



7.8.218 - Wasserstoff – ein Zukunftsthema der beruflichen Bildung im Kontext der Energiewende (H2PRO)

Abschlussbericht: Teilbericht für den Sektor
Mobilität

Thomas Felkl, Gert Zinke (Projektleiter)

Barbara Hiller, Inga Schad-Dankwart,
Maximilian Schneider (bis April'24), Angelika
Calmez (bis April'24), Anja Schmickler (ab
April'24), Kubat Buyar (ab April'24), Ulrike
Eckstein (ab April'24)

Autor des Berichts: Maximilian Schneider

Laufzeit 10/21 bis 09/24
Bonn, September 2025
Bundesinstitut für Berufsbildung
53175 Bonn

Telefon: 0228/107-2510
E-Mail: thomas.felkl@bibb.de

Mehr Informationen unter:
www.bibb.de/

Zitiervorschlag

Schneider, Maximilian: 7.8.218 - Wasserstoff – ein Zukunftsthema der beruflichen Bildung im Kontext der Energiewende (H2PRO) : Abschlussbericht: Teilbericht für den Sektor Mobilität. Bonn, 2025.

Online: https://res.bibb.de/vet-repository_783886.

© Bundesinstitut für Berufsbildung, 2025

Dieses Dokument gehört zu der VET Repository-Sammlung „BIBB Projektberichte“.

Version 1.0
September 2025

Herausgeber

Bundesinstitut für Berufsbildung
Robert-Schuman-Platz 3
53175 Bonn
Internet: www.vet-repository.info
E-Mail: repository@bibb.de

Trotz sorgfältiger inhaltlicher Kontrolle übernimmt das BIBB keine Haftung für die Inhalte externer Links. Für den Inhalt der verlinkten Seiten sind ausschließlich deren Betreiber verantwortlich.

**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.

Inhaltsverzeichnis

Das Wichtigste in Kürze	2
1 Problemdarstellung	3
1.1 Wasserstoff im Strukturwandel des Mobilitätssektors	3
1.2 Forschungsstand	4
2 Projektziele und Forschungsfragen	5
3 Methodisches Vorgehen	6
4 Ergebnisse	7
4.1 Arbeitsaufgaben und Anforderungen	7
4.1.1 Kfz-Servicewerkstätten.....	7
4.1.2 Fahrzeugbau	12
4.2 Qualifizierung und Weiterbildung	12
4.3 Wasserstoff in der Berufsschule.....	14
4.4 Ausbildung und Ordnungsmittel in fahrzeugtechnischen Berufen	15
4.4.1 Kraftfahrzeugmechatroniker/-in	16
4.4.2 Karosserie- und Fahrzeugbaumechaniker/-in.....	17
4.4.3 Land- und Baumaschinenmechatroniker/-in	18
4.5 Exkurs: Brennstoffzellenproduktion	19
4.6 Ausblick: Binnenschifffahrt.....	20
4.6.1 Technologischer Wandel	20
4.6.2 Berufe und Qualifikationen	21
4.7 Ausblick: Luftfahrt.....	22
4.7.1 Technologischer Wandel	22
4.7.2 Berufe und Qualifikationen	23
5 Diskussion.....	24
5.1 Ausbildungsberufe und Weiterbildungsstrategien	24
5.2 Qualifikationsbedarfe und Ordnungsmittel	25
5.3 Praxisunterstützende Maßnahmen	25
6 Literaturverzeichnis.....	27

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2: Relevante Ausbildungsberufe für Arbeiten an Brennstoffzellenfahrzeugen und im Fahrbetrieb.....	7
Tabelle 3: Qualifizierungsstufen für Hochvoltssysteme und Gasantrieben nach DGUV 209-093 und DGUV FBHM-099. (vgl. DGUV 2018; 2021)	13
Tabelle 4: Auszug aus der Ausbildungsordnung für Kraftfahrzeugmechatroniker/-innen. (vgl. BUNDESGESETZBLATT 2013a)	17
Tabelle 5: Auszug aus der Ausbildungsordnung für Karosserie- und Fahrzeugbaumechaniker/-innen. (vgl. BUNDESGESETZBLATT 2023)	18
Tabelle 6: Auszug aus der Ausbildungsordnung für Land- und Baumaschinenmechatroniker/-innen. (vgl. BUNDESGESETZBLATT 2014)	19
Tabelle 7: Auszug aus der Ausbildungsordnung für Binnenschiffer/-innen. (vgl. BUNDESGESETZBLATT 2022)	21
Tabelle 8: Auszug aus der Ausbildungsordnung Fluggerätemechaniker/-in (fachrichtungsübergreifend). (vgl. Bundesgesetzblatt 2013b)	23

