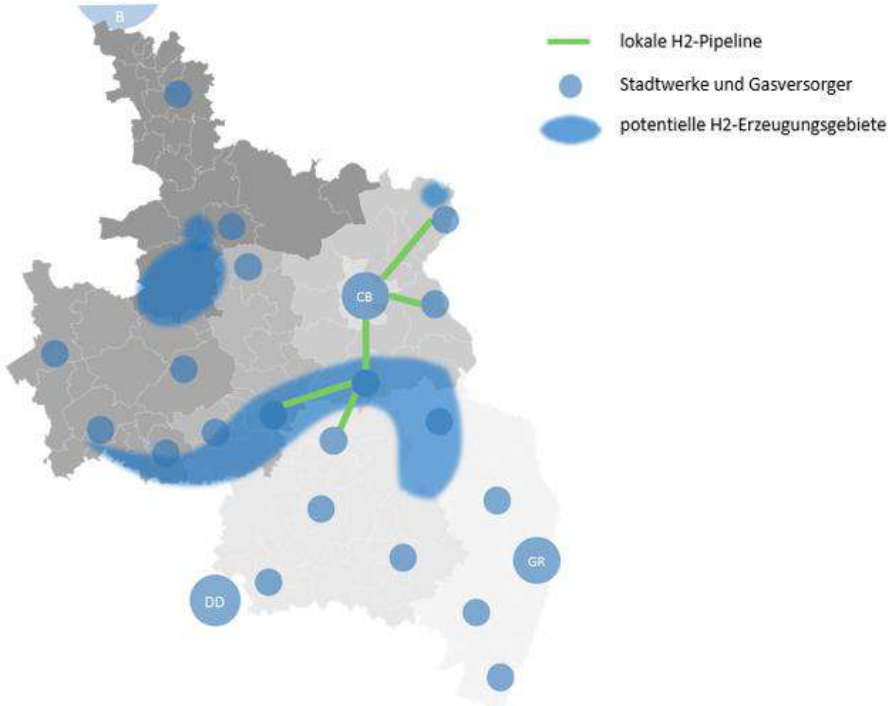
Ein weiteres Projekt mit starker überregionaler und internationaler Außenwirkung ist die Entwicklung eines H2-Gewerbegebiets mit (räumlich) eng verknüpften Wertschöpfungsketten zur Produktion von H2-Komponenten und -systemen durch die dort ansässigen Unternehmen. Auch könnte die Energieversorgung (Strom, Wärme) sowie Logistik idealerweise auf CO2-freien oder -neutralen Wasserstoff basieren. Weiterhin würde dieses Gewerbegebiet als H2-Verteil- und Logistikhub funktionieren. Geeignete Standorte/Gewerbegebiete für eine markante überregionale und internationale Außenwirkung mit guter logistischer Anbindung wären:

- Industriepark Schwarze Pumpe - zentrale Lage in der Lausitz und an der Ländergrenze zwischen Sachsen und Brandenburg
- Industriegebiet Zittau-Nord-Ost – als H2-Gewerbegebiet im Dreiländereck mit politisch initiierter Ansiedlung von tschechischen und polnischen Firmen
- Industriegebiet Guben – als deutsch-polnisches H2-Gewerbegebiet mit politisch initiierter Ansiedlung von polnischen Firmen

Langfristige Projektideen

Lokales H2-Pipelinenetz

Bei dem prognostizierten H2-Bedarf werden in einer zukünftigen Wasserstoffwirtschaft erhebliche Mengen an Wasserstoff zu transportieren sein. Hierfür ist, wie bereits erläutert, für eine wirtschaftliche Tragfähigkeit aber auch zur Vermeidung eines erhöhten Straßenverkehrsaufkommens durch LKW der H2-Transport per Gasnetz oder H2-Pipeline notwendig. Neugebaute H2-Pipelines haben den Vorteil,

