

Maximilian Schneider

# Sektoranalyse: Wasserstoff im Verkehrssektor

Eine erste Bestandsaufnahme zu technologischen Veränderungen und neuen Anforderungen in der Fachkräftequalifizierung



BIBB Discussion Paper

Zitiervorschlag:

Schneider, Maximilian: Sektoranalyse : Wasserstoff im Verkehrssektor - eine erste Bestandsaufnahme zu technologischen Veränderungen und neuen Anforderungen in der Fachkräftequalifizierung. Version 1.0 Bonn, 2023.

Online: [https://res.bibb.de/vet-repository\\_781261](https://res.bibb.de/vet-repository_781261).



© Bundesinstitut für Berufsbildung, 2023

Version 1.0  
April 2023

**Herausgeber**

Bundesinstitut für Berufsbildung  
Robert-Schuman-Platz 3  
53175 Bonn  
Internet: [www.vet-repository.info](http://www.vet-repository.info)  
E-Mail: [repository@bibb.de](mailto:repository@bibb.de)

**CC Lizenz**

Der Inhalt dieses Werkes steht unter Creative-Commons-Lizenz (Lizenztyp: Namensnennung - Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International).

Weitere Informationen finden sie im Internet auf unserer Creative-Commons-Infoseite

<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0>.

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Diese Netzpublikation wurde bei der Deutschen Nationalbibliothek angemeldet und archiviert:

urn:nbn:de:0035-vetrepository-781261-7

---

## **Sektoranalyse: Wasserstoff im Verkehrssektor – Eine erste Bestandsaufnahme zu technologischen Veränderungen und neuen Anforderungen in der Fachkräftequalifizierung**

Maximilian Schneider

---

### **Abstract**

Wasserstofftechnologien besitzen das Potenzial, die Antriebswende im Verkehrssektor entscheidend voranzubringen. Verkehrsbereiche, in denen die Anwendung von batterieelektrischen Antriebssystemen nicht möglich oder nicht wirtschaftlich ist, können durch Wasserstoff und dessen Folgeprodukte von fossilen Kraftstoffen entkoppelt werden. Von der Entwicklung und Produktion über den Betrieb bis zur Wartung und Instandsetzung der Fahrzeuge und Infrastrukturanlagen sind gut qualifizierte Fachkräfte auf der Ebene des dualen Berufsbildungssystems unverzichtbar für die wasserstoffbasierte Mobilität. Die Fragen, ob und wie sich Arbeitsaufgaben und Qualifizierungsbedarfe in Ausbildungsberufen durch Wasserstoff verändern und welche Handlungsbedarfe für die berufliche Aus- und Weiterbildung bestehen, sind bislang allerdings wenig beleuchtet. Die vorliegende Sektoranalyse diskutiert technologische Veränderungen, die mit dem Wasserstoffhochlauf im Verkehrssektor verbunden sind, und wirft einen ersten Blick auf Qualifikationsbedarfe in relevanten Ausbildungsberufen. Zu betonen ist, dass es sich dabei um eine erste Bestandsaufnahme und keine abgeschlossene Untersuchung handelt. Die Bereiche Schienen-, Schiffs- und Flugverkehr werden im Rahmen des H2PRO-Projekts ebenfalls untersucht, sind aber nicht Gegenstand des vorliegenden Beitrags.

## Abkürzungsverzeichnis

BEV – Battery Electric Vehicle

BIBB – Bundesinstitut für Berufsbildung

BoP – Balance of Plant

BMBF – Bundesministerium für Bildung und Forschung

BPP – Bipolar Plate

CCM – Catalyst Coated Membrane

FC – Fuel Cell

FCEV – Fuel Cell Electric Vehicle

GDL – Gas Diffusion Layer

MEA – Membrane Electrode Assemblies

NWS – Nationale Wasserstoffstrategie

OEM – Original Equipment Manufacturer

PEMFC – Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Relevante Berufe für Arbeiten an Antriebssystemen von Wasserstofffahrzeugen ..... 19

Tabelle 2: Ausbildungsberufe für den Fahrzeugbetrieb..... 20

Tabelle 3: Qualifizierungsstufen nach DGUV FBHM-099 ..... 22

## Inhalt

1	Das Wichtigste in Kürze .....	3
2	Einleitung.....	5
2.1	Gesellschaftliche und technische Einordnung der Wasserstoffnutzung.....	5
2.2	Forschungsbedarf, Zielstellung der Sektoranalyse und Einordnung innerhalb des H2PRO-Projekts.....	6
3	Verkehrsbedingte Emissionen und Antriebswende .....	8
4	Wasserstofftechnologien im Verkehrssektor.....	10
4.1	Wasserstoffbasierte Antriebslösungen .....	10
4.1.1	PEM-Brennstoffzelle.....	10
4.1.2	Wasserstoffmotor .....	11
4.1.3	eFuels.....	12
4.2	Anwendungspotenziale.....	12
4.2.1	Pkw .....	12
4.2.2	Schwerlasttransport .....	13
4.2.3	ÖPNV-Busse.....	13
4.2.4	Land- und Baumaschinen .....	14
4.2.5	Flurförderfahrzeuge .....	14
4.3	Tankinfrastruktur.....	14
5	Tätigkeitsbereiche, Aufgabencluster und Berufe entlang der Wertschöpfungsketten .....	15
5.1	Brennstoffzellen- und Fahrzeugproduktion .....	16
5.2	Arbeiten an und mit Wasserstofffahrzeugen.....	17
5.2.1	Berufliche Veränderungen in der Elektromobilität .....	17
5.2.2	Arbeiten an Wasserstofffahrzeugen .....	18
5.2.3	Betrieb von Wasserstofffahrzeugen.....	19
5.3	Arbeiten an Wasserstofftankanlagen.....	20

6	Schulungs- und Weiterbildungsangebote als Indikator für Qualifikationsbedarfe und -strategien .....	21
7	Diskussion und weiterer Forschungsbedarf .....	22
8	Literaturverzeichnis.....	23

## 1 Das Wichtigste in Kürze

Die vorliegende Sektoranalyse bildet eine erste Bestandsaufnahme im BMBF-geförderten Projekt H2PRO am Bundinstitut für Berufsbildung (BIBB). Ziel des Projekts ist es, entlang der gesamten Wasserstoff-Wertschöpfungskette – von der Erzeugung grünen Wasserstoffs bis in die Anwendungsbereiche Stahl, Chemie, Mobilität und Wärmeversorgung – Veränderungen von Kompetenz- und Qualifikationsbedarfen in relevanten Ausbildungsberufen zu ermitteln und entsprechende Handlungsempfehlungen für politische und praxisunterstützende Akteure der beruflichen Aus- und Weiterbildung abzuleiten.

Wasserstoff ist Teil eines breiten Strukturwandels in der Fahrzeugindustrie und angeschlossenen Servicebereichen, der in erster Linie durch die Antriebselektrifizierung angestoßen wird. Wasserstoff ermöglicht es die Antriebswende in jenen Verkehrsbereichen umzusetzen, in denen batterieelektrische Antriebe erhöhte Energiebedarfe nicht bedienen können. Hohe Anwendungspotenziale werden daher im Schwerlasttransport, bei ÖPNV-Bussen oder bei Land- und Baumaschinen gesehen. Bei wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen handelt es sich i.d.R. um Fahrzeuge mit Brennstoffzelle. Darüber hinaus ist auch der Einsatz von Wasserstoff-Verbrennungsmotoren oder synthetischen Kraftstoffen auf Wasserstoffbasis möglich. Gesetzliche Vorgaben und Herstellerstrategien deuten auf eine dynamische Marktentwicklung von Brennstoffzellenfahrzeugen in den kommenden Jahren hin.

Wichtige Berufe für die Arbeit an Brennstoffzellenfahrzeugen sind Kraftfahrzeugmechatroniker/-innen, Land- und Baumaschinenmechatroniker/-innen sowie Karosserie- und Fahrzeugbaumechaniker/-innen. Erste Qualifizierungsbedarfe lassen sich daran erkennen, dass Fahrzeughersteller, Zulieferer und einzelne Werkstätten Teile ihres Personals schulen und sich ein Weiterbildungsmarkt formiert. Neue Qualifizierungsinhalte beziehen sich in erster Linie auf das sichere Arbeiten am Gashochdrucksystem und entsprechende Stoff-, Gefahren- und Systemkenntnisse. Da es sich bei Brennstoffzellenfahrzeugen um Elektrofahrzeuge handelt, sind Hochvoltqualifizierungen zudem Grundvoraussetzung für berufliches Handeln in der Wasserstoffmobilität. Als Orientierungsrahmen für die angebotenen

Schulungen und Zertifikate dienen i.d.R. die Qualifizierungsstufen der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV). Für die Arbeit an den Antriebssystemen ist mindestens die Qualifizierungsstufe 2E/2S erforderlich. In Servicewerkstätten kann das notwendige Qualifizierungsniveau für die Arbeit am Gasantrieb auch über eine Schulung zur Gasanlagenprüfung (GAP) und entsprechende Schulungen zur Hochvolttechnik erreicht werden. Über neue Qualifizierungsinhalte hinaus erfordern Wasserstofffahrzeuge zudem Anpassungen der Werkstattausstattung und -organisation, bspw. da Wasserstoffsensoren und Vorrichtungen zum Explosionsschutz, Deckenarbeitsstände und Deckenkräne benötigt werden.

Fachkräfteseitig ist auch der Aufbau der Tankinfrastruktur zu beachten. Wasserstofftankstellen sind umfangreicher und komplexer als Benzin- und Dieseltankstellen. Neben einer höheren Zahl an Komponenten und Baugruppen (bspw. Nieder- und Hochdruckspeicher, Kompressoren, Kühler, Zapfanlage etc.) verfügen Wasserstofftankstellen auch über mehr sensorik- und softwarebasierte Funktionen. Wichtig ist auch, ob die Tankstellen durch angeschlossene Wasserstoffherzeugung *on-site* oder *off-site* durch Wechseltrailer-Anlieferung bzw. Pipelines versorgt werden. Technische Arbeiten an Wasserstofftankstellen erfordern daher Fachkräfte mit breiten Kompetenzprofilen sowie zusätzliche Qualifizierungen zu Gasdruckanlagen und Explosionsschutz.

Im weiteren Projektverlauf ist zu prüfen, ob aus dem neuen Aufgabenfeld der Wasserstofftechnologien ordnungsrelevante Anpassungsbedarfe in einzelnen Ausbildungsberufen resultieren. Zu diesem Zweck sind Arbeitsaufgaben und Tätigkeitsstrukturen entlang der Herstellung, Nutzung und Instandsetzung von Fahrzeugen und Tankanlagen näher zu beleuchten. Dabei sind insbesondere jene Berufe in den Blick zu fassen, die an den Antriebssystemen der Fahrzeuge arbeiten. Zu erwarten ist, dass in vielen Berufen, die nicht direkt mit dem Gassystem in Berührung kommen oder die im Umfeld der Fahrzeuge arbeiten, lediglich Schulungen zu sicherheitsrelevanten Aspekten oder grundlegende Sensibilisierungen erforderlich sein werden. Über Ordnungsfragen hinaus sind Umsetzungsfragen der Aus- und Weiterbildung zu diskutieren.

Im Schienen-, Schiffs- und Flugverkehr bildet Wasserstoff den Schlüsselbaustein zur Emissionsvermeidung. Auf der Schiene bieten Brennstoffzellenzüge eine Möglichkeit Dieselloks auf jenen Strecken zu ersetzen, wo der Bau von Oberleitungen nicht möglich oder nicht wirtschaftlich ist. In der Binnen- und küstennahen Schifffahrt eröffnen Brennstoffzellen eine vielversprechende Perspektive, um von Dieselantrieben auf emissionsfreie Antriebssysteme umzusteigen. Im Flugverkehr erforschen Flugzeughersteller und Hochschulen neben dem Einsatz von synthetischem Kerosin auf Langstreckenflügen auch

den Einsatz von Brennstoffzellen und Wasserstoffmotoren auf Kurz- und Mittelstrecken. Fachkräfteseitig könnten dann berufliche Anpassungen erforderlich sein, wenn der Übergang zum Wasserstoff mit einem grundlegenden technologischen Wandel einhergeht. Während der Einsatz von synthetischen Kraftstoffen mit nur geringfügigen Anpassungen der Verbrennungsmotoren und Betankungstechnik verbunden ist, bedeutet der Einsatz von Brennstoffzellen eine Elektrifizierung der Antriebssysteme und somit neue elektrotechnische Arbeits- und Kompetenzanforderungen. Die Bereiche Schienen-, Schiffs- und Flugverkehr werden im Rahmen des H2PRO-Projekts ebenfalls untersucht, sind aber nicht Gegenstand der vorliegenden Sektoranalyse.