Das Wichtigste in Kürze

Der vorliegende Beitrag beleuchtet Qualifizierungsbedarfe für Fachkräfte in der wasserstoffbasierten Mobilität und prüft Handlungsbedarfe für die Ordnungsarbeit und die Praxis der dualen Ausbildung. Grundlage sind Experteninterviews mit Personen aus Betrieben, Weiterbildung, Berufsschulen, Wissenschaft und Verbänden, die im Rahmen des Projekts H2PRO am BIBB geführt wurden. Das Projekt knüpft an die Nationale Wasserstoffstrategie an, um die darin angestrebte Stärkung der Aus- und Weiterbildung im Bereich Wasserstofftechnologien zu unterstützen (vgl. BUNDESREGIERUNG 2023) und erweitert den Forschungsstand im Bereich Berufsbildung und Energiewende. Im Mittelpunkt des Beitrags stehen Qualifizierungsbedarfe in Kfz-Werkstätten. Zudem wurden für die Anwendungsbereiche Schiffs- und Flugverkehr kurze Ausblicke erstellt.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich zusätzliche Anforderungen an Kenntnisse, Fähigkeiten und Fertigkeiten insbesondere auf die Themen Hochvolttechnik, Gastechnik, Stoffeigenschaften und Grundlagen der Brennstoffzellentechnik beziehen, wobei dem Arbeits- und Gesundheitsschutz eine hohe Relevanz zukommt. Um den Kompetenzaufbau für die Wasserstoffmobilität zu unterstützen, kann unter anderem die Ausbildung in der Hochvolttechnik gestärkt und das Thema Wasserstoff in den Berufsschulunterricht integriert werden. Angesichts des rasch voranschreitenden Wandels im Mobilitätssektor wird es zunehmend wichtig, zukunftsrelevante Technologien frühzeitig in der Ausbildung aufzugreifen und die Lernenden für entsprechende Branchenveränderungen zu

sensibilisieren. Ein dringlicher Neuordnungsbereich wird in den einschlägigen Berufen zum jetzigen Zeitpunkt nicht erkennbar.

1 Problemdarstellung

1.1 Wasserstoff im Strukturwandel des Mobilitätssektors

Mit dem Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) hat sich Deutschland verpflichtet, seine Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2030 um 65 Prozent gegenüber 1990 zu senken und bis zum Jahr 2045 treibhausgasneutral zu werden (vgl. BUNDESREGIERUNG 2021). Grüner Wasserstoff gilt als wichtiger Baustein der deutschen und europäischen Klimapolitik, weil seine energetische und stoffliche Nutzung in verschiedenen Industrie- und Wirtschaftsbereichen vielversprechende Möglichkeiten zur Emissionsvermeidung bietet.

Die im Jahr 2023 vorgestellte Fortschreibung der Nationalen Wasserstoffstrategie verdeutlicht die steigenden politischen Ambitionen im Wasserstoffhochlauf. Unter anderem wurde das Ziel der heimischen Elektrolysekapazität für das Jahr 2030 – wie zuvor im Koalitionsvertrag vereinbart – auf 10 GW verdoppelt (vgl. BUNDESREGIERUNG 2023).

Der Mobilitätssektor befindet sich durch den Umstieg auf emissionsfreie Antriebstechnologien, die zunehmende Vernetzung von Fahrzeugen und Produktionsprozessen, neue Geschäfts- und Vertriebsmodelle sowie durch veränderte Mobilitätskulturen in einem umfassenden Strukturwandel (vgl. PFEIFFER 2023). Besonders die Antriebselektrifizierung wirkt als Transformationstreiber für etablierte Produktions- und Wertschöpfungsstrukturen in der Fahrzeug- und Zulieferindustrie (vgl. BAUER u. a. 2019). Batterieelektrische Fahrzeuge – die im Januar 2024 über 10 Prozent der Pkw-Neuzulassungen ausgemacht haben – werden den Fahrzeugmarkt perspektivisch dominieren. Wasserstoff stellt innerhalb dieses Wandels weniger eine Konkurrenztechnologie zu batterieelektrischen Antrieben dar, sondern eine emissionsfreie Alternative für jene Anwendungsbereiche, in denen batteriebetriebene Fahrzeuge bestimmte Nutzungsanforderungen nicht bedienen können (vgl. BAUM u. a. 2021).

Wenn von Wasserstofffahrzeugen die Rede ist, sind in der Regel Brennstoffzellenfahrzeuge gemeint. Dabei handelt es sich um Elektrofahrzeuge, in denen die Antriebsenergie nicht über das externe Aufladen der Batterie, sondern durch die Rückverstromung des Wasserstoffs bereitgestellt wird. Anwendungspotenziale für Brennstoffzellenantriebe liegen insbesondere in Nutzfahrzeugsegmenten mit hohem Energiebedarf und hohen Reichweitenanforderungen. Zudem bietet die kurze Betankungszeit von Brennstoffzellenfahrzeugen eine größere Flexibilität gegenüber batterieelektrischen Fahrzeugen. Eine Reihe großer Lkw-Hersteller haben Brennstoffzellenfahrzeuge bereits in ihre Zukunftsstrategien integriert, die Zahl der Brennstoffzellenbusse im öffentlichen Personennahverkehr nimmt zu (vgl. PWC 2023) und auch in anderen Nutzfahrzeugsegmenten (z.B. Reinigungs-, Abfall- oder Flurförderfahrzeuge) kommen Brennstoffzellenantriebe bereits vereinzelt zum Einsatz. Neben der Brennstoffzelle ist auch der Einsatz von Wasserstoff-Verbrennungsmotoren oder von synthetischen Kraftstoffen auf Wasserstoffbasis (eFuels) möglich (vgl. SCHRANK/LANGER/JACOBSEN 2021).