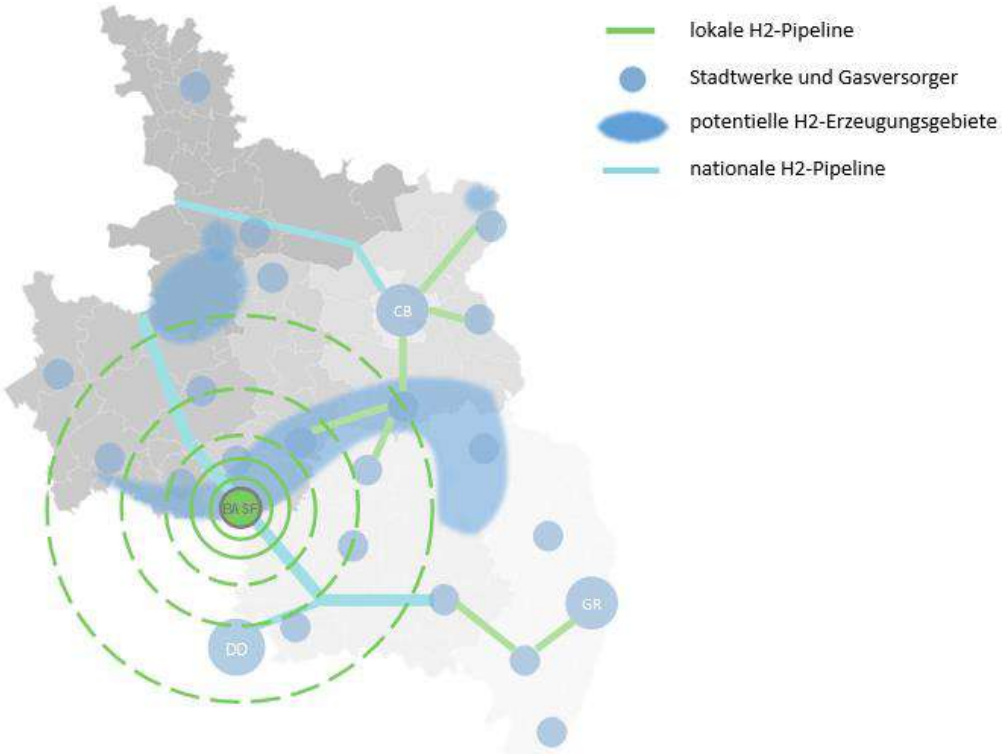


Grafik 75
Lokales H2-Netz

dass keine Ertüchtigungsmaßnahmen von vorhandener Infrastruktur durchgeführt werden müssen. Weiterhin könnte im Gegensatz zur Verwendung von Gasnetzen sofort hochreiner Wasserstoff transportiert werden.
Die Errichtung eines Lausitzer H2-Pipelinenetz sollte in der Anfangsphase in Gebieten mit hohem H2-Bedarf und -Erzeugungspotential erfolgen. Ein solches Gebiet wäre durch z. B. die vorhandenen hohen EE-Kapazitäten sowie die angedachten H2-Speicherkraftwerke aber auch durch erhöhte Verkehrsaufkommen um die Städte Cottbus und Spremberg vorzufinden. Wie in Grafik 75 dargestellt, würden die Stadtwerke in diesem Gebiet als lokale H2-Verteilhubs funktionieren. Der H2-Transport zu den möglichen H2-Anwendern erfolgt mit Hilfe der in Grafik 75 dargestellten H2-Pipelines.

Zentraler H2-Verteilhub als Drehscheibe für die H2-Logistik

In einer zukünftig starken Wasserstoffwirtschaft wird sich der potentielle H2-Bedarf in der WRL nicht mit der Erzeugung von grünen Wasserstoff decken lassen. Dafür ist der Import in die WRL z. B. über die angedachte nationale H2-Pipeline notwendig. Als Drehscheibe für eine WRL-spezifische H2-Logistik und um eine zielgerichtete Verteilung von importierten grünen H2 innerhalb der WRL per LKW und lokalen H2-Pipelinenetz zu Standwerken und weiteren lokalen H2-Verteilhubs zu gewährleisten, wäre der Aufbau eines in der WRL zentralen H2-Verteilhubs von hoher Bedeutung.
Hierfür ist der BASF-Standort Schwarzheide prädestiniert (s. Grafik 76). Vorteilhaft am BASF-Standort ist, dass dieser zum einen direkt an der geplanten nationalen H2-Pipeline liegt. Zum anderen weist er neben einer starken technologischen Infrastruktur eine zentrale Lage in der WRL auf und liegt innerhalb eines Gebietes mit hohem Potential zur Erzeugung von grünen Wasserstoff. Darüber hinaus ist durch die direkte Fernverkehrsstraßenanbindung und sehr gute Schieneninfrastruktur ein schneller An- und Abtransport von Wasserstoff per LKW oder Güterzug gewährleistet.