## 2 Einleitung

### 2.1 Gesellschaftliche und technische Einordnung der Wasserstoffnutzung

Mit dem 2021 verschärften Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) hat sich Deutschland verpflichtet, seine Treibhausgasemissionen bis 2030 um 65% gegenüber 1990 zu senken und bis 2045 treibhausgasneutral zu werden (BUNDESREGIERUNG 2022). Grüner Wasserstoff gilt als wichtiger Baustein zu Erreichung der Klimaziele, da seine energetische und stoffliche Nutzung teils alternativlose Wege zur CO<sub>2</sub>-Vermeidung eröffnet. Die 2020 vorgestellte Nationale Wasserstoffstrategie bildet den politischen Rahmen, um den Aufbau der Wasserstoffwirtschaft durch Förderung unterschiedlicher Handlungsfelder voranzubringen (BMW i 2020). Das in der Strategie festgehaltene Ausbauziel von 5 GW Elektrolysekapazität im Jahr 2030 wurde mit dem Koalitionsvertrag der aktuellen Bundesregierung auf 10 GW verdoppelt (SPD, BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN, FDP 2021).

In der Transformation des Energiesystems bieten Wasserstoff und seine Folgeprodukte dort eine vielversprechende Perspektive, wo der Einsatz direkt- oder batterieelektrischer Systeme technisch nicht möglich oder wirtschaftlich unvorteilhaft ist. Insbesondere Verkehrssegmente wie der Langstreckentransport, die Schifffahrt oder der Flugverkehr können über die Rückverstromung in der Brennstoffzelle oder die Verbrennung synthetischer Kraftstoffe auf Wasserstoffbasis von fossilen Antriebslösungen entkoppelt werden (SHELL DEUTSCHLAND/WUPPERTAL INSTITUT 2017; FRAUNHOFER IPT 2021). In der Wärmeversorgung ist der Einsatz von Wasserstoff in Blockheizkraftwerken, Brennstoffzellenheizungen oder H<sub>2</sub>-fähigen Gaskesseln möglich (MEYER/HERKEL/KOST 2021).

Als industrieller Roh- und Hilfsstoff in der Stahl- oder Chemieproduktion kann Wasserstoff entscheidend dazu beitragen, fossile Stoffe zu ersetzen und damit verbundene Prozessemissionen zu vermeiden. In der Produktion von Primärstahl bspw. kann Wasserstoff als Reduktionsmittel im sog.

Direktreduktionsverfahren genutzt werden und somit das in der Hochofenroute genutzte Kohlekoks ersetzen (AGORA ENERGIEWENDE/WUPPERTAL INSTITUT 2019).

Insgesamt bieten Power-to-X-Technologien – d.h. die Umwandlung von Strom in Wasserstoff und daran anknüpfend synthetisches Methan (Power-to-Gas) oder die Weiterverarbeitung zu flüssigen Kohlenwasserstoffen (Power-to-Liquid) – die Möglichkeit, die Infrastrukturen der Energiewirtschaft, Mobilität und Industrie tiefgehend zu verknüpfen (Sektorenkopplung) und eine umfangreiche Versorgung mit erneuerbaren Energien zu erreichen. Durch seine flexiblen Herstellungs- und Speicheroptionen ermöglicht Wasserstoff zudem eine effizientere Systemintegration erneuerbarer Energien, insbesondere wenn überschüssige Strommengen in besonders windstarken oder sonnigen Phasen nicht ins Netz eingespeist werden können (WIETSCHEL u. a. 2018).

Entsprechend der Annahmen in den jeweiligen Szenarien beziffern Prognosen die Bandbreite des Wasserstoffbedarfs auf ca. 50 bis 120 TWh im Jahr 2030 und ca. 400 bis 700 TWh im Jahr 2045 (ARIADNE 2021; BMWi 2020; PROGNOSE/ÖKO-INSTITUT/WUPPERTAL-INSTITUT 2021). Mit dem politisch anvisierten Ziel von 10 GW Elektrolysekapazität in 2030 könnten rund 28 TWh dieses Bedarfs aus heimischer Produktion gedeckt werden. Daraus ergeben sich zum einen hohe Importbedarfe und die Notwendigkeit zum Aufbau internationaler Infrastrukturen, Märkte und Partnerschaften (MÖNNING u. a. 2022; ACATECH/LEOPOLDINA/UNION DER DEUTSCHEN AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN 2022). Zum anderen setzt das Ziel einer umfangreichen inländischen Produktion den erheblichen Ausbau erneuerbarer Energien voraus (HOLZ u. a. 2022).

## **2.2 Forschungsbedarf, Zielstellung der Sektoranalyse und Einordnung innerhalb des H2PRO-Projekts**

Gut ausgebildete Fachkräfte auf der Ebene des dualen Berufsbildungssystems sind ein Schlüsselfaktor für den Aufbau der Wasserstoffwirtschaft. Entlang der gesamten Wertschöpfungskette werden qualifizierte Fachkräfte benötigt, die die notwendigen Technologien herstellen, ihr tägliches Funktionieren sichern und die wichtige Innovationsimpulse beitragen (STEEG u. a. 2022). Quantitativ betrachtet, ist die Verbreitung von Wasserstoffanwendungen und der Aufbau entsprechender Wertschöpfungsketten mit teils hohen Beschäftigungsprognosen verbunden (bspw. ROLANDBERGER 2020; DWV 2018; NPM 2021; ZENK u. a. 2023). Qualitative Beschäftigungsaspekte sind dagegen noch wenig beleuchtet. Den Fragen, ob und wie sich Arbeitsaufgaben, -prozesse und Kompetenzanforderungen in Ausbildungsberufen konkret verändern, welche Qualifizierungsbedarfe zusätzlich entstehen und welche

Konsequenzen sich für Berufsprofile sowie für Aus- und Weiterbildungsaktivitäten ergeben, kommt bislang wenig Aufmerksamkeit zu.

Wie eine Stelleanzeigenauswertung des Institut für Arbeitsmarkt- und Berufsforschung (GRIMM/JANSER/STOPS 2021) zeigt, ist die Nachfrageentwicklung nach wasserstoffbezogenen Kompetenzen eng an die Phasen des Hochlaufs gekoppelt. Neben Personen für (hoch)komplexe Tätigkeiten, mit Qualifikationen oberhalb der dualen Berufsausbildung, besteht auch für Fachkräfte in technischen Ausbildungsberufen bereits in frühen Phasen der Marktentwicklung ein konkreter Bedarf. Die Autor/-innen erwarten, dass sich die Nachfrage nach Fachkräften für wasserstoffbezogene Tätigkeiten in den einzelnen Branchen und Regionen je nach Marktreife der Technologien und Umfang der Wasserstoffaktivitäten ungleichmäßig entwickelt. Aufgrund der verbesserten Möglichkeiten zur Sektorenkopplung wird auch erwartet, dass nicht nur die Nachfrage nach Wasserstoffkompetenzen im engeren Sinne, sondern nach Fachkräften für die Arbeit an vernetzten Energiesystemen und infrastrukturellen Schnittstellen insgesamt steigt (ebd.; siehe auch FLECKENSTEIN 2022). Eine regionale Bedarfsanalyse für Nord-Ost-Niedersachsen (H2SKILLS 2022) stützt den Eindruck, dass sich derzeit ein schnell wachsender Weiterbildungsmarkt formiert und die Nachfrage nach wasserstoffbezogenen Schulungs-/Qualifizierungsangeboten sowie entsprechenden Zertifikaten steigt. In der Auswertung der Expertengespräche wird die Notwendigkeit zur Qualifizierung von Dozierenden betont, da nur wenige Personen verfügbar sind „die bereits wichtige Hands-on-Erfahrung gesammelt haben und ihr Wissen auch [...] weitergeben können oder wollen“ (S.29). Zudem besteht in manchen Bereichen noch ein Mangel an technischen Normen und Regeln sowie an Orientierungshilfen was konkrete Qualifikationsanforderungen für Fachkräfte anbelangt (ebd.).

Aus Sicht der Berufsbildung besteht hier ein Forschungsbedarf bezüglich der Frage, ob neue Qualifizierungsbedarfe in Berufen mit Relevanz für die Wasserstoffwirtschaft bestehen und diese mit einem Anpassungsbedarf der Ordnungsmittel verbunden sind. Über Qualifikationsinhalte hinaus, sind auch Umsetzungsfragen der Aus- und Weiterbildung relevant. Zu beachten ist, welche Weiterbildungsangebote und -strategien für einen reibungslosen Kompetenzaufbau im Bereich Wasserstoff erforderlich sind und wie Praxisakteure unterstützt werden können. Beispiele wie der Ausbau der Wärmepumpen oder die Gebäudesanierung deuten zudem darauf hin, dass Fachkräfteengpässe den Ausbau klimafreundlicher Technologien bremsen können (RUNST/OHLENDORF 2015; ÖKO-INSTITUT/FRAUNHOFER ISE 2022). Daher ist es wichtig, Fragen der Fachkräftequalifizierung frühzeitig in den Blick zu fassen, um ähnlichen Effekten in der Wasserstoffwirtschaft vorzubeugen.

Die Sektoranalyse bildet den ersten Schritt im Forschungsverlauf des Projekts H2PRO am Bundesinstitut für Berufsbildung (BIBB). Ziel des Projekts ist es, im Sinne einer Früherkennung neue Kompetenzanforderungen und Qualifikationsbedarfe in Ausbildungsberufen entlang der Wasserstoff-Wertschöpfungskette zu identifizieren und Handlungsempfehlungen für politische und praxisunterstützende Akteure der Berufsbildung abzuleiten. Das Projekt knüpft an die Nationalen Wasserstoffstrategie (NWS) an, um die darin angestrebte „Weiterentwicklung der beruflichen [...] Aus- und Weiterbildung im Bereich der Wasserstofftechnologien“ (BMW i 2020, S. 25) zu unterstützen.

Folgende Fragen stehen im Mittelpunkt des Projekts:

1. Welche Ausbildungsberufe und Weiterbildungsstrategien sind auf der mittleren Fachkräfteebene für die Umsetzung der Nationalen Wasserstoffstrategie von besonderer Bedeutung?
2. Welche qualitativen Qualifikationsbedarfe werden voraussichtlich zusätzlich entstehen?
3. Sind die notwendigen Qualifizierungsinhalte bereits in ausreichendem Maß in den Ordnungsmitteln verankert?
4. Welche Empfehlungen für ordnungspolitische und praxisunterstützende Maßnahmen werden auf Grundlage der identifizierten Qualifizierungsbedarfe abgeleitet?

Das Projekt verfolgt ein qualitativ ausgerichtetes Forschungsvorgehen, welches über die Sektoranalyse hinaus leitfadengestützte Experteninterviews und arbeitsprozessorientierte Fallstudien umfasst. Die Sektoranalyse eröffnet einen strukturierten Zugang zum Forschungsfeld, indem sektorspezifische Strukturen und wasserstoffbezogene Veränderungen erörtert und auf „Dimensionen der Facharbeit“ (SPÖTTL 2005) hin beleuchtet werden. Auf diese Weise wird eine erste kontextbezogene Annäherung an die Veränderung von Arbeitsaufgaben und Qualifizierungsbedarfen in relevanten Ausbildungsberufen ermöglicht. Darüber hinaus trägt sie dazu bei, die weiteren Forschungsinstrumente zu präzisieren und Feldzugänge zu schaffen. Die Inhalte der Sektoranalyse basieren in erster Linie auf Literaturstudien sowie auf ersten Gesprächen mit Expert/-innen aus Verbänden, Wissenschaft und Unternehmen.

### **3 Verkehrsbedingte Emissionen und Antriebswende**

Der Verkehrssektor verursachte 2021 mit rund 148 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalenten 20% der Gesamtemissionen in Deutschland. Damit liegen die Verkehrsemissionen rund 3 Mio. Tonnen über dem im Bundesklimaschutzgesetz für 2021 angesetzten Zielwert (UMWELTBUNDESAMT 2022a). Von den 148 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub> entfallen rund 98 % auf den Straßenverkehr (UMWELTBUNDESAMT 2022b). Zwar konnten die spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen (Emissionen pro Verkehrsleistung) über die vergangenen Jahrzehnte gesenkt werden, allerdings werden diese Einsparungen durch die Steigerung des

Gesamtverkehrsaufkommens konterkariert. Das im Gesetz gesteckte Ziel für 2030 liegt bei 85 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub> (UMWELTBUNDESAMT 2022c).