Gut qualifizierte Fachkräfte sind ein entscheidender Faktor für den Aufbau der Wasserstoffwirtschaft. Mit der Fortschreibung der Nationalen Wasserstoffstrategie betont die Bundesregierung nicht nur die gestiegenen Ambitionen im Wasserstoffhochlauf, sondern beabsichtigt auch, die Aus- und Weiterbildung im Bereich Wasserstoff zu stärken (vgl. BUNDESREGIERUNG 2023).

Verschiedene Beschäftigungs- und Qualifizierungsaspekte wurden in Debatten rund um den Mobilitätswandel bereits diskutiert. Arbeitsmarktprognosen sehen einen signifikanten Rückgang der Beschäftigungszahlen in der Fahrzeug- und Zulieferindustrie (vgl. MÖNNING u. a. 2018), der insbesondere auf die Reduktion der benötigten Teile und Komponenten im elektrischen Antriebsstrang zurückgeführt wird (vgl. BAUER u. a. 2019). Auf beruflicher Ebene geht die Elektromobilität mit einer deutlichen Veränderung der Arbeits- und Qualifikationsprofile im Kfz-Gewerbe einher, weil Kenntnisse, Fähigkeiten und Fertigkeiten, die auf den mechanischen Verbrennungsmotor ausgerichtet sind, an Relevanz verlieren, während elektrotechnische Kompetenzen in den Vordergrund rücken (vgl. GOTH/KRETSCHMER/PREIFFER 2018).

1.2 Forschungsstand

In den vergangenen Jahren hat sich eine überschaubare Zahl an Projekten dem Thema Facharbeit in der Wasserstoffwirtschaft aus unterschiedlichen Perspektiven gewidmet. Am Bundesinstitut für Berufsbildung (BIBB) konzentriert sich das Projekt „Arbeitskräftebedarf und Arbeitskräfteangebot entlang der Wertschöpfungskette Wasserstoff“ auf die quantitativen Arbeitsmarktfolgen des Wasserstoffhochlaufs. Mit Hilfe von Szenarioanalysen auf Grundlage der Qualifikations- und Berufsprojektionen (QuBe) werden potenzielle wasserstoffbedingte Wirtschafts- und Arbeitsmarktentwicklungen modelliert. Die Prognosen verdeutlichen unter anderem die Relevanz qualifizierter Arbeit in der Wasserstoffwirtschaft. Während Helfertätigkeiten nicht nennenswert zunehmen, steigt der Bedarf an Fachkräften, Expert/-innen und Spezialist/-innen an. In absoluten Zahlen gemessen, sind auf der Fachkräfteebene mit 41.000 zusätzlichen Erwerbstätigen die größten Veränderungen gegenüber dem Referenzszenario zu erwarten (vgl. SCHUR/MÖNNIG/RONSIEK 2023, S. 39f.). Am Institut für Arbeitsmarkt- und Berufsforschung (IAB) wurde eine quantitative Stellenanzeigenanalyse für die noch junge Wasserstoffwirtschaft mit Daten aus dem Jahr 2019 vorgenommen. In der Stichprobe zeigte sich, dass in der Frühphase des Hochlaufs überwiegend Spezialisten/Spezialistinnen sowie Experten/Expertinnen gesucht werden, es aber auch schon einen konkreten Bedarf für technische Fachkräfte mit Wasserstoffkompetenzen gab (vgl. GRIMM/JANSER/STOPS 2021, S. 4).

Erste Arbeitsmarktprognosen lassen erwarten, dass mit dem Wasserstoffhochlauf ein hoher Fachkräftebedarf einhergeht (vgl. SCHUR/MÖNNIG/RONSIEK 2023, 39f.). Zudem zeigen regionale Bedarfsanalysen, dass bereits ein konkreter Bedarf an wasserstoffbezogenen Qualifizierungen besteht, Unternehmen angesichts der frühen Hochlaufphasen aber noch Schwierigkeiten haben, Qualifizierungsbedarfe abzusehen und zu konkretisieren (vgl. LENZ/BRAUN 2023; REVIERWENDE/FRAUNHOFER IMW/HYPOS 2024). Beide Befragungen erkennen eine steigende Nachfrage nach wasserstoffbezogenen Qualifizierungen in ihren Regionen, zeigen aber auch, dass Unternehmen in frühen Hochlaufphasen Schwierigkeiten haben, Qualifizierungsbedarfe abzusehen und zu konkretisieren. Zwar wird betont, dass

Sensibilisierungen in der Frühphase wichtig sind, um bei den Mitarbeitenden ein Grundverständnis zu schaffen und Vorbehalte abzubauen, bei den Unternehmen aber auch der Wunsch nach Angeboten besteht, die stärker auf die jeweiligen Arbeitsaufgaben und Bedarfe ausgerichtet sind. Zudem ergaben die Befragungen, dass bei manchen Unternehmen noch Unsicherheiten hinsichtlich rechtlicher Regularien und Normen in Qualifizierungsfragen bestehen.