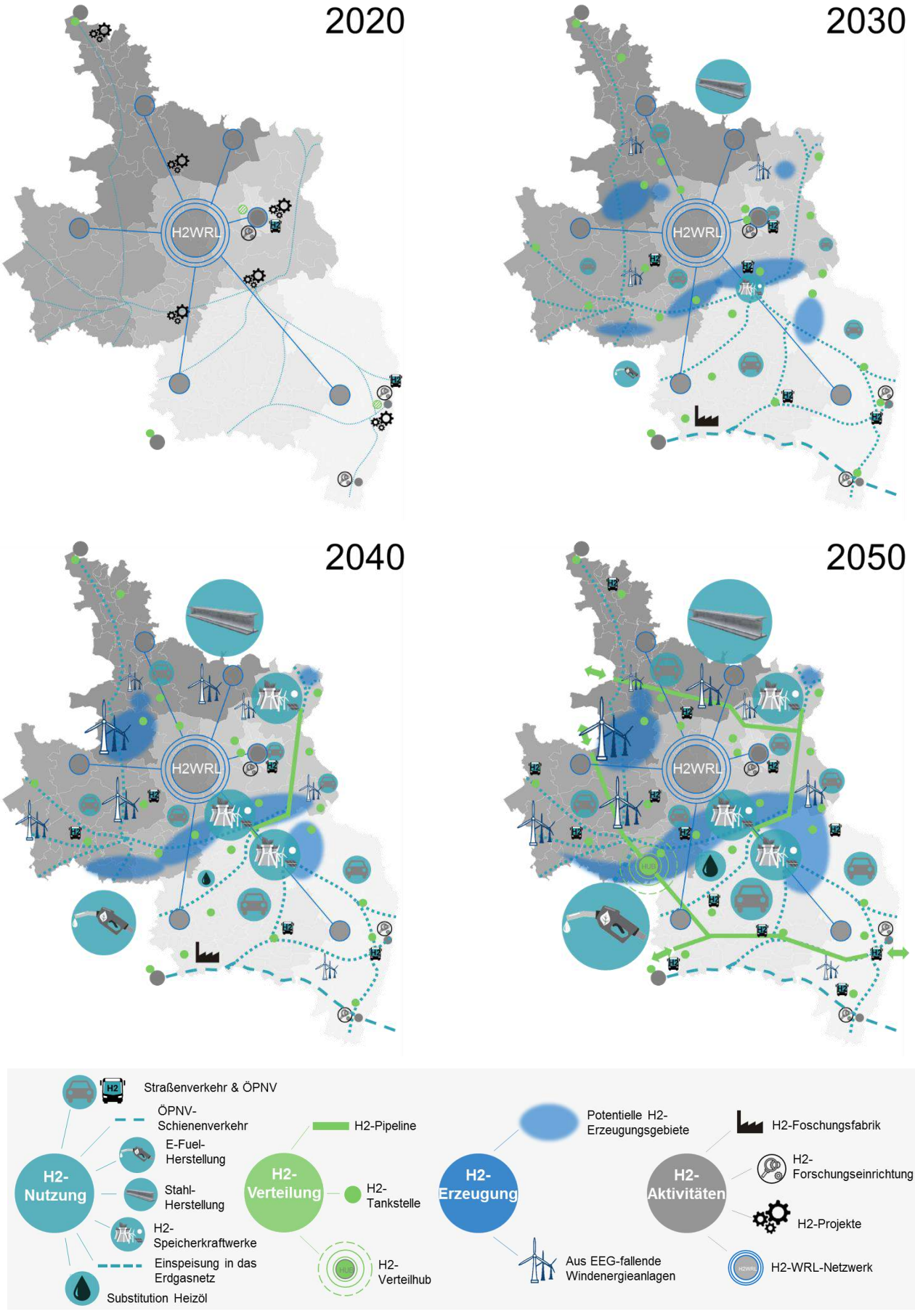


Grafik 76
Lausitzer H2-Verteilhub

Roadmap - Die Entwicklung der Lausitz hin zu einer H2-Modellregion

Die Entwicklung der Lausitz hin zu einer H2-Modellregion mit den Schwerpunkten „Produktion von H2-Technologien“, „H2-basierte Energieerzeugung (zentral, dezentral)“ und „H2-basierte Mobilität“ kann maßgeblich zu einem erfolgreichen und nachhaltigen Strukturwandel der Region beitragen. Dies verdeutlichen die in der Studie durchgeführten Potentialanalysen für eine Wasserstoffwirtschaft in der WRL deutlich.