In der Automobilindustrie konkretisiert sich der Wechsel von fossil-basierten hin zu alternativen Antrieben zunehmend. Mitte 2022 hat das EU-Parlament dem Gesetzesvorschlag zugestimmt, den Neukauf von Pkw mit Verbrennungsmotoren durch Absenkung der zulässigen Flottengrenzwerte ab 2035 zu beenden (EUROPEAN PARLIAMENT 2022). Batterieelektrische Pkw (BEV), deren Bestand im Januar 2023 bei knapp über einer Millionen Fahrzeuge lag (NOW GMBH 2023), werden den Fahrzeugmarkt perspektivisch dominieren. Die Elektrifizierung des Antriebs bringt einen tiefgreifenden Strukturwandel in der Fahrzeug- und Zulieferindustrie mit sich, der sich in einer deutlichen Veränderung von Produkten, Produktionstechnologien und -prozessen sowie in einer Reorganisation der Zulieferketten äußert.<sup>1</sup> Grund ist die Technologiewerschiebung von mechanischen hin zu elektronischen Komponenten und Systemen und die damit verbundene Verringerung der benötigten Teile im Antriebsstrang sowie die produktionstechnologischen Veränderungen in der Antriebsstrangproduktion (FRAUNHOFER IAO 2019). Begleitet wird die Antriebswende von einer zunehmenden Digitalisierung der Produktion und der Fahrzeuge selbst sowie einer Veränderung der Mobilitätskulturen im urbanen Raum (BOES/ZIEGLER 2021). Auch im Verkauf und Aftersales zeichnen sich durch die Elektromobilität sowie neue Geschäfts- und Vertriebsmodelle der Fahrzeughersteller (OEM, *Original Equipment Manufacturer*) deutliche Veränderungen ab (FRAUNHOFER IAO/IFA 2023). Innerhalb dieses Strukturwandels werden wasserstoffbasierte Antriebe weniger als Technologiekonkurrenz zu batterieelektrischen Antriebslösungen

---

<sup>1</sup> In der Antriebsstrangproduktion bedeutet die Reduktion der benötigten Teile einen deutlichen Rückgang der Beschäftigungsbedarfe und ein Marktrisiko für Zulieferunternehmen, die mit ihren Produkten stark auf den Verbrennungsmotor ausgerichtet sind (FRAUNHOFER IAO 2019; OLLE 2021). Die Branchenstruktur der Automobilindustrie ist durch einen hohen Differenzierungsgrad gekennzeichnet. Bei den Fahrzeugherstellern (OEM, *Original Equipment Manufacturer*) selbst werden nur rund 20 bis 30% der Gesamtwertschöpfung erbracht. Die Herstellung von Bauteilen, Komponenten und Systemen findet überwiegend in den Zulieferketten statt. An der Spitze der Zulieferketten stehen meist Systemzulieferer, die die Endhersteller direkt beliefern (sog. Tier-1-Zulieferer) und bei denen es sich meist um international aufgestellte Konzerne mit hohem Forschungs- und Entwicklungsanteil handelt. Ihnen nachrangig positioniert ist eine große Zahl an mittelständisch geprägten Zulieferunternehmen (sog. Tier-2- und Tier-3-Zulieferer) für unterschiedlichste Komponenten, Teile oder Vorprodukte (BRATZEL/RETTERATH/HAUKE 2015; DÖLLE 2013).

charakterisiert, sondern als Ergänzung in jenen Segmenten, in denen der Übergang zu emissionsfreien Antriebslösungen batterieelektrisch schwer umzusetzen ist (FRAUNHOFER IPT 2021).

## 4 Wasserstofftechnologien im Verkehrssektor

### 4.1 Wasserstoffbasierte Antriebslösungen

#### 4.1.1 PEM-Brennstoffzelle

Bei einer Brennstoffzelle handelt es sich um einen Energiewandler, in dem mittels chemischer Reaktion Strom erzeugt wird. Da die Brennstoffzelle einen E-Antrieb mit Strom versorgt, handelt es sich bei Brennstoffzellenfahrzeugen (FCEV, *Fuel Cell Electric Vehicle*) stets um Elektrofahrzeuge. Die unterschiedlichen Brennstoffzellentypen lassen sich anhand des Elektrolyten und des genutzten Brennstoffs unterscheiden. In den hier untersuchten Verkehrskontexten kommt ausschließlich die sog. PEM-Brennstoffzelle (PEMFC, *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell*) zum Einsatz, in der eine Polymermembran als Elektrolyt genutzt wird. Hauptbestandteile der PEM-Brennstoffzelle sind die Membran-Elektroden-Einheit (MEA), die die Elektroden, die katalysatorbeschichtete Membran (CCM, *Catalyst Coated Membrane*) sowie die Gasdiffusionsschichten (GDL, *Gas Diffusion Layer*) umfasst, und die Bipolarplatten (BPP, *Bipolar Plate*), über die die Reaktionsmedien befördert und die Elektronen in den Verbraucherstromkreis eingespeist werden (RWTH AACHEN/VDMA 2022). Vereinfacht gesprochen funktioniert eine PEM-Brennstoffzelle wie folgt: An der Anode wird der einströmende Wasserstoff in Elektronen und Wasserstoff-Protonen getrennt. Die Protonen wandern durch die nur für diese durchlässige Membran zur Kathode. Die Elektronen wandern über eine Leitung zur Kathode, in die ein Verbraucher geschaltet ist. An der Kathode wird Sauerstoff zugeführt, der sich dort mit den Wasserstoffprotonen verbindet. Der so entstehende Wasserdampf ist das einzige Endprodukt des Vorgangs.

Hauptkomponente des Brennstoffzellensystems ist der Brennstoffzellenstack, der aus mehreren in Serie verschalteten Brennstoffzellen besteht. Anzahl und Größe der verschalteten Brennstoffzellen variieren je nach Systemdesign und Leistungsanforderung. Die weiteren Subsysteme des Brennstoffzellensystems sind Luft-, Wasserstoff- und Kühlkreislauf (RWTH AACHEN/VDMA 2020; E-MOBIL BW 2021). FCEV lassen sich entlang zweier Systemvarianten klassifizieren: FC-dominant und Range-Extender. Beide umfassen die Hauptkomponenten Brennstoffzelle, Drucktanks und Lithium-Ionen-Batterie, unterscheiden sich aber in ihrer Funktionsweise und folglich in ihren Systemarchitekturen und Komponentendimensionen. In FC-dominanten Fahrzeugen fungiert die Brennstoffzelle als Hauptenergielieferant für den Elektromotor. In einer kleineren Lithium-Ionen-Batterie wird Strom aus der Brennstoffzelle sowie

die aus den Bremsvorgängen zurückgewonnene Energie (Rekuperation) zwischengespeichert. Bei Range-Extender-Systemen (FC-REX) handelt es sich um ein Batterie-dominantes Antriebssystem, in dem die Brennstoffzelle als Reichweite unterstützendes Ladesystem integriert ist. Entsprechend fallen Brennstoffzelle und Wasserstofftanks hier kleiner aus.

#### 4.1.2 Wasserstoffmotor

Neben der elektromobilen Variante durch Rückverstromung in der Brennstoffzelle kommt auch der Betrieb von Verbrennungsmotoren mit Wasserstoff als Antriebskonzept in Frage. Zwar ist die verbrennungsmotorische Nutzung von Wasserstoff lange bekannt und Hersteller haben vereinzelt Testfahrzeuge auf die Straße gebracht, eine Serienproduktion von Fahrzeugen mit Wasserstoffmotor existiert bislang aber nicht.

Wasserstoff wird als extrem zündbares Gas klassifiziert. Die minimale Zündenergie ist mit 0,02 mJ deutlich niedriger als bei anderen Brennstoffen. Zudem weist Wasserstoff mit Explosionsgrenzen von 4 bis 77 Vol.% einen sehr breiten Zündbereich auf.

Aufbau und Funktionsweise des Wasserstoffmotors sind dem konventionellen Verbrennungsmotor sehr ähnlich. Für den Betrieb mit Wasserstoff werden die Grundmotoren der konventionellen Verbrennungsmotoren übernommen. Anpassungsbedarfe bestehen u.a. bei Kolben und Kolbenringen, Ventilen und Ventilsitzringen, Luft- und Kraftstoffzuführung, Teilen des Zündsystems sowie beim Abgassystem und der Sensorik (NOW GMBH 2021b).

Der grundsätzliche Vorteil des Wasserstoffmotors ist, dass Systemwissen und Fehlererkennungsmethodik zu Verbrennungsmotoren umfassend vorhanden sind. Da der bestehende Antriebsstrang keiner fundamentalen Änderungen bedarf, kann auch auf bestehende Zulieferstrukturen zurückgegriffen werden. Darüber hinaus ist der Wasserstoffmotor im Gegensatz zur Brennstoffzelle weniger anfällig bei kleinen Verschmutzungen des Kraftstoffs und der angesaugten Luft (SCHRANK/LANGER/JACOBSEN 2021).

Ein zentraler Nachteil des Wasserstoffmotors sind die durch Schmierstoffe entstehenden CO<sub>2</sub>-Restemissionen sowie die im Verbrennungsprozess entstehenden Stickoxide, die allerdings durch Abgasnachbehandlung deutlich reduziert werden können. Insgesamt ermöglicht der Wasserstoffmotor eine CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktion von >98% gegenüber dem Dieselmotor (E-MOBIL BW 2021, S. 85). Weitere Kritikpunkte beziehen sich auf den geringeren Wirkungsgrad, die höhere mechanische Komplexität und

die höhere Lärmbelastung gegenüber der Brennstoffzelle (E-MOBIL BW 2021; SCHRANK/LANGER/JACOBSEN 2021).

### 4.1.3 eFuels

Als eFuels (*electrofuel*) oder auch „strombasierte Kraftstoffe“, werden synthetische, wasserstoffbasierte Substitute für fossile Kraftstoffe wie Benzin, Diesel oder Kerosin bezeichnet. Synthetische Kraftstoffe können in allen Verkehrsbereichen (Straßenverkehr bis Schiffs- und Flugverkehr) in regulären Verbrennungsmaschinen eingesetzt werden. Die Versorgung mit eFuels kann über das bestehende Tankstellen- und Pipelinetz erfolgen und der Transport über weite Strecken ist vergleichsweise unkompliziert (ÖKO-INSTITUT E.V. 2020). Ein wesentlicher Kritikpunkt an der Nutzung von eFuels ist, dass sie mit nur 13% den niedrigsten Gesamtwirkungsgrad (*Well-to-Wheel*) unter allen wasserstoff- und strombasierten Antriebslösungen aufweisen (AGORA ENERGIEWENDE/AGORA VERKEHRSWENDE 2018, S. 11).

## 4.2 Anwendungspotenziale

### 4.2.1 Pkw

Mit knapp über 2000 Fahrzeugen ist der Anteil von FCEV am Pkw-Bestand in Deutschland sehr gering (NOW GMBH 2022). In Branchendebatten besteht weitestgehend Konsens darüber, dass FC-Pkw auch in Zukunft nur eine Nischenrolle spielen werden. Die Dekarbonisierung des Pkw-Verkehrs wird in erster Linie über batteriebetriebene Fahrzeuge verlaufen, da diese einen deutlich höheren Wirkungsgrad aufweisen, grüner Wasserstoff in anderen Bereichen dringender benötigt wird und Entwicklungen in der Batterie- und Ladetechnik zunehmend Reichweiten ermöglichen, die für alltägliche Nutzungsmuster ausreichend sind (PLÖTZ u. a. 2022). Marktchancen für FC-Pkw bieten sich in jenen Segmenten, in denen hohe Reichweiten und kurze Tankzeiten von großer Relevanz sind (bspw. Taxi-Flotten oder andere kommerziell genutzte Fahrzeuge) sowie in weniger preissensiblen Segmenten der Ober- und Luxusklassen.

FC-Pkw werden in erster Linie von asiatischen Anbietern in Kleinserien angeboten. Zu nennen wären hier der Toyota Mirai oder der Hyundai Nexo. Europäische Hersteller sind hingegen zurückhaltend, was wasserstoffbezogene Entwicklungsaktivitäten für Pkw betrifft. Mercedes hat seinen Brennstoffzellen-Plug-in-Hybrid GLC F-Cell im Frühjahr 2020 vom Markt genommen (ADAC 2021). BMW plant mit dem iX5 Hydrogen aktuell eine FC-Kleinstserie zu Test- und Demonstrationszwecken (BMW GROUP 2022).