Da die Brennstoffzelle Teil der Elektromobilität ist und in der Fahrzeugindustrie schon zu früheren Zeiten als Antriebskonzept erprobt wurde, kann für den Mobilitätsbereich – anders als in anderen Sektoren – auf einen Forschungsstand zurückgegriffen werden, der Kompetenz- und Qualifizierungsfragen bereits näher beleuchtet. Elektrofahrzeuge sind in manchen Kfz-Betrieben zwar noch eine Neuheit, damit verbundene Arbeitsaufgaben, Kompetenzveränderungen und beruflich-didaktische Konsequenzen wurden in der Berufsbildungsliteratur aber schon hinlänglich behandelt und besitzen in der Ordnungsarbeit bereits eine hohe Bedeutung (bspw. GOTH/KRETSCHMER/PREIFFER 2018).

Obwohl die Fachkräftequalifizierung in den Debatten rund um den Wasserstoffhochlauf in den vergangenen Jahren an Aufmerksamkeit gewonnen hat, sind konkrete Arbeitsaufgaben, Kompetenz- und Qualifizierungsbedarfe sowie ordnungsbezogene Aspekte der Facharbeit in der Wasserstoffwirtschaft noch unterbeleuchtet. In dieser Lücke ist das Projekt H₂PRO zu verorten, das an die Nationale Wasserstoffstrategie anknüpft, um die darin angestrebte *„Weiterentwicklung der beruflichen [...] Aus- und Weiterbildung im Bereich der Wasserstofftechnologien“* (BMW 2020, S. 25) zu unterstützen.

2 Projektziele und Forschungsfragen

Ziel des Projektes ist es, im Sinne einer Früherkennung (vgl. SPÖTTL/WINDELBAND 2006) neue Qualifikationsbedarfe in Ausbildungsberufen entlang der Wasserstoff-Wertschöpfungskette zu identifizieren und Handlungsempfehlungen für politische und praxisunterstützende Akteure der Berufsbildung abzuleiten. Folgende Forschungsfragen stehen im Mittelpunkt der Untersuchung:

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?

Der vorliegende Beitrag beantwortet diese Fragen für den Mobilitätssektor, wobei die Fahrzeugtechnik aufgrund ihrer hohen Beschäftigungsrelevanz und der im Vergleich zu anderen Mobilitätsfeldern weiter fortgeschrittenen Marktentwicklung im Vordergrund steht. Zudem wird Ausblick auf mögliche Qualifikationsveränderungen in der Binnenschifffahrt und

im Flugverkehr gegeben. Eine detaillierte Analyse der letztgenannten Anwendungsfelder ist aufgrund des jungen Entwicklungsstadiums entsprechender Technologien zum jetzigen Zeitpunkt aber nicht möglich.

3 Methodisches Vorgehen

Das Projekt H2PRO verfolgt ein dreiteiliges Forschungsdesign aus Sektoranalysen, leitfadengestützten Experteninterviews und Fallstudien. In der Sektoranalyse wurden mittels Literaturrecherchen und ersten Gesprächen mit Expert/-innen sektorspezifische Strukturen und wasserstoffbezogene Veränderungen erörtert und auf „Dimensionen der Facharbeit“ (SPÖTTL 2005) hin beleuchtet. Auf diese Weise wurde ein strukturierter Zugang zum Forschungsfeld geschaffen und Annahmen sowie Forschungsinstrumente konnten für den weiteren Forschungsverlauf präzisiert werden.

Für den Bereich Kraftfahrzeug-/Nutzfahrzeugtechnik wurden zwischen Januar 2023 und Januar 2024 vierzehn leitfadengestützte Experteninterviews mit Personen durchgeführt aus verschiedenen Bereichen: Berufsschule ,Weiterbildung, Verband und Hochschule (Übersicht 1).

Tabelle 1: Anzahl der Interviews nach Art der Institutionen

	Betrieb	Berufsschule	Weiterbildung	Verband	Hochschule
Anzahl	6	4	2	1	1

Zwei der Interviews bezogen sich auf die Bereiche Brennstoffzellenproduktion und Tankinfrastruktur. Die Interviews wurden transkribiert und mit Hilfe von MAXQDA nach der inhaltlich-strukturierenden qualitativen Inhaltsanalyse nach Kuckartz (2016) ausgewertet. Für zwei Interviews war keine Aufzeichnung möglich. In diesen Fällen wurden ausführliche Gesprächsprotokolle erstellt.