Insbesondere für die Anwendung von Wasserstoff in allen Bereichen (mobile energ., stoffliche, stationäre energ. Nutzung) bestehen für die Lausitz sehr hohe Potentiale (ca. 160.000 t/a (2030); ca. 700.000 t/a (2040); 1.150.000 t/a (2050)). Dies bildet die Basis für einen erfolgreichen Markthochlauf für eine Lausitzer Wasserstoffwirtschaft. Von zentraler Bedeutung dafür sind allerdings entsprechende politische Entscheidungen auf nationaler und europäischer Ebene im Sinne einer zukünftig wirtschaftlich tragfähigen Erzeugung und Anwendung von Wasserstoff.
Des Weiteren ist durch die hohe Anzahl von installierten Wind- und PV-Anlagen (aktuell ca. 5,1 GW install. Leistung mit einer jährlichen Bruttostromerzeugung von ca. 6.300 GWh) insbesondere in der zentralen Lausitz sowie durch das sehr gut ausgebaute Lausitzer Gasnetz (blauer und türkiser Wasserstoff) ein hohes Potential für die Erzeugung von CO2-freiem und -neutralem Wasserstoff gegeben.
Durch eine zukünftige starke Lausitzer Wasserstoffwirtschaft ergeben sich ebenfalls vielfältige Chancen für die Sicherung von durch den Strukturwandel bedrohten aber auch die Schaffung neuer Arbeitsplätze. Allein durch die Produktion von H2-Technologien wäre die Sicherung bzw. Kompensation von 45 % (2030) – 83 % (2050) der vom Strukturwandel betroffenen Arbeitsplätzen in der Lausitz realisierbar. Darüber hinaus können z. B. durch den Betrieb von H2-Systemen aber auch durch eine intensive Forschung und Entwicklung im Bereich Wasserstoff eine Vielzahl weiterer Arbeitsplätze entstehen.
Die in dieser Studie erarbeiteten Handlungsempfehlungen und Projektideen bieten eine Planungsgrundlage, um die analysierten H2-Potentiale in der WRL ausschöpfen und zukünftig weiter ausbauen zu können. Die schrittweise Umsetzung dieser Handlungsempfehlungen geben der Lausitz die Chance, sich im betrachteten Zeitraum 2020 - 2050 zu einer international beispielhaften H2-Modellregion zu entwickeln.
Aktuell (2020) sind in der Wirtschaftsregion Lausitz bereits verschiedene Akteure, (Forschungs-)Projekte und Vernetzungen im Bereich Wasserstoff vorhanden (vgl. Grafik 77). Ein nächster wichtiger Schritt besteht in der Gründung eines Lausitzer Wasserstoffnetzwerkes, um damit zum einen eine Kompetenzbündelung innerhalb der Lausitz und zum anderen eine wirksame Außendarstellung der vielfältigen Lausitzer Wasserstoffaktivitäten zu erzielen.
Wie in Grafik 77 schematisch dargestellt, werden im ÖPNV bis 2030 eine Vielzahl an H2-betriebenen Fahrzeugen eingesetzt. Weiterhin hat sich bis dahin ein annähernd flächendeckendes Tankstellennetz für den Verkehr ausgebildet. Ebenfalls ist bis 2030 der Aufbau von Zentren für die fachliche und akademische Ausbildung im Bereich Wasserstoff erfolgt.
Bis 2040 sind an den Lausitzer Kraftwerksstandorten H2-Speicherkraftwerke errichtet worden, wodurch es neben der intensiven H2-basierten Roheisen- und E-Fuel-Herstellung zu einem sehr hohen H2-Bedarf in der WRL kommt. Gleichzeitig werden durch die H2-Forschungsfabrik sowie in H2-Gewerbegebieten eine Vielzahl an H2-Technologien und -Systemen hergestellt aber auch eingesetzt.
Bis 2050 wird durch die hohen benötigten und zu transportierenden Mengen ein nationales H2-Pipelinenetz errichtet worden sein. Die Verteilung innerhalb der WRL erfolgt über das zentrale H2-Hub am Standort BASF Schwarzheide sowie über lokale H2-Hubs wie Stadtwerke oder Gewerbegebiete.