## 4.2.2 Schwerlasttransport

Anders als für Pkw oder leichte Nutzfahrzeuge sind die Anwendungspotenziale von FCEV im Schwerlasttransport höher. Batterieelektrische Lkw bieten im innerstädtischen oder regionalen Transportwesen mit begrenztem Fahrzeug- und Ladegewicht zwar eine emissionsfreie Alternative, sind in der Langstreckenlogistik aber nur begrenzt einsatzfähig. Nutzungsanforderungen wie z.B. hohe Reichweiten bei hoher Transportlast, internationale Fahrten, kurze Standzeiten und zusätzliche Energiebedarfe zur Warenkühlung, lassen sich mit batterieelektrischen Lkw nur schwer bedienen (PLÖTZ u. a. 2022; FRAUNHOFER IPT 2021). Der entscheidende Vorteil von FC-Lkw ist die kurze Betankungszeit von ca. 10 bis 20 Minuten bei gleichzeitig hoher Reichweite. Das vollständige Laden einer Lkw-Batterie kann dagegen je nach Kapazität und Ladeleistung mehrere Stunden dauern (TRANSPORT & ENVIRONMENT 2020).

Mit Hyundai und Hyzon bieten zwei OEM FC-Lkw in Europa an. Von den europäischen OEM planen Nikola und Iveco in einem Joint Venture die Serienproduktion von FC-Lkw ab 2023 (IVECO 2021). Daimler Truck und Volvo planen den Start der gemeinsamen Produktion für 2027 (DAIMLER TRUCK 2021). Alle OEM verfolgen dabei eine Doppelstrategie mit BEV- und FCEV-Modellen. RUF u. a. (2020, S. 170) sehen ein Potenzial von knapp 17% Neuverkaufsanteil für FC-Lkw am europäischen Markt für 2030. Inwieweit sich Wasserstoff im Schwerlastverkehr durchsetzen kann, wird von der Entwicklung der Batterie- und Schnellladetechnologie, vom Ausbau des Schnellladenetzes und des Lkw-tauglichen H<sub>2</sub>-Tankstellennetzes sowie von Kostendegressionen für Fahrzeuge und den benötigten Wasserstoff abhängen. Derzeit weisen Herstellerstrategien und Beschaffungsmaßnahmen auf eine steigende Zahl von FCEV im Schwerlasttransport in den kommenden Jahren hin.

## 4.2.3 ÖPNV-Busse

Mitte 2022 waren auf deutschen Straßen 95 Brennstoffzellenbusse im Einsatz. Die Beschaffung weiterer 550 Busse war zu dem Zeitpunkt bereits beschlossen (DEUTSCHER BRENNSTOFFZELLENBUS-CLUSTER 2022). Mit dem „Gesetz über die Beschaffung sauberer Straßenfahrzeuge“, welches die *Clean Vehicles Directive* der EU in deutsches Recht überführt, wurden 2021 verbindliche Beschaffungsquoten für emissionsarme und -freie Fahrzeuge bei der öffentlichen Auftragsvergabe sowie für Sektorenakteure (Verkehrsbetriebe, Stadtreinigung etc.) beschlossen, was den Wasserstoffhochlauf im ÖPNV entscheidend befördert (BUNDESMINISTERIUM FÜR DIGITALES UND VERKEHR 2022). Gerade für Verkehrsanbieter, die lange Strecken mit anspruchsvollerem Höhenprofil fahren, bieten FCEV aufgrund ihrer Reichweite von rund 300 – 450 km deutliche Vorteile gegenüber BEV (NOW GMBH 2021a). Zudem besitzen FC-Busse

durch die kurzen Tankzeiten eine höhere Verfügbarkeit und die H<sub>2</sub>-Tankinfrastruktur ist leichter zu errichten als die Ladeinfrastruktur für große Busflotten.

#### 4.2.4 Land- und Baumaschinen

Das Feld der Land- und Baumaschinen umfasst verschiedene Branchen, Arbeitsbereiche, Fahrzeugsegmente und anderweitige Maschinentypen. Von leichten Transport- über Feld- bis hin zu schwersten Bergbaufahrzeugen müssen alternative Antriebskonzepte entsprechenden Einsatzbedingungen gerecht werden. Neben dem Antrieb bestehen auch hohe Energiebedarfe für die sonstigen Arbeitsfunktionen und Anbaumaschinen der Fahrzeuge. Bislang lassen sich die Leistungsanforderungen großer Land- und Baumaschinen rein batterieelektrisch kaum bedienen (THUNEKE/REMMELE 2021). In der Landwirtschaft bspw. müssen nicht nur schwere Lasten transportiert werden, zu Erntezeiten sind auch Laufzeiten von bis zu 12 Stunden erforderlich. Ständiges zeitintensives Laden der Batterie ist dabei hinderlich. Zudem würden schwere Batterien das Problem der Bodenverdichtung durch Landmaschinen weiter erhöhen (VAN LEEUWEN 2020). Neben der Brennstoffzelle kommt auch dem Wasserstoffmotor im Feld der Land- und Baumaschinen eine große Aufmerksamkeit zu. Zusätzlich zu einem besseren Ansprechverhalten, spielt dabei auch die bessere Einsatzfähigkeit in sehr kalten oder staubigen Umgebungen eine Rolle (SCHRANK/LANGER/JACOBSEN 2021; LIEBHERR 2022).

#### 4.2.5 Flurförderfahrzeuge

Auch bei Flurförderfahrzeugen wird Wasserstoff zunehmend berücksichtigt. In Logistikzentren und der Werkslogistik werden bereits vereinzelt Gabelstapler mit Brennstoffzellenantrieb eingesetzt (bspw. LIDL in Nates, BMW in Leipzig). Die Vorteile der Brennstoffzelle für Gabelstapler liegen v.a. in der Verfügbarkeit, welche durch kurze Tankzeiten maximiert wird. Ein Tankvorgang dauert bis zu drei Minuten, was den Antrieb bei hoher Auslastung, hoher Umschlaghäufigkeit oder bei Mehrschichtbetrieb attraktiv macht. Wirtschaftlich gesehen, lohnt sich der Einsatz von FC-Gabelstaplern mit zunehmender Stapleranzahl sowie bei bereits vorhandener Wasserstoffinfrastruktur für andere Produktionsbereiche. Da Brennstoffzellenantriebe nur eine Zapfsäule benötigen, fallen u.a. die Flächennutzungskosten für Batterielade- und Batteriewechselstationen weg (PRODUKTION 2022; GÜNTHER/MICHAELI 2015).

### 4.3 Tankinfrastruktur

Die Tankinfrastruktur ist die zentrale Voraussetzung für den Markthochlauf von Wasserstofffahrzeugen. Unterscheiden lässt sich nach öffentlichen Tankstellen und jenen auf Betriebshöfen oder in Depots. In Deutschland gibt es aktuell über 90 öffentliche H<sub>2</sub>-Tankstellen. Bislang werden

wasserstoffbetriebene Fahrzeuge ausschließlich mit 350 oder 700 bar komprimiertem gasförmigem Wasserstoff betankt (CGH<sub>2</sub>, *Compressed Gaseous Hydrogen*). Durch Abkühlung auf -253 Grad soll perspektivisch auch die Nutzung von flüssigem Wasserstoff (LH<sub>2</sub>, *Liquified Hydrogen*) möglich sein. Im Pkw-Bereich hat sich eine Verdichtung mit 700 bar als Standard etabliert. Nutzfahrzeuge werden i.d.R. noch mit 350 bar CGH<sub>2</sub> betankt, allerdings werden auch hier 700 bar angestrebt.<sup>2</sup> Der weit überwiegende Teil der öffentlichen H<sub>2</sub>-Tankstellen in Deutschland bietet 700 bar an und kann daher noch nicht für die Lkw-Betankung genutzt werden. Eine dritte Option bietet kryo-komprimierter Wasserstoff (CCH<sub>2</sub>). Der Wasserstoff wird dabei auf -240 Grad abgekühlt und bei mind. 300 bar verdichtet. CCH<sub>2</sub> ermöglicht zwar die höchste volumetrische Energiedichte (2,4 kWh/l) unter den Speicheroptionen, befindet sich aber in einem sehr jungen Entwicklungsstadium und bringt hohe Herausforderungen hinsichtlich Anlagentechnik und Materialbedarf mit sich (H2MOBILITY 2021).

Verglichen mit herkömmlichen Tankstellen für Benzin oder Diesel sind H<sub>2</sub>-Tankstellen umfangreicher und komplexer. Grundsätzlich ist zu unterscheiden, ob die Tankstellen durch angeschlossene Wasserstoffherzeugung de-zentral (*on-site*) versorgt werden oder die Versorgung über Wechseltrailer oder Pipelines erfolgt (*off-site*). Je nach Versorgungssystem und Auslegung umfasst das Tankstellengesamtsystem unterschiedliche Baugruppen und Komponenten. Im Falle von 700 bar CGH<sub>2</sub> werden bspw. Nieder- und Hochdruckspeicher, Kompressoren, Kühler und Zapfanlage benötigt (EHRET 2020; H2MOBILITY 2021). Hinzu kommt, dass H<sub>2</sub>-Tankstellen über mehr sensorik- und softwarebasierte Funktionen verfügen als herkömmliche Tankanlagen. Durch die Integration von Wasserstoffproduktion und Betankungsanlage bietet sich im Verkehrssektor das Potenzial zur Sektorenkopplung auf vergleichsweise kleinem Raum.

## 5 Tätigkeitsbereiche, Aufgabencluster und Berufe entlang der Wertschöpfungsketten

Folgende Tätigkeitsbereiche der Wasserstoffmobilität sind von besonderem Interesse: Produktion von Brennstoffzellensystemen und Fahrzeugen, Bedienen der Fahrzeuge, Warten und Instandsetzen der Fahrzeuge sowie technische Arbeiten an der Tankinfrastruktur. Sofern notwendig werden zudem

---

<sup>2</sup> Mit 350 bar CGH<sub>2</sub> weist mit 0,8 kWh/l die geringste volumetrische Energiedichte unter den vier Speicheroptionen auf. 700 bar CGH<sub>2</sub> verfügt über eine volumetrische Energiedichte von 1,3 kWh/l.

indirekt involvierte Tätigkeitsfelder und Berufsgruppen wie bspw. Sicherheits- und Rettungskräfte berücksichtigt.

## 5.1 Brennstoffzellen- und Fahrzeugproduktion

Die Produktion des Brennstoffzellen- und Tanksystems findet überwiegend bei Unternehmen der Zulieferketten statt.<sup>3</sup> Wichtige Schritte im Produktionsprozess der Membran-Elektrolyt-Einheit (MEA) der Brennstoffzelle sind bspw. das Herstellen der Katalysatorlegierung, das Beschichten und Trocknen der Membran sowie das Fügen und Konfigurieren der MEA. In der anschließenden Stackfertigung werden mehrere hundert Brennstoffzellen zusammengefügt und der Stack final getestet. Ein brancheneinheitlicher Produktionsprozess für die Herstellung der Brennstoffzelle und des Brennstoffzellenstacks besteht bisher nicht. Genutzte Materialien und produktionstechnologische Verfahren können sich je nach Hersteller und Anwendungskontext unterscheiden (FÜHREN u. a. 2022; NOW GMBH/FRAUNHOFER IPT 2022a; 2022b). Zudem dominieren in der Brennstoffzellenfertigung bislang flexibel anpassbare Produktionsprozesse mit vergleichsweise kleinen Produktionsvolumina (SIEBEL 2022). Abzuwarten bleibt, welche Produktionsprozesse und Zulieferstrukturen sich mit fortschreitender Marktentwicklung herausbilden.

Eine Auswertung der Stellenanzeigen entsprechender Unternehmen zeigt, dass für Aufbau, Inbetriebnahme, Wartung und Reparatur von Brennstoffzellensystemen bevorzugt Elektroniker/-innen und Mechatroniker/-innen gesucht werden. Bei Automobilzulieferern dürften zudem Kfz-Mechatroniker/-innen bereits an der Herstellung von Brennstoffzellensystemen beteiligt sein, bspw. für die Arbeit in Entwicklungswerkstätten. In einer ersten Untersuchung zu Qualifikationsbedarfen in der Brennstoffzellenproduktion betont Dispan (2013, S. 40), dass Hochvoltkompetenzen erst ab Inbetriebnahme der Brennstoffzellensysteme erforderlich sind. In einer Auflistung relevanter Kenntnisse werden neben Hochvolttechnik u.a. Grundlagen zu Elektrochemie, Druckgasanlagen, Verschraubungstechnik und sowie Kenntnisse zu Materialien, Sensorik und Sicherheitsvorkehrungen bzw. Brand- und Explosionsschutz genannt (ebd.).

In der Fahrzeugproduktion ist ebenfalls zwischen vor und nach Inbetriebnahme der Fahrzeuge zu unterscheiden. Laut Dispan (2013, S. 41) ergeben sich für Beschäftigte an den Montagelinien vor Inbetriebnahme „keine prinzipiell neuen Anforderungen“ (Expertenaussage zit. in ebd.), hier wurden zum

---

<sup>3</sup> Wie im Fall von Toyota kann der Brennstoffzellenstack auch vom OEM gefertigt werden.