Drei der Experteninterviews im betrieblichen Kontext wurden durch protokollierte Arbeitsplatzbesichtigungen zu vertiefenden Kurzfallstudien erweitert. Ziel war es, so einen näheren Blick auf Arbeitsplätze, Werkzeuge und die situative Gestaltung von Arbeitsaufgaben zu erhalten (vgl. BECKER 2018). Bei den drei Betrieben handelt es sich um Nutzfahrzeugwerkstätten, die bereits mit Brennstoffzellenfahrzeugen arbeiten und selbst Kfz-Mechatroniker/-innen ausbilden. Die Interviews im Rahmen der Kurzfallstudien wurden in der Auswertung und in der Ergebnisdarstellung nicht gesondert behandelt, da in den zentralen Fragen nach Arbeitsaufgaben und Qualifizierungsbedarfen eine hohe Deckung mit den restlichen Interviews bestand.

Zentrales Kriterium für die Interviewakquise war, dass die Personen bereits Erfahrungen mit Wasserstofftechnologien im betrieblichen und/oder didaktischen Kontext gesammelt haben und zu entsprechenden Kompetenz- und Qualifizierungsbedarfen sprechfähig sind. Diese Voraussetzung hat die Akquise aufgrund des jungen Anwendungsstadiums von

Wasserstofffahrzeugen deutlich erschwert. Alle befragten Personen sehen in wasserstoffbasierten Antrieben einen wichtigen Beitrag zur emissionsfreien Mobilität und erwarten einen Zuwachs von Brennstoffzellenfahrzeugen im Nutzfahrzeugsegment. Einzelne Befragte erwarten auch eine steigende Relevanz von Brennstoffzellen-Pkw im urbanen Raum, sofern eine ausreichende Wasserstoff-Tankstelleninfrastruktur vorhanden ist, was mit Schwierigkeiten im Ausbau der Ladeinfrastruktur, der Netzauslastung und dem höheren Komfort der Wasserstoffbetankung begründet wird. Anzumerken ist, dass Einschätzungen zur Verbreitung von Wasserstofffahrzeugen in den Gesprächen nur gestreift wurden. Aus den Interviewergebnissen lassen sich somit keine Schlussfolgerungen hinsichtlich dessen ziehen, welche Antriebsvarianten sich perspektivisch mit welchem Anteil am Markt durchsetzen könnten.

Für die Bereiche Binnenschifffahrt und Flugverkehr hat sich die Akquise deutlich komplexer gestaltet, denn Wasserstofftechnologien spielen hier bislang nur vereinzelt in Forschungs- und Entwicklungsprojekten eine Rolle. Für beide Bereiche wurden protokollierte Expertengespräche mit Personen aus der Hochschulforschung und Unternehmen geführt und im Schiffsbau konnte ein Prototyp besichtigt werden. Auf diese Weise konnten für die Binnenschifffahrt und den Flugzeugbau erste Ausblicke erarbeitet werden. Konkrete Kompetenz- und Qualifikationsveränderungen sowie Fragen zur Passung der Ordnungsmittel in den entsprechenden Ausbildungsberufen sollten noch einmal beleuchtet werden, wenn Wasserstoff dort breitere Anwendung findet und entsprechende Erfahrungswerte bei Betrieben vorhanden sind.

4 Ergebnisse

4.1 Arbeitsaufgaben und Anforderungen

4.1.1 Kfz-Servicewerkstätten

Berufe, die für die Arbeit an Fahrzeugantrieben ausgebildet werden, sind in erster Linie Kraftfahrzeugmechatroniker/-innen, Karosserie- und Fahrzeugbaumechaniker/-innen und Land- und Baumaschinenmechatroniker/-innen. Zudem werden Berufe wie z.B. Fahrzeuglackierer/-innen oder Fahrzeuginterieur-Mechaniker/-innen für allgemeine Arbeiten am Fahrzeug ausgebildet. Auch wenn diese in der Regel keine Instandhaltungsarbeiten am Antrieb vornehmen, müssen sie insoweit qualifiziert sein, dass ein sicheres Arbeiten an Brennstoffzellenfahrzeugen gewährleistet ist.