Grafik 77
Entwicklung der Wasserstoffwirtschaft in der Lausitz

Abkürzungsverzeichnis

ABSF	Abfallsammelfahrzeuge
BAB	Bundesautobahn
BEV	Batterieelektrische Fahrzeuge
BHKW	Blockheizkraftwerk
BZ	Brennstoffzelle
CB	Cottbus
CCS	Carbon Capture and Storage
CO2	Kohlendioxid
CVD	Clean Vehicle Directive
DD	Dresden
DRL	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DVGW	Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches
EE	Erneuerbare Energie
EEG	Gesetz zur Förderung der erneuerbaren Energien
E-Fuels	Strombasierte synthetische Kraftstoffe
EL	Elektrolyseure
F+E	Forschung und Entwicklung
FCEV	Brennstoffzellenfahrzeuge
FOR	Forst
GR	Görlitz
GuD	Gas und Dampf
H2	Wasserstoff
H2O	Wasser
HLG	Fraunhofer Hydrogen Lab Görlitz
KBA	Kraftfahrt-Bundesamt
komm.	Kommunal
konv.	Konventionell
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LEAG	Lausitz Energie Bergbau AG
LK	Landkreis
LKW	Lastkraftwagen
LNFZ	Leichte Nutzfahrzeuge
MIBRAG	Mitteldeutsche Braunkohlegesellschaft mbH
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
PKW	Personenkraftwagen
PLZ	Postleitzahl
PtX	Power to X
PV	Photovoltaik
RE	Roheisen
SPNV	Schienenpersonennahverkehrsfahrzeuge
SWOT	Strengths (Stärken), Weaknesses (Schwächen), Opportunities (Chancen) und Threats (Risiken)
Vbh	Volllastbenutzungsstunden
WL	Windanlagen
WRL	Wirtschaftsregion Lausitz
ZI	Zittau

Literatur- und Quellenverzeichnis

/1/ Zukunftswerkstatt Lausitz
Die Lausitz - Zahlen & Fakten Ein Überblick
Wirtschaftsregion Lausitz GmbH; 2. Ausgabe, August 2018

/2/ Zukunftswerkstatt Lausitz
Die Lausitz – Zukunftsatlas, Potentiale und Perspektiven
Wirtschaftsregion Lausitz GmbH; 1. Ausgabe, November 2018

/3/ Statistisches Bundesamt Destatis
Kreisfreie Städte und Landkreise nach Fläche, Bevölkerung und Bevölkerungsdichte
https://www.destatis.de/DE/Themen/Laender-Regionen/Regionales/Gemeindeverzeichnis/Administrativ/04-kreise.html
Abfrage: 14.08.2019

/4/ Statistisches Landesamt Sachsen
Bevölkerungsbestand, Sachsen 2018
https://www.statistik.sachsen.de/html/426.htm
Abfrage: 14.08.2019

/5/ Amt für Statistik Berlin-Brandenburg
Bevölkerungsbestand, Berlin-Brandenburg 2018
https://www.statistik-berlin-brandenburg.de/Statistiken/inhalt-statistiken.asp
Abfrage: 14.08.2019

/6/ Wietschel, M. ; Arens, M.; Dötsch, Ch.; Herkel, S.; Krewitt, W.; Markewitz, P.; Möst, D.; Scheufen, M.
Energietechnologien 2050-Schwerpunkte für Forschung und Entwicklung
Politikbericht; Fraunhofer - Institut für System- und Innovationsforschung ISI
Fraunhofer Verlag; 2010

/7/ Dr. Adolf, J.; Dr. Balzer, Ch.; Dr. Louis, J.; Schabla, U.; Prof. Dr. Fischedick, M.; Dr. Arnold, K.; Pastowski, A.; Schüwer, D.
Shell Wasserstoff-Studie, Energie der Zukunft? Nachhaltige Mobilität durch Brennstoffzelle und H_2
Studie; Shell Deutschland; Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH
Shell Deutschland Oil GmbH; 2017

/8/ Nozharova, D.; Diwald, W.
H2-Industrie Potenzialstudie Brandenburg
Deutscher Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verband e.V.; Juli 2019

/9/ Mittelstandswiki
Selbstregelnde Energienetze
https://www.mittelstandswiki.de/wissen/E-Government:Smart_Grids
Abfrage: 15.08.2019

/10/ Hobohm, J.; Auf der Mauer, A.; Dambeck, H.; Dr. Kemmler, A.; Koziel, S.; Kreidelmeyer, S.;
Dr. Piégsa A.; Wendring, P.;
Status und Perspektiven flüssiger Energieträger in der Energiewende
Studie; Prognos AG; Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT; Deutsches Biomasseforschungszentrum DBFZ
Prognos AG; Mai 2018

/11/ Kasten, P.; Kühnel, S.;
Positionen zur Nutzung strombasierter Flüssigkraftstoffe (efuels) im Verkehr
Öko-Institut e.V.; Juli 2019

/12/ Kraftfahrtbundesamt
Fahrzeugzulassungen - Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Zulassungsbezirken
FZ1.1 Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern am 1. Januar 2019 nach Zulassungsbezirken
https://www.kba.de/DE/Statistik/Produktkatalog/produkte/Fahrzeuge/fz1_b_uebersicht.html
Abfrage: 10.08.2019