Erhebungszeitpunkt Sicherheitsunterweisungen zu Hochvolt, Brennstoffzelle und Druckbehältern durchgeführt. Für Arbeiten ab Inbetriebnahme der Fahrzeuge wurden umfassendere Wasserstoff-Weiterbildungen implementiert (ebd.). Im weiteren Projektverlauf bleibt zu prüfen, welche Kompetenzanforderungen mit welchen Schritten entlang der Produktionsketten von Brennstoffzellensystemen und Fahrzeugen verbunden sind und welche Qualifizierungsbedarfe in den beteiligten Berufsbildern konkret bestehen.

## **5.2 Arbeiten an und mit Wasserstofffahrzeugen**

### **5.2.1 Berufliche Veränderungen in der Elektromobilität**

Da es sich bei Brennstoffzellenfahrzeugen um Elektrofahrzeuge mit Gassystem handelt, lohnt es sich zunächst einen Blick auf berufsbezogene Veränderungen in der Elektromobilität zu werfen. Zentrales Aufgabenfeld für Kfz-Fachkräfte in der Elektromobilität ist der Umgang mit Hochvoltsystemen. Elektrische Antriebe arbeiten mit Spannungen bis zu 1000 Volt, wohingegen Verbrennerfahrzeuge nur mit 12- bzw. 48-Volt-Bordnetzen ausgestattet sind (KOHL 2018a). Fachkräfte in Wasserstoff-Werkstätten benötigen daher ebenfalls Fachkundenachweise für Fahrzeuge mit Hochvoltantrieb. Die Arbeit an Hochvoltsystemen erfordert u.a. elektro- und messtechnisches Grundlagenwissen, Kenntnisse über Gefahrenpotenziale und deren Vermeidung, Fertigkeiten wie die Durchführung von Analysen, Fehlersuchen und Messungen sowie die Beurteilung von Messergebnissen und das Ein- und Ausbauen von Komponenten des Hochvoltsystems (BECKER 2018, 44f.; KOHL 2018a, S. 79). Kohl (2018b, S. 26) fasst zusammen, dass im Vergleich zu bisher in Kfz-Berufen überwiegenden „mechanischen und visuell gesteuerten Arbeiten“, die Elektromobilität ein „inhaltlich wesentlich abstrakteres Aufgabengebiet“ darstellt, „das aufgrund seines hohen Gefahrenpotenzials eine neue, besonders sicherheitsrelevante elektrotechnische Denk- und Arbeitsweise [...] erfordert.“ Mit der 2013 erfolgten Neuordnung des Berufs „Kraftfahrzeugmechatroniker/in“ wurden Qualifizierungsinhalte für die Arbeit an Hochvoltsystemen in den Ordnungsmitteln der Ausbildung verankert. Mit dem Schwerpunkt „Hochvolt- und Systemtechnik“ wurde zudem eine Spezialisierungsmöglichkeit für die Elektromobilität geschaffen (BECKER 2018; BIBB 2013). Für die überbetriebliche Lehrlingsunterweisung (ÜBL) wurde ein Lehrgang entworfen, der für alle fünf Ausbildungsschwerpunkte der Kfz-Mechatroniker/-innen relevante Hochvoltinhalte umfasst (SYHA 2016).

## 5.2.2 Arbeiten an Wasserstofffahrzeugen

Arbeiten an Wasserstofffahrzeugen finden in Entwicklungs- und Servicewerkstätten, Test- und Prüfständen oder wie im Fall der Land- und Bautechnik vor Ort auf dem Feld oder der Baustelle statt. Zu unterscheiden ist zwischen allgemeinen Arbeiten am Fahrzeug (außerhalb des Gassystems) sowie in dessen Umfeld und Arbeiten am Gassystem. Zentrale Berufe für die Arbeit an den Antriebssystemen von Wasserstofffahrzeugen sind Kfz-Mechatroniker/-innen, Land- und Baumaschinenmechatroniker/-innen sowie Karosserie- und Fahrzeugbaumechaniker/-innen.<sup>4</sup> Darüber hinaus bestehen weitere fahrzeugtechnische Ausbildungsberufe wie bspw. Metallbauer/-innen für Nutzfahrzeugtechnik oder Fahrzeuglackierer/-in. Diese sind allerdings nicht auf die Arbeit an Antriebssystemen hin ausgelegt. Typische Wartungs- und Instandsetzungsarbeiten am Brennstoffzellen- und Tanksystem sind Leckagen-, Dichtheits- und Funktionsprüfungen, Entleerung und Spülung der Systeme, Diagnoseverfahren sowie Ein- und Ausbau von Komponenten und Teilsystemen (für einen ersten Überblick zu Wartungs- und Instandsetzungsarbeiten an FC-Bussen siehe BECKER 2006).

Grundsätzlich sind Sicherheitsaspekte bei Arbeiten an und mit wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen sowie in deren Umfeld zu betonen. Wasserstoff verfügt über einen breiten Zündbereich von 4 bis 77 Vol.% und bedarf einer minimalen Zündenergie von 0,02 mJ. Hinzu kommen Verletzungsgefahren durch hohe Drücke in den Leitungen des Brennstoffzellen- und Tanksystems. Im Fall von flüssigem Wasserstoff besteht zudem ein Gefährdungspotenzial durch die tiefkalte Temperatur von -253 Grad. Bei der Arbeit an FCEV sind zudem die bereits erwähnten Gefährdungspotenziale im Umgang mit Hochvoltssystemen zu beachten (DGUV 2021). An dieser Stelle wird häufig auf Erdgasfahrzeuge verwiesen, die im Fahrzeugbestand bereits etabliert sind. Allerdings handelt es sich dabei um Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor, die sich grundlegend von Brennstoffzellenfahrzeugen unterscheiden. Zudem weist CNG (*Compressed Natural Gas*) ein anderes Stoffverhalten als Wasserstoff auf.

Die Arbeit an Brennstoffzellenfahrzeugen macht auch eine neue Werkstattausstattung und -organisation erforderlich. Arbeitsplätze an denen Wasserstoff freigesetzt werden kann, erfordern Vorrichtungen zum Explosionsschutz, wie bspw. Wasserstoffsensoren und Lüftungsanlagen, insbesondere da Wasserstoff geruchs- und farblos ist und auch farblos verbrennt. Zudem bedarf es neuer Werkzeuge

---

<sup>4</sup> Zu erwähnen ist, dass hier nur aktuell bestehende Berufsbilder bzw. -bezeichnungen genannt werden. Berufe, die im Zuge von Neuordnungen umbenannt oder mit anderen Berufen zusammengefasst wurden, werden nicht betrachtet.

und Arbeitsgeräte. In Werkstätten für Nutzfahrzeuge sind meist Deckenarbeitsstände und Deckenkräne erforderlich, bspw. weil sich die Wasserstofftanks bei Bussen auf dem Dach befinden (EE ENERGY ENGINEERS/BBH CONSULTING n.d., S. 51).

<b>Relevante Berufe für Arbeiten an den Antriebssystemen von Wasserstofffahrzeugen</b>	
<b>Beruf</b>	<b>Relevante Berufsbildpositionen</b>
Kraftfahrzeugmechatroniker/in – Schwerpunkte Personenkrafttechnik, Nutzfahrzeugtechnik, System- und Hochvolttechnik, Karosserietechnik	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Außer Betrieb nehmen und in Betrieb nehmen von fahrzeugtechnischen Systemen</li> <li>• Messen und Prüfen an Systemen</li> <li>• Durchführen von Service- und Wartungsarbeiten</li> <li>• Diagnostizieren von Fehlern und Störungen an Fahrzeugen und Systeme</li> <li>• Demontieren, Reparieren und Montieren von Bauteilen, Baugruppen und System</li> <li>• Aus-, Um- und Nachrüsten von Fahrzeugen</li> </ul>
Karosserie- und Fahrzeugbaumechaniker/in – Fachrichtungen Karosserie- und Fahrzeugbautechnik, Karosserieinstandhaltungstechnik (z. Z. in Neuordnung)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Außerbetriebnehmen und Inbetriebnehmen von fahrzeugtechnischen Systemen</li> <li>• Messen und Prüfen an Systemen</li> <li>• Durchführen von Instandhaltungs- und Wartungsarbeiten</li> <li>• Diagnostizieren von Fehlern und Störungen an Fahrzeugen und Systemen</li> <li>• Instandsetzen von Fahrzeugen und Fügen von Fahrzeugteilen</li> </ul>
Land- und Baumaschinenmechatroniker/in	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Warten, Prüfen und Einstellen von Fahrzeugen und Systemen sowie von Betriebseinrichtungen</li> <li>• Montieren, Demontieren und Instandsetzen von Bauteilen, Baugruppen und Systemen</li> <li>• Instandsetzen von Fahrzeugen, Systemen und Betriebseinrichtung</li> <li>• Prüfen von Abgasen und Einrichtungen zur Emissionsminderung</li> </ul>

Tabelle 1: Relevante Berufe für Arbeiten an Antriebssystemen von Wasserstofffahrzeugen; eigene Darstellung

### 5.2.3 Betrieb von Wasserstofffahrzeugen

Der Betrieb von Wasserstofffahrzeugen findet in unterschiedlichsten betrieblichen und beruflichen Kontexten statt. Ausbildungsberufe, die auf den Fahrzeugbetrieb hin ausgerichtet sind und die bereits vereinzelt mit Brennstoffzellenfahrzeugen in Berührung kommen, sind Berufskraftfahrer/-innen oder

Fachkräfte im Fahrbetrieb. Beschäftigte, die Wasserstofffahrzeuge betreiben, erhalten in der Praxis häufig Unterweisungen, die v.a. Gefahrenkenntnisse zu brennbaren und unter Druck stehenden Gasen, Erkennungsmerkmale und spezifische Eigenschaften von Fahrzeugen sowie den bestimmungsgemäßen Gebrauch und das Nachfüllen von Betriebsstoffen umfassen (DGUV FBHM-099).

<b>Ausbildungsberufe für den Fahrzeugbetrieb</b>	
<b>Beruf</b>	<b>Relevante Berufsbildpositionen</b>
Berufskraftfahrer/in	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Arbeit</li> <li>• Kontrollieren, Warten und Pflegen der Fahrzeuge</li> <li>• Vorbereiten und Durchführen der Beförderung</li> <li>• Betriebliche Planung und Logistik</li> </ul>
Fachkraft im Fahrbetrieb	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Arbeit</li> <li>• Betriebssicherheit und Einsatzbereitschaft der Fahrzeuge und Anlagen</li> <li>• Verkehrssicherheit und Führen von Fahrzeugen im öffentlichen Verkehrsraum</li> </ul>

Tabelle 2: Ausbildungsberufe für den Fahrzeugbetrieb; eigene Darstellung

### 5.3 Arbeiten an Wasserstofftankanlagen

Tätigkeiten von Fachkräften, die mit der technischen Arbeit an H<sub>2</sub>-Tankstellen betraut sind, umfassen das Errichten und die Inbetriebnahme der Anlagen, ihr Monitoring und regelmäßige Prüfungen sowie die Wartung und Instandsetzung bzw. Fehlerbehebung. Wie zuvor erwähnt, sind H<sub>2</sub>-Tankanlagen umfangreicher und komplexer als herkömmliche Tankstellen, da sie mehr Baugruppen sowie sensorik- und softwarebasierte Funktionen umfassen. H<sub>2</sub>-Tankanlagen erfordern daher Kenntnisse und Fertigkeiten in den Bereichen Mechanik, Elektronik und IT. Erste Gespräche zeigen, dass für Wartungs- und Instandsetzungsarbeiten bevorzugt Mechatroniker/-innen und Elektroniker/-innen eingestellt werden. Dabei werden auch vermehrt Fachkräfte auf Techniker- und Meisterebene gesucht. Mit der Qualifizierung für die Tankanlagen erhalten die Beschäftigten u.a. Schulungen zu Gasdruckanlagen und Explosionsschutz. Auch Fahrer/-innen, die im Fall einer Anlieferungsversorgung der Tankstellen den Wasserstofftransport übernehmen, müssen speziell geschult werden (H2SKILLS 2022, S. 33).

## 6 Schulungs- und Weiterbildungsangebote als Indikator für Qualifikationsbedarfe und -strategien

Für Arbeiten an Brennstoffzellenfahrzeugen sind Fachkundenachweise<sup>5</sup> für Hochvolt- und für Gassysteme erforderlich. Erste Qualifizierungsbedarfe lassen sich daran erkennen, dass Fahrzeughersteller, Zulieferer und vereinzelte Werkstätten Teile ihres Personals schulen und sich ein Weiterbildungsmarkt formiert. Mit Blick auf Schulungsinhalte, -umfänge und Zertifikate ist zu unterscheiden, ob die Personen allgemeine Arbeiten am Fahrzeug oder in dessen Umfeld ausführen oder am Gassystem selbst tätig sind. Unabhängig der jeweiligen Tätigkeit und Qualifizierung werden grundlegende Sensibilisierungen zu Eigenschaften und Stoffverhalten von Wasserstoff in der Praxis als besonders relevant erachtet.