Tabelle 2: Relevante Ausbildungsberufe für Arbeiten an Brennstoffzellenfahrzeugen und im Fahrbetrieb

Arbeiten an Fahrzeugantrieben	Allgemeine Arbeiten am Fahrzeug	Fahrzeugbetrieb
Kraftfahrzeugmechatroniker/-in	Fahrzeuglackierer/-in	Fachkraft im Fahrbetrieb
Karosserie- und Fahrzeugbaumechaniker/-in	Fahrzeuginterieur-Mechaniker/-in	Berufskraftfahrer/-in

Land- und Baumaschinenmechaniker/-in	Metallbauer/-in – Fachrichtung Nutzfahrzeugbau
	Sattler/-in – Fachrichtung Fahrzeugsattlerei

Bei einem Brennstoffzellenfahrzeug handelt es sich um ein Elektrofahrzeug mit integriertem Gassystem. In der Brennstoffzelle wird der Wasserstoff rückverstromt, um den Elektroantrieb zu versorgen. Brennstoffzellenfahrzeuge lassen sich nach zwei Systemvarianten unterscheiden: In reinen Brennstoffzellenfahrzeugen dient die Brennstoffzelle als Hauptenergielieferant. Die Batterie fällt hier deutlich kleiner aus und wird nicht extern geladen. In sogenannten *Rage-Extender*-Fahrzeugen dient die extern aufladbare Batterie als Hauptenergielieferant und die Brennstoffzelle ist als unterstützendes Ladesystem für höhere Reichweiten integriert. 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.

Weil der Elektroantrieb eines Brennstoffzellenfahrzeugs ähnlich aufgebaut ist wie der eines batteriebetriebenen Fahrzeugs, fallen an Brennstoffzellenfahrzeugen auch die regulären Werkstattaufgaben der Elektromobilität an. Dazu zählen z.B. das Herstellen und Nachweisen der Spannungsfreiheit, Messungen und Interpretation der Messergebnisse zur Fehlerdiagnose (insb. Isolationswiderstands- und Potenzialausgleichsmessung) sowie der Komponententausch mit anschließender Wiederinbetriebnahme des Fahrzeugs. Wichtigstes Aufgabengebiet der Elektromobilität ist der sichere Umgang mit Hochvoltssystemen.¹ Mit der Verbreitung der Elektromobilität geht eine deutliche Veränderung der fahrzeugtechnischen Berufe einher, die in den Ordnungsmitteln bereits Eingang fand. Mechanische Tätigkeiten am Antriebsstrang werden deutlich reduziert und elektrotechnische Aufgaben und Kompetenzen rücken in den Vordergrund.² Mit dieser Kompetenzverschiebung geht den Befragten zufolge eine Komplexitätszunahme einher, weil die Arbeitsaufgaben und Qualifizierungsinhalte abstrakter werden.

„Mit reparieren ist nicht mehr viel, es ist mehr Diagnose und Teiletauschen. Ganz blöd gesagt leider. Das handwerkliche Geschick geht immer weiter verloren. Es ist

¹ Als Hochvoltbereich sind Spannungen $> 60 \text{ V}$ und $\leq 1500 \text{ V}$ Gleichspannung (DC) oder $> 30 \text{ V}$ und $\leq 1000 \text{ V}$ Wechselspannung (AC) definiert. Ein Hochvoltssystem besteht aus mindestens zwei Hochvoltkomponenten, die die entsprechende Spannung entweder bereitstellen oder mit ihr betrieben werden (vgl. DGUV 2021, S. 8).

² Die Arbeitsaufgaben und Kompetenzanforderungen der Elektromobilität wurden in vorherigen Beiträgen bereits umfassend dargestellt und diskutiert (siehe bspw. GOTH/KRETSCHMER/PREIFFER 2018).

*eher so, dass man mit dem Kopf arbeitet und guckt, was mache ich hier überhaupt.“
(Kfz-Meister/-in Mobilität-01-03, Pos. 49)*

Arbeitsaufgaben, die durch die Gasanlage neu entstehen, sind z.B. die Überprüfung von Wasserstoffsensoren, Ventilen und Verschraubungen, die Entleerung und Spülung des Gassystems, Leckagen- und Dichtheitsprüfungen, zusätzliche Fehlersuch- und Diagnosearbeiten sowie der Aus- und Einbau von Komponenten mit anschließender Wiederinbetriebnahme des Fahrzeugs. Die Arbeitsprozesse am Gassystem beziehen sich vor allem auf das Wasserstoff-Leitungssystem, die Kühlung und die Luftversorgung der Brennstoffzelle. Der Brennstoffzellenstack und die Wasserstofftanks werden in Servicewerkstätten nicht geöffnet, sondern lediglich getauscht. Die Fehleranfälligkeit der Brennstoffzelle ist den Befragten zufolge herstellerabhängig, wird aber überwiegend als gering bewertet.

Diagnose und Instandhaltung werden häufig nach Leitfäden oder Checklisten durchgeführt und dokumentiert. Die Suche von Defekten am Gassystem verläuft häufig über die im Fahrzeug verbauten Sensoren. Wenn diese einen Fehler melden, muss mit Hilfe von Gasdetektoren oder Lecksuchsprays geprüft werden, ob eine Leckage vorliegt. Für Instandsetzungsarbeiten an wasserstoffführenden Komponenten muss das Gassystem vollständig oder teilweise entleert und gespült werden. Für die Entleerung des Gassystems in der Werkstatt werden spezielle Vorrichtungen genutzt, über die der Wasserstoff aus der Halle geleitet und in die Umgebungsluft entlassen werden kann. Sofern solche Vorrichtungen nicht vorhanden sind, kann der Wasserstoff auch außerhalb der Halle kontrolliert abgelassen werden.