/13/ Dr. Adolf, J.; Dr. Balzer, Ch.; Dr. Haase, F.; Prof. Dr. Lenz, B.; Lischke A.; Knitschky, G.
Shell Nutzfahrzeug-Studie, Diesel oder alternative Antriebe – Womit fahren LKW und Bus morgen?
Fakten, Trends und Perspektiven bis 2040
Studie; Shell Deutschland, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt DLR
Shell Deutschland Oil GmbH; 2016

/14/ VDA Verband der Automobilindustrie
Nutzfahrzeuge – Zukunft bewegen
Broschüre; VDA Verband der Automobilindustrie; August 2014

/15/ Ingenieur.de
Klimaneutrale Stahlproduktion, Kann Wasserstoff im Hochofen die Emissionen nachhaltig reduzieren?
https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/produktion/kann-wasserstoff-im-hochofen-die-emissionen-nachhaltig-reduzieren/ Artikel; Ingeniereur.de
Abfrage: 25.02.2020

/16/ Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena)
Einsatzgebiete für Power Fuels – Stahlproduktion
dena-Factsheet; Deutsche Energie Agentur GmbH; August 2018

/17/ NOW GmbH
Saubere Mobilität in Deutschland-Kennzahlen und Projekte
https://www.now-gmbh.de/de/aktuelles/presse/saubere-mobilitaet-in-deutschland-kennzahlen-und-projekte
Infoservice; NOW GmbH; Juli 2019
Abfrage: 11.09.2019

/18/ Joest, S.; Dr. Fichtner, M.; Prof. Dr. Wietschel, M.; Prof. Dr. Bünger, U.; Stiller, Ch.; Schmidt, P.; Merten, F.
Woher kommt der Wasserstoff in Deutschland bis 2050?
Studie; Deutsche Energie-Agentur GmbH; Forschungszentrum Karlsruhe GmbH; Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI; Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH; Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH;
BMV BS, August 2009

/19/ Böckers, V.; Hardorp, L.; Haucap, J.; Heimeshoff, U.; Gösser, N.; Thorwarth, S.
Ordnungspolitische Perspektiven
Studie; Düsseldorf Institut für Wettbewerbsökonomie
düsseldorf university press (dup), Juli 2016

/20/ Meereis, J.; Lutz-Kulawik, T.; Rickert, M.; Sitner, A.; Dittberner, E.; Meereis, H.
Potenzialstudie Wasserstoffwirtschaft
Bericht; IPP ESN Power Engineering GmbH; September 2019

/21/ H2 MOBILITY Deutschland GmbH & Co.KG
H2 MOBILITY – Wir bauen das Tankstellennetz der Zukunft
https://h2.live/h2mobility
Abfrage: 10.01.2020

/22/ Faun Umwelttechnik GmbH & Co. KG
Faun Bluepower – Die Zukunft der emissionsfreien Entsorgung
https://www.faun.com/produkte/alternative_antriebe/bluepower/
Abfrage: 27.11.2019

/23/ Wikipedia
Bahnstrecke Lübbenau-Kamenz
https://de.wikipedia.org/wiki/Bahnstrecke_L%C3%BCbbenau%E2%80%93Kamenz
Abfrage: 05.11.2019

/24/ Linde Gas GmbH
Rechnen Sie mit Wasserstoff – Die Datentabelle
https://www.linde-gas.at/de/images/1007_rechnen_sie_mit_wasserstoff_v110_tcm550-169419.pdf
Broschüre, Linde Gas GmbH, September 2013

/25/ ODEG – Ostdeutsche Eisenbahn GmbH
Willkommen unterwegs – Fahrzeugflotte
https://odeg.de/unternehmen/fahrzeugflotte/
Abfrage: 22.10.2019

/26/ Zukunft Erdgas e.V.
Wasserstoff – ein wichtiges Industrieprodukt
https://zukunft.erdgas.info/themen-ziele/gruene-gase/wasserstoff
Abfrage: 16.09.2019

/27/ Deutscher Bundestag, Wissenschaftlicher Dienst
Grenzwerte für Wasserstoff (H2) in der Erdgasinfrastruktur
Sachstand; Deutscher Bundestag – Fachbereich WD 8: Umwelt, Naturschutz, Reaktorsicherheit, Bildung und Forschung, Aktenzeichen WD 8 - 3000 - 066/19; 07.Juni 2019

/28/ Spiegel online
Große Koalition einigt sich auf Klimaschutzpaket
https://www.spiegel.de/politik/deutschland/klima-gipfel-grosse-koalition-einigt-sich-auf-klimaschutz-paket-a-1287824.html
Abfrage: 20.09.2019

/29/ Bundesverband des Schornsteinfegerhandwerks – Zentralinnungsverband ZIV
Erhebung des Schornsteinfegerhandwerks 2018
Erhebung; Bundesverband des Schornsteinfegerhandwerks; 2018