Für die angebotenen Schulungen werden i.d.R. die Qualifizierungsstufen der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV), die auf Grundlage sicherheitstechnischer Beurteilungen definiert werden, als Referenzrahmen genutzt. Qualifizierungen zur fachkundigen Person für Fahrzeuge mit Gasantrieben werden in der Informationsschrift DGUV FBHM-099 geregelt.<sup>6</sup> Differenziert wird nach vier Qualifizierungsstufen und nach Arbeitskontext: E bis 3E für Entwicklung und Fertigung; S bis 3S für Aftersales-/Servicebetriebe. Zur Arbeit am Gassystem ist mindestens die Stufe 2E/2S erforderlich.<sup>7</sup> Das 2S-Niveau kann auch durch eine Schulung zur Gasanlagenprüfung (GAP) erreicht werden. Da sich das derzeitige Schulungsangebot nach DGUV noch überwiegend an Beschäftigte in Entwicklung und Produktion richtet, werden Fachkräfte in Servicewerkstätten aktuell meist über eine GAP-Schulung und (falls notwendig) entsprechende Hochvoltschulungen qualifiziert. Hochvoltschulungen sind für Kfz-Mechatroniker/-innen dann erforderlich, wenn die Ausbildung vor der Neuordnung des Berufs 2013 begonnen wurde. Zusätzlich erhalten Fachkräfte spezifische Produkt- bzw. Herstellerschulungen. Erste Gespräche mit Praxisakteuren zeigen, dass in manchen Werkstätten noch eine Unsicherheit bzw. Unwissenheit

---

<sup>5</sup> Fachkundig ist nach Betriebssicherheitsverordnung § 2 Abs. 5, „wer zur Ausübung einer in dieser Verordnung bestimmten Aufgabe über die erforderlichen Fachkenntnisse verfügt. Die Anforderungen an die Fachkunde sind abhängig von der jeweiligen Art der Aufgabe. Zu den Anforderungen zählen eine entsprechende Berufsausbildung, Berufserfahrung oder eine zeitnah ausgeübte entsprechende berufliche Tätigkeit. Die Fachkenntnisse sind durch Teilnahme an Schulungen auf aktuellem Stand zu halten.“

<sup>6</sup> Fachkundenachweise für Hochvoltssysteme werden in der DGUV INFORMATION 209-093 geregelt.

<sup>7</sup> Das Qualifizierungssystem nach DGUV ist nicht verpflichtend anzuwenden. Eine Akkreditierung oder Qualitätssicherung der Kursangebote seitens der Berufsgenossenschaften/DGUV findet nicht statt.

hinsichtlich notwendiger Schulungen und Zertifikate besteht, und dass Orientierungshilfen gewünscht werden.

Qualifizierungsstufen der DGUV		
Stufe	Befähigung	Voraussetzung
E bzw. S	Bedienen von Fahrzeugen mit Gasantrieb	Keine
1E/1S	Arbeiten an Fahrzeugen mit Gasantrieb (außer Gassystem)	Keine
2E/2S	Arbeiten am Gassystem	2E: mind. techn. Berufsausbildung oder techn. Studium
		2S: mind. Kfz-Berufsausbildung
3E/3S	3E: Aufbau und Änderung von Gassystemen	3E: min. techn. Berufsausbildung oder techn. Studium
	3S: Nachrüsten von Gassystemen	3S: mind. Kfz-Meister

Tabelle 3: Qualifizierungsstufen nach DGUV FBHM-099; eigene Darstellung.

Ein Blick auf die bestehenden Kursangebote zeigt, dass im Rahmen einer Schulung für die Qualifizierungsstufe 2E u. a. Inhalte zu Funktionen des Gassystems, Stoffeigenschaften, Explosionsschutz und Arbeitssicherheit sowie zu Montage-, Prüf- und Instandsetzungsarbeiten an Gasanlagen, Verbindungstechniken, Fehlersuchen, Prozessentwicklungen und rechtlichen Grundlagen vermittelt werden (WBZU n.d.).

## 7 Diskussion und weiterer Forschungsbedarf

In der Politik wird intensiv an den Weichenstellungen für den Wasserstoffhochlauf in unterschiedlichen Branchen gearbeitet. Während die Zeithorizonte für den Hochlauf industrieller Wasserstoffanwendungen weiter gefasst sind, deuten aktuelle Beschaffungsmaßnahmen, gesetzliche Vorgaben und Herstellerstrategien auf eine dynamische Entwicklung von Brennstoffzellenfahrzeugen in den kommenden Jahren hin. Für Fachkräfte, die an den Fahrzeugen und deren Antriebssystemen arbeiten, bringt der Markthochlauf zusätzliche Qualifizierungsbedarfe mit sich, die derzeit über einen wachsenden Weiterbildungsmarkt gedeckt werden. Neben Qualifikationen für Hochvoltsysteme, die seit einigen Jahren in der Ausbildung für Kraftfahrzeugmechatroniker/-innen und Karosserie- und Fahrzeugbaumechaniker/-

innen verankert sind, müssen Fachkräfte für die sichere Handhabung von Gashochdrucksystemen qualifiziert werden und benötigen spezifische Stoff-, Gefahren- und Systemkenntnisse.

Im weiteren Projektverlauf ist zu prüfen, ob aus dem neuen Aufgabenfeld der Wasserstofftechnologien ordnungsrelevante Anpassungsbedarfe in einzelnen Ausbildungsberufen resultieren. Zu diesem Zweck sind Arbeitsaufgaben und Tätigkeitsstrukturen entlang der Herstellung, Nutzung und Instandsetzung von Fahrzeugen und Tankinfrastrukturanlagen näher zu beleuchten. Zu bemerken ist, dass Ausbildungsordnungen i.d.R. technologieoffen formuliert sind, der Verweis auf spezifische Technologien in manchen Fällen aber notwendig sein kann. Die Technologieoffenheit der Ausbildungsordnungen bedeutet allerdings auch, dass Qualifizierungsbedarfe in der betrieblichen Praxis nicht immer einen Anpassungsbedarf auf Ordnungsebene nach sich ziehen. Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass kein neues Berufsbild speziell für Wasserstoff benötigt wird (ZINKE 2022). Für den Fahrzeugbereich ist davon auszugehen, dass in vielen Berufen, die nicht direkt mit dem Gassystem in Berührung kommen oder die im Umfeld der Fahrzeuge arbeiten, zwar Schulungen zu sicherheitsrelevanten Aspekten oder grundlegende Sensibilisierungen benötigt werden, es aber keiner Anpassung der Ordnungsmittel bedarf. Zu prüfen sind aber jene Berufe, die an den Antriebssystemen der Fahrzeuge arbeiten. Als Beispiel lässt sich der Beruf „Kraftfahrzeugmechatroniker/in“ hervorheben. Dieser wird sich mit fortschreitender Elektrifizierung der Fahrzeugantriebe aller Voraussicht nach weiter wandeln. Da die Zahl wasserstoffbetriebener Fahrzeuge zunehmen wird, ist der Frage nachzugehen, ob im Zuge künftiger Berufsanpassungen auch die Verankerung von Wasserstoff-relevanten Inhalten und notwendigen Zertifikaten in der Ausbildung sinnvoll ist. Über Ordnungsfragen hinaus sind Umsetzungsaspekte zu diskutieren. Interessant ist dabei, wie sich das Thema Wasserstoff in Lernorte der Aus- und Weiterbildung integrieren lässt und welche Erfahrungen aus Pilotprojekten gewonnen werden können, um den Kompetenzaufbau zu unterstützen.

## 8 Literaturverzeichnis

ACATECH (Hrsg.); LEOPOLDINA (Hrsg.); UNION DER DEUTSCHEN AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN (Hrsg.): Optionen für den Import grünen Wasserstoffs nach Deutschland bis zum Jahr 2030. Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft. München 2022. URL: [https://www.acatech.de/publikation/wasserstoff/#:~:text=Der%20Bedarf%20an%20Wasserstoff%20und,etwa%20400%E2%80%93700%20Terawattstunden%20liegen. \(Stand: 03.10.2022\)](https://www.acatech.de/publikation/wasserstoff/#:~:text=Der%20Bedarf%20an%20Wasserstoff%20und,etwa%20400%E2%80%93700%20Terawattstunden%20liegen. (Stand: 03.10.2022))

ADAC (Hrsg.): Mercedes GLC F-Cell: So kam das Aus für die Wasserstoff-Brennstoffzelle 2021. URL: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/marken-modelle/mercedes-benz/mercedes-glc-fuel-cell/> (Stand: 05.01.2023)

AGORA ENERGIEWENDE/AGORA VERKEHRSWENDE (Hrsg.): Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe. Berlin 2018. URL: [https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2017/SynKost\\_2050/Agora\\_SynCost-Studie\\_WEB.pdf](https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2017/SynKost_2050/Agora_SynCost-Studie_WEB.pdf) (Stand: 10.11.2022)

AGORA ENERGIEWENDE/WUPPERTAL INSTITUT (Hrsg.): Klimaneutrale Industrie: Schlüsseltechnologien und Politikoptionen für Stahl, Chemie und Zement. Berlin 2019. URL: [https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2018/Dekarbonisierung\\_Industrie/164\\_A-EW\\_Klimaneutrale-Industrie\\_Studie\\_WEB.pdf](https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2018/Dekarbonisierung_Industrie/164_A-EW_Klimaneutrale-Industrie_Studie_WEB.pdf) (Stand: 27.10.2021)

ARIADNE (Hrsg.): Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045. Szenarien und Pfade im Modellvergleich. Potsdam 2021. URL: [https://ariadneprojekt.de/media/2022/02/Ariadne\\_Szenarienreport\\_Oktober2021\\_corr0222.pdf](https://ariadneprojekt.de/media/2022/02/Ariadne_Szenarienreport_Oktober2021_corr0222.pdf) (Stand: 04.10.2022)

BECKER, Matthias: Veränderter Qualifizierungsbedarf für Kfz-Mechatroniker/innen durch Elektromobilität. In: GOTH, Günther C.; KRETSCHMER, Susanne; PREIFFER, Iris (Hrsg.): Auswirkungen der Elektromobilität auf die betriebliche Aus- und Weiterbildung. Bielefeld 2018, S. 33-49

BECKER, Matthias: Wartung und Instandsetzung von Brennstoffzellenfahrzeugen als Gegenstand beruflichen Lernens. In: lernen & lehren 21 (2006) 81, S. 14-20

BIBB (Hrsg.): Verordnung über die Berufsausbildung zum Kraftfahrzeugmechatroniker und zur Kraftfahrzeugmechatronikerin. Bonn 2013. URL: [https://www.bibb.de/dienst/berufesuche/de/index\\_berufesuche.php/profile/apprenticeship/nh324578](https://www.bibb.de/dienst/berufesuche/de/index_berufesuche.php/profile/apprenticeship/nh324578) (Stand: 09.11.2022)

BMW GROUP (Hrsg.): BMW Group produziert Brennstoffzellensysteme 2022. URL: <https://www.bmw-group.com/de/news/allgemein/2022/FuelCell.html> (Stand: 08.11.2022)

BMW i (Hrsg.): Die Nationale Wasserstoffstrategie 2020. URL: [https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?__blob=publicationFile) (Stand: 29.04.2022)

BOES, Andreas; ZIEGLER, Alexander: Umbruch in der Automobilindustrie. Analyse der Strategien von Schlüsselunternehmen an der Schwelle zur Informationsökonomie. München 2021. URL: <https://www.isf-muenchen.de/wp-content/uploads/2021/06/Forschungsreport-Umbruch-in-der-Automobilindustrie.pdf>

BRATZEL, Sefan; RETTERATH, Gerd; HAUKE, Niels: Automobilzulieferer in Bewegung. Strategische Herausforderungen für mittelständische Unternehmen in einem turbulenten Umfeld. Baden-Baden 2015

BUNDESMINISTERIUM FÜR DIGITALES UND VERKEHR (Hrsg.): Gesetz über die Beschaffung sauberer Straßenfahrzeuge 2022. URL: <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/clean-vehicles-directive.html> (Stand: 25.07.2022)

BUNDESREGIERUNG (Hrsg.): Generationenvertrag für das Klima 2022. URL: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/klimaschutzgesetz-2021-1913672#:~:text=Klimaschutzgesetz%20Generationenvertrag%20f%C3%BCr%20das%20Klima,65%20Prozent%20gegen%C3%BCber%201990%20sinken.> (Stand: 20.12.2022)