„Im Normalfall ist es dann so, die [...] Gasmeldeanlage hat oben ein Display über dem Fahrerplatz. [...] Jeder Sensor, der irgendwo verbaut ist, hat dann einen Namen, zum Beispiel Channel 1, 2, 3, 4. Und wenn derjenige dann den Fehler schmeißt, dann kann man ganz schnell schauen, dann haben wir da so eine Karte, auf der dann verortet ist, wo welcher Sensor ist. [...] Und fängt dann zum Beispiel erstmal an und [...] schaut mit diesem Messgerät, ist da wirklich irgendwas undicht oder nicht. Wenn man dann feststellt, in dem Bereich ist wirklich eine Leckage, dann muss man die natürlich instand setzen.“ (Kfz-Meister/-in Mobilität-01-02, Pos. 68)

„Was natürlich dann auch noch anfällt, sind halt [Prüfungen an der Gasanlage]. Das ist auch in regelmäßigen Abständen zu machen, [...] laut Wartungsintervall. Da haben wir dann auch so ein Messgerät, mit dem wir dann die komplette Gasanlage einmal überprüfen und gerade die Schraubverbindungen. Das ist halt immer interessant, weil Wasserstoff ist ja wirklich hochflüchtig, da merkt man kleinste Undichtigkeiten dann sehr sehr früh eigentlich.“ (Kfz-Meister/-in Mobilität-01-02, Pos. 61)

„Eigentlich muss der Schritt für Schritt vorgehen können. Was wir gemerkt haben, ist, dass es in der Werkstattbetriebe, vor allem bei Nutzfahrzeugbetrieben, wenn einer zufährt, dann nimmt man den, den man aus zeitlichen Gründen wegnehmen kann, oder der zu wenig schnell wegschaut. Der muss dann immer wieder seine Arbeit abbrechen. Das ist beim Gassystem nicht mehr drin, wenn man nicht mehr weiß, wo man steht. Da ist es am sinnvollsten, wenn man mit Checklisten arbeitet. Dass man das abhakt, was man gemacht hat. Dann weiß man genau, wo man steht,

wenn man wieder mit der Arbeit beginnt. Man muss halt schon viel konzentrierter arbeiten.“ (Trainer/-in Weiterbildung Mobilität-00-03, Pos. 37)

„Die Brennstoffzelle an sich selber nicht, aber die Sensorik, die drumherum ist. Temperaturfühler, der schonmal falsche Werte liefert und dadurch halt die Performance killt und dann die Störmeldung geht. Kühlwasserverluste sind relativ viele da. Das kühle Wasser, das die Brennstoffzelle umgibt, ist nicht elektrisch leitfähig, da gibt es extra Filter für, die regelmäßig getauscht werden müssen. Aber die reine Brennstoffzelle an sich mit den Stacks drin, wo der Prozess stattfindet, die ist relativ unempfindlich. [...] Das Innenleben von der Brennstoffzelle können wir selber auch nicht reparieren, weil es unter Laborbedingungen erfolgen soll. Staubfrei und die Luft darf nicht zu feucht sein und so. [...] Dann wird es halt eingeschickt.“ (Kfz-Meister/-in Mobilität-01-03, Pos. 37)

In der Anfangsphase des Einsatzes von Brennstoffzellenbussen wurden Fehlersuche und Instandhaltungen häufig in Zusammenarbeit mit Servicetechnikern/Servicetechnikerinnen der Fahrzeug- und Komponentenhersteller durchgeführt. In einer Buswerkstatt wurde die Herausforderung beschrieben, dass die ersten Busse von kleineren Herstellern geliefert wurden, deren Antriebssysteme mit Komponenten unterschiedlicher Zulieferer ausgestattet waren, die nicht in einer Diagnosesoftware abgebildet werden konnten. Die Einführung der ersten Brennstoffzellenbusse beschreibt ein Befragter deshalb als eine Phase des „Lernens in der Lage“. Mit dem Markteintritt großer Hersteller und zunehmenden Produktionszahlen, wird aber erwartet, dass die Diagnose über deren Herstellersoftware gehandhabt werden kann.