/30/ Statista
Anteil von Öl-Zentralheizungen in Wohngebäuden in Deutschland nach Bundesland im Jahr 2019
https://de.statista.com/statistik/daten/studie/376141/umfrage/anteil-von-oel-zentralheizungen-in-wohngebaeuden-nach-bundesland/
Abfrage: 21.09.2019

/31/ Energieheld / RENEWA GmbH
Durchschnittlicher Heizölbedarf
www.energieheld.de
Abfrage: 02.09.2019

/32/ Effizienhaus-Online / Bosch Thermotechnik GmbH
Durchschnittlicher Heizölbedarf
www.effizienzhaus-online.de
Abfrage: 02.09.2019

/33/ BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.
Studie: Wie heizt Deutschland 209?
https://www.bdew.de/energie/studie-wie-heizt-deutschland/
Abfrage: 11.09.2019

/34/ EMCEL Ingenieurbüro für Brennstoffzellen, Wasserstofftechnologie und Elektromobilität
Wann lohnt sich der Transport von Wasserstoff per Wasserstoffpipeline?
https://emcel.com/de/wann-lohnt-sich-der-transport-von-h2-per-h2pipeline/
Abfrage: 14.08.2019

/35/ Smolinka, T.; Wiebe; N.; Sterchele, P.; Palzer, A.; Lehner, F.; Jansen, M.; Kiemel, S.; Miehe, R.; Wahren, S.; Zimmermann, F.
Studie IndWEDe - Industrialisierung der Wasserelektrolyse in Deutschland: Chancen und Herausforderungen für nachhaltigen Wasserstoff für Verkehr, Strom und Wärme
Studie; Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE; E4tech Sàrl; Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie und Automatisierung IPA; NOW GmbH
Now GmbH, September 2018

/36/ Statistisches Bundesamt Destatis
Durchschnittl. Personalaufwendungen für Industrie, Verarbeitendes Gewerbe, Kennzahlen der Unternehmen des verarbeitenden Gewerbes 2017
Pressemitteilung
https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Industrie-Verarbeitendes-Gewerbe/_inhalt.html
Abfrage: 27.09.2019

/37/ Strategic Analysis Inc.
Final Report: Hydrogen Storage System Cost Analysis, September 2016
https://www.osti.gov/servlets/purl/1343975
Abfrage: 10.10.2019

/38/ CleanEnergy Project
Akzeptanz von Wasserstoff als Kraftstoff höher als erwartet
https://www.cleanenergy-project.de/gesellschaft/soziales/akzeptanz-von-wasserstoff-als-kraftstoff-hoher-als-erwartet/
Abfrage: 28.10.2019

/39/ Presseportal / news aktuell GmbH
GfK-Studie zeigt: Bei Autofahrern in Deutschland steigt Elektro-Antrieb auf Platz 2 der Attraktivitätsskala
https://www.presseportal.de/pm/43853/3991971
Abfrage: 28.10.2019

/40/ *European Commission*
Strategic Forum for Important Projects of Common European Interest (IPCEI)
https://europa.eu/!nT98kN
Abfrage: 10.01.2020

/41/ ADAC
Synthetische Kraftstoffe – Energieträger der Zukunft?
https://www.adac.de/verkehr/tanken-kraftstoff-antrieb/alternative-antriebe/synthetische-kraftstoffe/
Abfrage: 20.11.2019

/42/ Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking
Hydrogen Roadmap Europe
Studie; Air Liquide S.A.; BMW Group; Deutscher Wasserstoff- und Brennstoffzellenverband; Enagás; Engie; Equinor ASA; N.V. Nederlandse Gasunie; Hydrogenics; ITM Power; Michelin; NEL Hydrogen; Plastic Omnium; Salzgitter AG; Solid Power; Total SA; Toyota Motor Europe; January 2019

/43/ GP JOULE GmbH / Johanssen + Kretschmer Strategische Kommunikation GmbH
Akzeptanz durch Wertschöpfung - Wasserstoff als Bindeglied zwischen der Erzeugung erneuerbarer Energien und der Nutzung im Verkehrs-, Industrie- und Wärmesektor
Studie; GP JOULE GmbH / Johanssen + Kretschmer Strategische Kommunikation GmbH
HOCHZWEI – Büro für visuelle Kommunikation GmbH & Co. KG, März 2017

/44/ Project Hyacinth
Projekt HYACINTH – Ergebnisse zur Akzeptanz der Bevölkerung
Studie; Project Hyacinth
Project Hyacinth; April 2017