DAIMLER TRUCK (Hrsg.): Zukunftssicher, nachhaltig und flexibel: Mercedes-Benz Werk Wörth stellt Weichen für die künftige Serienproduktion von batterieelektrischen und Brennstoffzellen-Lkw 2021. URL: <https://media.daimlertruck.com/marsMediaSite/de/instance/ko/Zukunftssicher-nachhaltig-und-flexibel-Mercedes-Benz-Werk-Woerth-stellt-Weichen-fuer-die-kuenftige-Serienproduktion-von-batterie-elektrischen-und-Brennstoffzellen-Lkw.xhtml?oid=50769681&ls=L2RIL2luc3RhbmNIL2tvLnhodG1sP29pZD05MjY1NzgyJnJlbElkPTYwODI5JmZyb21PaWQ9OTI2NTc4MiZyZXN1bHRJbmZvVHlwZUIkPTQwNjI2JnZpZXdUeXBIPXRodW1icyZzb3J0RGVmaW5pdGlvbj1QVUJMSVNIRURfQVQtMiZ0aH-VtYINjYWxlSW5kZXg9MSZyb3dDb3VudHNJbmRleD01JmZyb21JbmZvVHlwZUIkPTQwNjI4&rs=5>

DEUTSCHER BRENNSTOFFZELLENBUS-CLUSTER (Hrsg.): Brennstoffzellenbusse für den emissionsfreien ÖPNV. Vortrag im Rahmen der Wasserstoff-Vollversammlung am 07.07.2022. Berlin 2022. URL: [https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2022/07/Wasserstoff-Vollversammlung\\_Brennstoffzellenbusse-fuer-den-emissionsfreien-OePNV\\_07.07.22.pdf](https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2022/07/Wasserstoff-Vollversammlung_Brennstoffzellenbusse-fuer-den-emissionsfreien-OePNV_07.07.22.pdf) (Stand: 08.11.2022)

DGUV (Hrsg.): Wasserstoffsicherheit in Werkstätten. DGUV Information 209-072 2021. URL: <https://publikationen.dguv.de/widgets/pdf/download/article/265> (Stand: 20.12.2022)

DGUV FBHM-099 (Hrsg.): Gasantriebssysteme in Fahrzeugen. Qualifizierung für Arbeiten an Fahrzeugen mit Gasantrieb 2018. URL: <https://publikationen.dguv.de/widgets/pdf/download/article/3528> (Stand: 05.08.2022)

DGUV INFORMATION 209-093 (Hrsg.): Qualifizierung für Arbeiten an Fahrzeugen mit Hochvoltsystemen 2021. URL: <https://publikationen.dguv.de/widgets/pdf/download/article/3982> (Stand: 10.11.2022)

DISPAN, Jürgen: Elektromobilität: Schlüsselfaktor Qualifikation. In: Informationsdienst des IMU-Institut (2013) 1

DÖLLE, Johannes: Lieferantenmanagement in der Automobilindustrie. Wiesbaden 2013

DWV (Hrsg.): Grüne Wasserstoff-Industrie – Lösung für den Strukturwandel? 2018. URL: <https://www.dwv-info.de/wp-content/uploads/2015/06/20181128-Pos.-Papier-zu-Strukturwandel-final.pdf>

EE ENERGY ENGINEERS/BBH CONSULTING (Hrsg.): Machbarkeitsstudie: HyExperts – Lastverkehr mit grünem Wasserstoff – Future Mobility. Studie im Auftrag des Landkreis Osterholz n.d. URL: [https://www.hy.land/wp-content/uploads/2022/03/abschlussbericht\\_hyexperts\\_osterholz.pdf](https://www.hy.land/wp-content/uploads/2022/03/abschlussbericht_hyexperts_osterholz.pdf) (Stand: 03.10.2022)

EHRET, Oliver: Wasserstoffmobilität: Stand, Trends, Perspektiven 2020. URL: <https://www.dvgw.de/medien/dvgw/forschung/berichte/g201910-abschlussbericht-h2-mobilitaet.pdf> (Stand: 14.11.2022)

E-MOBIL BW (Hrsg.): Systemvergleich zwischen Wasserstoffverbrennungsmotor und Brennstoffzelle im schweren Nutzfahrzeug. Eine technische und ökonomische Analyse zweier Antriebskonzepte. Stuttgart 2021. URL: [https://www.e-mobilbw.de/fileadmin/media/e-mobilbw/Publikationen/Studien/e-mobilBW-Studie\\_H2-Systemvergleich.pdf](https://www.e-mobilbw.de/fileadmin/media/e-mobilbw/Publikationen/Studien/e-mobilBW-Studie_H2-Systemvergleich.pdf) (Stand: 07.11.2022)

EUROPEAN PARLIAMENT (Hrsg.): EU ban on the sale of new petrol and diesel cars from 2035 explained 2022. URL: <https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/economy/20221019STO44572/eu-ban-on-sale-of-new-petrol-and-diesel-cars-from-2035-explained> (Stand: 18.11.2022)

FLECKENSTEIN, Felix: Wasserstoff für eine klimaneutrale Niedersächsische Industrie. Impulspapier Nr. 02/2022. Hannover 2022. URL: [https://www.aul-nds.de/fileadmin/user\\_upload/DGB-Reihe\\_Gerechter\\_Wandel\\_Nr\\_2\\_2022\\_-\\_Wasserstoff\\_fu\\_r\\_klimaneutrale\\_niedersa\\_\\_chsische\\_Industrie.pdf](https://www.aul-nds.de/fileadmin/user_upload/DGB-Reihe_Gerechter_Wandel_Nr_2_2022_-_Wasserstoff_fu_r_klimaneutrale_niedersa__chsische_Industrie.pdf) (Stand: 03.10.2022)

FRAUNHOFER IAO (Hrsg.): ELAB 2.0. Wirkungen der Fahrzeugelektrifizierung auf die Beschäftigung am Standort Deutschland. Abschlussbericht 2019. URL: <https://publica-rest.fraunhofer.de/server/api/core/bitstreams/e391ba92-e041-48f9-9feb-b5850a305b65/content> (Stand: 09.11.2022)

FRAUNHOFER IAO (Hrsg.); IFA (Hrsg.): Beschäftigungseffekte im Kfz-Gewerbe 2030/2040. Stuttgart 2023. URL: [https://www.e-mobilbw.de/fileadmin/media/e-mobilbw/Publikationen/Studien/e-mobil\\_BW\\_Beschaefigungseffekte\\_im\\_Kfz-Gewerbe\\_2030\\_2040.pdf](https://www.e-mobilbw.de/fileadmin/media/e-mobilbw/Publikationen/Studien/e-mobil_BW_Beschaefigungseffekte_im_Kfz-Gewerbe_2030_2040.pdf) (Stand: 01.03.2023)

FRAUNHOFER IPT (Hrsg.): The Relevance of Fuel Cells for Mobility Applications. Discussion Paper. Aachen 2021. URL: <https://www.ipt.fraunhofer.de/en/publications/whitepaper-trendreports-studies/relevance-of-fuel-cells-for-mobility-applications.html> (Stand: 20.09.2022)

FÜHREN, Daniel; GRAW, Myron; KRÖLL, Leonard; ILSEMAN, Jan; ROBINIUS, Martin; WIENERT, Patrick; ARETZ, Martin; JANSSEN, Henning; KERTING, Marlin; MÜLLER, Clemens: Werschöpfungskette Brennstoffzelle. Metastudie. Berlin 2022. URL: [https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2022/08/NOW\\_Wertschoepfungskette-Brennstoffzelle.pdf](https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2022/08/NOW_Wertschoepfungskette-Brennstoffzelle.pdf) (Stand: 20.12.2022)

GRIMM, Veronika; JANSER, Markus; STOPS, Michael: Kompetenzen für die Wasserstofftechnologie sind schon jetzt gefragt. IAB-Kurzbericht 11/2021. Nürnberg 2021. URL: <https://doku.iab.de/kurzber/2021/kb2021-11.pdf> (Stand: 20.09.2022)

GÜNTHER, W. A.; MICHAELI, R.: H2IntraDrive - Einsatz einer wasserstoffbetriebenen Flurförderzeugflotte unter Produktionsbedingungen. Forschungsbericht. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München. Garching 2015. URL: [https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2020/09/forschungsbericht\\_h2intradrive\\_03bs112b.pdf](https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2020/09/forschungsbericht_h2intradrive_03bs112b.pdf) (Stand: 14.11.2022)

H2MOBILITY (Hrsg.): Wasserstoffbetankung von Schwerlastfahrzeugen - die Optionen im Überblick. Berlin 2021. URL: [https://h2-mobility.de/wp-content/uploads/2022/03/H2M\\_Ueberblick\\_BetankungsoptionenLNFSNF\\_2022.pdf](https://h2-mobility.de/wp-content/uploads/2022/03/H2M_Ueberblick_BetankungsoptionenLNFSNF_2022.pdf) (Stand: 30.06.2022)

H2SKILLS (Hrsg.): Branchenübergreifende Bedarfsanalyse für Qualifizierungsangebote im Wasserstoff-Kontext in Nord-Ost-Niedersachsen. IHK Lüneburg-Wolfsburg; HWK Braunschweig-Lüneburg-Stade 2022. URL: <https://www.wasserstoff-niedersachsen.de/wp-content/uploads/2022/09/H2Skills-Bedarfsanalyse-Qualifizierung-Wasserstoff.pdf> (Stand: 10.11.2022)

HOLZ, Franziska; ROTH, Alexander; SOGALLA, Robin; MEIßNER, Frank; ZACHMANN, Georg; McWILLIAMS, Ben; KEMFERT, Claudia: Die Zukunft des europäischen Energiesystems: Die Zeichen stehen auf Strom. In: DIW Wochenbericht 89 (2022) 6, S. 76-82

IVECO (Hrsg.): Iveco und Nikola eröffnen Produktionswerk 2021. URL: <https://www.iveco.com/germany/presse/veroeffentlichungen/pages/cnh-nikola-werkseroeffnung.aspx> (Stand: 08.11.2022)

KOHL, Matthias: Auszubildende in der Automobilindustrie: Praxisnahe Qualifizierung für das Arbeiten an Hochvoltfahrzeugen. In: GOTH, Günther C.; KRETSCHMER, Susanne; PREIFFER, Iris (Hrsg.): Auswirkungen der Elektromobilität auf die betriebliche Aus- und Weiterbildung. Bielefeld 2018a, S. 75-91

KOHL, Matthias: Elektromobilität, Digitalisierung und Industrie 4.0 als Innovationstreiber - neue Produkte und Produktionsprozesse bedingen neue Kompetenzanforderungen. In: GOTH, Günther C.; KRETSCHMER, Susanne; PREIFFER, Iris (Hrsg.): Auswirkungen der Elektromobilität auf die betriebliche Aus- und Weiterbildung. Bielefeld 2018b, S. 11-32

LIEBHERR (Hrsg.): Liebherr-Raupenbagger mit Wasserstoffmotor feiert Weltpremiere. Meldung vom 23.10.2022 2022. URL: <https://www.liebherr.com/de/deu/aktuelles/news-pressemitteilungen/detail/liebherr-raupenbagger-mit-wasserstoffmotor-feiert-weltpremiere.html> (Stand: 10.02.2023)

MEYER, Robert; HERKEL, Sebastian; KOST, Christoph: Die Rolle von Wasserstoff im Gebäudesektor: Vergleich technischer Möglichkeiten und Kosten defossilisierter Optionen der Wärmeerzeugung. Potsdam 2021. URL: <https://ariadneprojekt.de/publikation/analyse-wasserstoff-im-gebauedesektor/#zusammenfassung> (Stand: 03.08.2022)

MÖNNING, Anke; RONSIK, Linus; BECKER, Lisa; STEEG, Stefanie: Wasserstoffbasierte Transformation und die Auswirkungen auf den Importbedarf Deutschlands. BIBB Discussion Paper. Bonn 2022. URL: [https://res.bibb.de/vet-repository\\_780209](https://res.bibb.de/vet-repository_780209) (Stand: 30.11.2022)

NOW GMBH (Hrsg.): Auswertung KBA-Zahlen. Berlin 2023. URL: [https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2022/12/KBA\\_Report\\_11-2022.pdf](https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2022/12/KBA_Report_11-2022.pdf) (Stand: 12.01.2023)

NOW GMBH (Hrsg.): Auswertung KBA-Zahlen - September 2022. Berlin 2022. URL: [https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2022/10/KBA\\_Report\\_09-2022.pdf](https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2022/10/KBA_Report_09-2022.pdf) (Stand: 08.11.2022)

NOW GMBH (Hrsg.): Abschlussbericht: Programmbegleitforschung innovative Antriebe und Fahrzeuge. Innovative Antriebe im straßengebundenen ÖPNV. Berlin 2021a. URL: [https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2022/04/NOW\\_Abschlussbericht\\_Begleitforschung-Bus.pdf](https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2022/04/NOW_Abschlussbericht_Begleitforschung-Bus.pdf) (Stand: 08.11.2022)

NOW GMBH (Hrsg.): Wasserstoff-Verbrennungsmotor als alternativer Antrieb. Berlin 2021b. URL: [https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2021/10/NOW\\_Metastudie\\_Wasserstoff-Verbrennungsmotor.pdf](https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2021/10/NOW_Metastudie_Wasserstoff-Verbrennungsmotor.pdf) (Stand: 14.06.2022)

NOW GMBH/FRAUNHOFER IPT (Hrsg.): Technologischer Deep-Dive. Die Bipolarplatte der PEM-Brennstoffzelle 2022a. URL: [https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2022/10/Deep-Dive\\_Bipolarplatte.pdf](https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2022/10/Deep-Dive_Bipolarplatte.pdf) (Stand: 06.01.2023)

NOW GMBH/FRAUNHOFER IPT (Hrsg.): Technologischer Deep-Dive. Die Membran-Elektroden-Einheit der PEM-Brennstoffzelle 2022b. URL: [https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2022/10/Deep-Dive\\_MEA.pdf](https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2022/10/Deep-Dive_MEA.pdf) (Stand: 06.01.2023)

NPM (Hrsg.): Quantifizierung von Beschäftigungseffekten durch Leistungselektronik und Brennstoffzellenfahrzeuge. AG4 - Zwischenbericht 2021. URL: [https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/wp-content/uploads/2021/10/NPM\\_AG4\\_Leistungselektronik-1.pdf](https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/wp-content/uploads/2021/10/NPM_AG4_Leistungselektronik-1.pdf) (Stand: 29.07.2022)

ÖKO-INSTITUT (Hrsg.); FRAUNHOFER ISE (Hrsg.): Durchbruch für die Wärmepumpe. Praxisoptionen für eine effiziente Wärmewende im Gebäudebestand. Studie im Auftrag von Agora Energiewende. Freiburg 2022. URL: [https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2022/2022-04\\_DE\\_Scaling\\_up\\_heat\\_pumps/A-EW\\_273\\_Waermepumpen\\_WEB.pdf](https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2022/2022-04_DE_Scaling_up_heat_pumps/A-EW_273_Waermepumpen_WEB.pdf) (Stand: 10.03.2023)

ÖKO-INSTITUT E.V. (Hrsg.): E-Fuels im Verkehrssektor. Berlin 2020. URL: <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/E-Fuels-im-Verkehrssektor-Hintergrundbericht.pdf> (Stand: 22.07.2022)

OLLE, Werner: Handlungsdruck für Automobilhersteller und -zulieferer nimmt deutlich zu. In: ifo Schnelldienst 74 (2021), S. 6-9

PLÖTZ, Patrick; WIETSCHEL, Martin; DÖSCHER, Henning; THIELMANN, Axel: Status Quo und Zukunft von Wasserstoff im Verkehrssektor 2022. URL: <https://www.isi.fraunhofer.de/de/blog/2022/status-quo-und-zukunft-h2-Verkehrssektor.html> (Stand: 08.11.2022)

PRODUKTION (Hrsg.): Warum Staplerflotten künftig mit Wasserstoff fahren 2022. URL: <https://www.produktion.de/technik/co2-neutrale-industrie/warum-staplerflotten-kuenftig-mit-wasserstoff-fahren-106.html> (Stand: 01.08.2022)

PROGNOS (Hrsg.); ÖKO-INSTITUT (Hrsg.); WUPPERTAL-INSTITUT (Hrsg.): Klimaneutrales Deutschland 2045. Zusammenfassung 2021. URL: [https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021\\_04\\_KNDE45/A-EW\\_209\\_KNDE2045\\_Zusammenfassung\\_DE\\_WEB.pdf](https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021_04_KNDE45/A-EW_209_KNDE2045_Zusammenfassung_DE_WEB.pdf) (Stand: 19.09.2022)

ROLANDBERGER (Hrsg.): Potenziale der Wasserstoff- und Brennstoffzellenindustrie in Baden-Württemberg. Studie im Auftrag des Landesministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg 2020. URL: [https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/6\\_Wirtschaft/Ressourceneffizienz\\_und\\_Umwelttechnik/Wasserstoff/200724-Potentialstudie-H2-Baden-Wuerttemberg-bf.pdf](https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/6_Wirtschaft/Ressourceneffizienz_und_Umwelttechnik/Wasserstoff/200724-Potentialstudie-H2-Baden-Wuerttemberg-bf.pdf) (Stand: 20.09.2022)

RUF, Yvonne; BAUM, Markus; TORN, Thomas; MENZEL, Alexandra; REHBERGER, Johannes: Fuel Cells Hydrogen Trucks. Heavy-Duty High Performance Green Solution. Brüssel 2020. URL: [https://fuelcell-trucks.eu/wp-content/uploads/2021/03/roland\\_berger\\_fuel\\_cells\\_hydrogen\\_trucks.pdf](https://fuelcell-trucks.eu/wp-content/uploads/2021/03/roland_berger_fuel_cells_hydrogen_trucks.pdf) (Stand: 25.07.2022)

RUNST, Petrik; OHLENDORF, Jana: Die Rolle des Handwerks auf dem Weg zu einem klimaneutralen Gebäudebestand. Göttingen 2015. URL: <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/191819/1/ifh-gbh-01-2015.pdf> (Stand: 10.03.2023)

RWTH AACHEN/VDMA (Hrsg.): Produktion von Brennstoffzellenkomponenten. Aachen 2022. URL: [https://www.transformationswissen-bw.de/fileadmin/media/Publikationen/2023/Produktion\\_von\\_Brennstoffzellen-Komponenten\\_dt-\\_2023-01.pdf](https://www.transformationswissen-bw.de/fileadmin/media/Publikationen/2023/Produktion_von_Brennstoffzellen-Komponenten_dt-_2023-01.pdf) (Stand: 03.04.2022)

RWTH AACHEN/VDMA (Hrsg.): Produktion von Brennstoffzellensystemen 2020. URL: [https://www.pem.rwth-aachen.de/global/show\\_document.asp?id=aaaaaaaaanbnvlt](https://www.pem.rwth-aachen.de/global/show_document.asp?id=aaaaaaaaanbnvlt) (Stand: 01.07.2022)

SCHRANK, Michael; LANGER, Vivien; JACOBSEN, Benjamin: Wasserstoff-Verbrennungsmotor als alternativer Antrieb. Metastudie. Berlin 2021. URL: [https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2021/10/NOW\\_Metastudie\\_Wasserstoff-Verbrennungsmotor.pdf](https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2021/10/NOW_Metastudie_Wasserstoff-Verbrennungsmotor.pdf) (Stand: 08.11.2022)

SHELL DEUTSCHLAND/WUPPERTAL INSTITUT (Hrsg.): Shell Wasserstoff-Studie - Energie der Zukunft? Hamburg 2017. URL: [https://www.shell.de/about-us/newsroom/shell-hydrogen-study/\\_jcr\\_content/root/main/containersection-0/simple/call\\_to\\_action/links/item0.stream/1643541262215/1086fe80e1b5960848a92310091498ed5c3d8424/shell-wasserstoff-studie-2017.pdf](https://www.shell.de/about-us/newsroom/shell-hydrogen-study/_jcr_content/root/main/containersection-0/simple/call_to_action/links/item0.stream/1643541262215/1086fe80e1b5960848a92310091498ed5c3d8424/shell-wasserstoff-studie-2017.pdf) (Stand: 14.06.2022)

SIEBEL, Thomas: Wie Brennstoffzellen wirtschaftlich produziert werden können. Springer Professional 2022. URL: <https://www.springerprofessional.de/brennstoffzelle/wasserstoff/wie-brennstoffzellen-wirtschaftlich-produziert-werden-koennen/20352222> (Stand: 05.10.2022)

SPD, BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN, FDP (Hrsg.): Mehr Fortschritt wagen. Koalitionsvertrag zwischen SPD, Bündnis 90/Die Grünen und FDP 2021. URL: [https://www.spd.de/fileadmin/Dokumente/Koalitionsvertrag/Koalitionsvertrag\\_2021-2025.pdf](https://www.spd.de/fileadmin/Dokumente/Koalitionsvertrag/Koalitionsvertrag_2021-2025.pdf) (Stand: 10.08.2022)

SPÖTTL, Georg: Sektoranalysen. In: RAUNER, Felix (Hrsg.): Handbuch Berufsbildungsforschung. Bielefeld 2005, S. 112-118

STEEG, St; HELMRICH, R.; MAIER, T.; SCHROER, Ph.; MÖNNING, A.; WOLTER, M.; SCHNEEMANN, Ch.; ZIKA, G.: Die Wasserstoffwirtschaft in Deutschland: Folgen für Arbeitsmarkt und Bildungssystem. Eine erste Bestandsaufnahme. Bonn 2022. URL: <https://lit.bibb.de/vufind/Record/DS-779809> (Stand: 25.01.2022)

SYHA, Joachim: Hochvolt-Qualifizierung in der überbetrieblichen Lehrlingsunterweisung. In: lernen & lehren 31 (2016) 2, S. 63-68

THUNEKE, Klaus; REMMELE, Edgar: Klimafreundliche Antriebe für Landmaschinen 2021. URL: [https://www.tfz.bayern.de/mam/cms08/publikationen/sonstiges/dateien/21\\_5-6\\_sub\\_klimafreundliche\\_antriebe\\_fuer\\_landmaschinen\\_a.pdf](https://www.tfz.bayern.de/mam/cms08/publikationen/sonstiges/dateien/21_5-6_sub_klimafreundliche_antriebe_fuer_landmaschinen_a.pdf) (Stand: 10.11.2022)

TRANSPORT & ENVIRONMENT (Hrsg.): Comparison of hydrogen and battery electric trucks. Methodology and underlying assumptions 2020. URL: [https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2021/07/2020\\_06\\_TE\\_comparison\\_hydrogen\\_battery\\_electric\\_trucks\\_methodology.pdf](https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2021/07/2020_06_TE_comparison_hydrogen_battery_electric_trucks_methodology.pdf) (Stand: 08.11.2022)

UMWELTBUNDESAMT (Hrsg.): Treibhausgasemissionen stiegen 2021 um 4,5 Prozent. Dessau-Roßlau 2022a. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/treibhausgasemissionen-stiegen-2021-um-45-prozent> (Stand: 07.11.2022)

UMWELTBUNDESAMT (Hrsg.): Emissionsübersicht in den Sektoren. Excel-Tabelle zum Download. Dessau-Roßlau 2022b. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/treibhausgas-emissionen> (Stand: 07.11.2022)

UMWELTBUNDESAMT (Hrsg.): Klimaschutz im Verkehr 2022c. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/klimaschutz-im-verkehr#rolle> (Stand: 19.09.2022)

VAN LEEUWEN, Lotta B.: Hydrogen or battery tractors: what potential for sustainable grape growing? In: ives Technical Reviews (2020)

WBZU (Hrsg.): Fachkraft für Gasanlagen in Fahrzeugen n.d. URL: <http://www.wbzu.de/seminare/fachkraft-fuer-gasanlagen-in-fahrzeugen/quali-stufe-2e> (Stand: 12.01.2023)

WIETSCHEL, Martin; PLÖTZ, Patrick; KLOBASA, Marian; MÜLLER-KIRCHENBAUER, Joachim; KOCHEMS, Johannes; HERMANN, Lisa; GROSSE, Benjamin; NECKEN, Lukas; KÜSTER, Michael; NAUMANN, David; KOST, Christoph; FAHL, Ulrich; TIMMERMANN, Daniel; ALBERT, Denise: Sektorkopplung - Was ist darunter zu verstehen? In: Zeitschrift für Energiewirtschaft (2018) 43, S. 1-10

ZENK, Johanna; MÖNNING, Anke; RONSIEK, Linus; SCHNEEMANN, Christian; SCHUR, Alexander Christian; STEEG, Stefanie: Erste Abschätzung möglicher Arbeitsmarkteffekte durch die Umsetzung der Nationalen Wasserstoffstrategie bis 2030. BIBB Discussion Paper 2023. URL: <https://lit.bibb.de/vufind/Record/DS-780958> (Stand: 08.03.2023)

ZINKE, Gert: Sektoranalyse: Erzeugung, Speicherung und Transport von Wasserstoff. Eine Untersuchung im Rahmen des Projektes "H2Pro: Wasserstoff - ein Zukunftsthema der beruflichen Bildung im Kontext der Energiewende" 2022. URL: [https://res.bibb.de/vet-repository\\_780890](https://res.bibb.de/vet-repository_780890) (Stand: 24.01.2023)