/45/ Asian Development Bank (ADB)
2011 – Clean Energy Investments
Studie; ADB
ADB; Juni 2012

/46/ Presseportal / news aktuell GmbH
GfK-Studie zeigt: Bei Autofahrern in Deutschland steigt Elektro-Antrieb auf Platz 2 der Attraktivitätsskala
https://www.presseportal.de/pm/43853/3991971
Abfrage: 15.01.2020

/47/ PKW-Label
dena-Umfrage: 10 Prozent der Pkw-Fuhrparks verfügen über alternative Antriebe
https://www.pkw-label.de/presse/pressemeldungen/nachricht/news/dena-umfrage-10-prozent-der-pkw-fuhrparks-verfuegen-ueber-alternative-antriebe/
Abfrage: 15.01.2020

/48/ Statista
KFZ 2018 - Statista Konsumentenbefragung - Tabellenband
https://de.statista.com/statistik/studie/id/53808/dokument/kfz
Abfrage: 15.01.2020

/49/ NOW GmbH
Auf dem Weg zur Emissionsfreiheit im Zugverkehr – Wasserstoff-Infrastruktur für die Schiene
Studie; Now GmbH; Ernst&Young GmbH; Ludwig Bölkow Systemtechnik; Becker Büttner Held; Signon Group; TÜV Süd Rail; IFOK GmbH
NOW Nationale Organisation Wasserstoff und Brennstoffzellentechnologie, 2016

/50/ Hamburger Hochbahn
Die Hochbahn wird klimaneutral
https://www.hochbahn.de/hochbahn/hamburg/de/Home/Unternehmen/Unser_Beitrag/Umwelt_und_Klima
Abfrage; 22.01.2020

/51/ Müller, K.; Schnitzler; F.; Lozanovski, A.; Skiber S.; Ojakovoh, M.;
Clean Hydrogen In European Cities (CHIC)
Studie; Daimler Buses-EvoBus GmbH, Air Products Nederlands; Universität Stuttgart; Element Energy
chic-project; Februar 2017

/52/ Öko-Institut e.V.,
Positionen zur Nutzung strombasierter Flüssigkraftstoffe (efuels) im Verkehr
https://www.oeko.de/publikationen/p-details/positionen-zur-nutzung-strombasierter-fluessigkraftstoffe-efuels-im-verkehr/
Abfrage: 10.02.2020

/53/ NDR
Lufthansa will mit Kerosin aus Windstrom abheben
https://www.ndr.de/nachrichten/schleswig-holstein/Lufthansa-will-mit-Kerosin-aus-Windstrom-abheben,kerosin100.html
Abfrage: 19.11.2019

/54/ Dr. Bünger, U.; Nicolai; St.; Zerhisen, J.; Monsalve, C.; Kharbouti, S.; Dr. Michalski, J.; Ruhe, ST.; Dr. Albrecht, U.
Infrastrukturbedarf E-Mobilität
Studie; Ludwig-Bölkow-Stiftung
Ludwig-Bölkow-Stiftung; Juni 2019

/55/ Agentur für erneuerbare Energie
Statistiken EE-Leistung
https://www.foederal-erneuerbar.de/startseite
Abfrage: 23.01.2020

/56/ RP-Energie-Lexikon
Ausfallarbeit
https://www.energie-lexikon.info/ausfallarbeit.html
Abfrage: 08.01.2020

/57/ Fachagentur Windenergie an Land
Länderinformationen - Sachsen
https://www.fachagentur-windenergie.de/veroeffentlichungen/laenderinformationen/laenderinformationen-zur-windenergie/sachsen.html
Abfrage: 08.01.2020

/58/ Deutsche Energie Agentur GmbH
Integrierte Energiewende
Leitstudie Ergebnisbericht, 2019

/59/ Strukturentwicklung Sachsen
Strukturentwicklung in den sächsischen Braunkohleregionen
https://www.strukturentwicklung.sachsen.de/
Abfrage: 16.02.2020

Förderung

Gefördert aus Mitteln des Bundes, des Freistaates Sachsen und des Landes Brandenburg im Rahmen der Gemeinschaftsaufgabe „Verbesserung der regionalen Wirtschaftsinfrastruktur“.

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

Impressum

Herausgeber:

Wirtschaftsregion Lausitz GmbH
Projekt Zukunftswerkstatt Lausitz
Heideweg 2, 02953 Bad Muskau
T +49 35771 6599-10
E zukunft@wirtschaftsregion-lausitz.de

In Zusammenarbeit mit:

Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU
CEBra – Centrum für Energietechnologie Brandenburg e.V