„[E]s war Lernen in der Lage. Wir haben am Anfang zwei Wochen Produktschulung von einem Hersteller bekommen. [...] Bei den Fahrzeugen ist es ein bisschen was anderes. Wir haben nicht ein Diagnosesystem, wie man es kennt, handelsüblich, sondern man arbeitet eigentlich sehr viel mit Entwicklungssoftware. Wenn man nicht aufpasst und nicht weiß, was man tut, dann kann man sämtliche Sachen auch stilllegen. Das ist das Spannende daran. Die Bushersteller haben einfach ihre ganzen Komponenten zugekauft. [...] Das ist alles zusammengewürfelt. Da arbeiten wir auch mit sechs oder sieben unterschiedlichen Softwareprogrammen, um einen Bus bearbeiten zu können. Bei den Bussen wird es noch lange so dauern. Ich denke mal, bis die großen Player mitspielen, wenn so ein Mercedes oder MAN einen Bus rausbringt, dann wird es wahrscheinlich über die MAN- oder Mercedes-Software gehen. Bestes Beispiel ist, wir haben [die Brennstoffzellen-Lkw], die sind seit diesem Jahr auf dem Markt in Deutschland. Da ist das Konzept natürlich ganz anders. Das sind große Konzerne, die haben schon jahrelange Erfahrung im PKW-Bereich damit. Da geht alles über diesen Tester. Da ist dann alles implementiert worden.“ (Kfz-Meister/-in Mobilität-01-03, Pos. 9)

Mit der Nutzung von Brennstoffzellenfahrzeugen gehen neue Anforderungen an die Kenntnisse und Fähigkeiten der zuständigen Fachkräfte einher, die sich über elektro- bzw. hochvolttechnische Kompetenzen hinaus insbesondere auf die Gasanlagentechnik, Wasserstoffeigenschaften, Grundlagen der Brennstoffzellentechnik und den Arbeitsschutz beziehen. Grundsätzlich müssen Fachkräfte mit der Funktion und den Zusammenhängen der Bauteile und Komponenten des Brennstoffzellen-/Gassystems vertraut sein. Allerdings handelt es sich bei einigen der wartungsintensiveren Komponenten um bekannte Technologien (z.B. Ventile, Kühlung, Filter), wodurch notwendiges Wissen teilweise adaptiert

werden kann. Hinsichtlich des Aufbaus und der elektrochemischen Prozesse innerhalb der Brennstoffzelle sollte den Befragten zufolge ein Grundverständnis vorhanden sein. Eine vertiefte Expertise ist in der Regel aber nicht erforderlich, da die Brennstoffzelle in Servicewerkstätten nicht geöffnet wird.

„Eigentlich die Überlegung, warum funktioniert das Bauteil und wie funktioniert es. [...] Da ist ein Sperrventil an den Flaschen dran, das macht auf, wenn es bestromt wird, damit Gas raus sprühen kann. Dann gibt es ein Druckreduzierventil, was von 350 bar auf irgendwo zwischen 10 und 15 bar runter reduziert, damit es halt ein Regeldruckbereich ist, für die Brennstoffzelle rein. Ein Abschaltventil gibt es. Es ist nicht so anspruchsvoll, wie man sich das immer vorstellt. Man kann vieles vom Wissen her adaptieren“ (Kfz-Meister/-in Mobilität-01-03, Pos. 43)

„[W]enn ich so in die konkreten Aufgabenbereiche sehe, was passiert denn? Ich muss Komponenten tauschen, ich muss Verschraubungen öffnen, ich muss Ventile tauschen, ich muss eine Anlage [...] spülen, ich muss sie neu befüllen lernen. Und das ist ja völlig egal, ob ich einen Toyota, Mercedes oder MAN habe. Die Logik ist die gleiche. Wie nehme ich eine Wasserstoffanlage wieder in Betrieb, wenn ich mal eine Flasche getauscht habe?“ (Kfz-Meister/-in Mobilität-01-01, Pos. 66)

Der Arbeitsschutz ist bei Arbeiten in Wasserstoff-Werkstätten von zentraler Bedeutung. Gefahrenpotenziale bestehen neben den hohen Spannungen durch die Entzündbarkeit des Wasserstoffs und durch die Drücke in den Leitungen. Die Risiken sind beherrschbar, erfordern aber Kompetenzen zur Gefahrenvermeidung. Dazu zählt insbesondere der sichere Umgang mit unter Druck stehenden Komponenten des Gassystems unter Kenntnis der spezifischen Wasserstoffeigenschaften. Stoffkenntnisse sind von besonderer Relevanz, weil sie die Grundlage sicheren Arbeitens in der Werkstatt darstellen. Kenntnisse über andere Gase lassen sich hier nicht einfach übertragen, da Wasserstoff andere Eigenschaften besitzt, wie z.B. eine höhere Flüchtigkeit, breitere Zündgrenzen, Geruchs- und Farblosigkeit und farblose Verbrennung. Ein häufig angesprochener Punkt in diesem Zusammenhang ist die Sensibilisierung der Fachkräfte. In Bezug auf Wasserstoff bestehen noch viele Sorgen und Vorbehalte, die von den Befragten aufgrund moderner Sicherheitstechnik in den Fahrzeugen und Werkstätten als nicht mehr zeitgemäß gesehen werden und die es frühzeitig abzubauen gilt. Zudem müssen Fachkräfte mit den rechtlichen Grundlagen in Bezug auf Arbeitssicherheit vertraut sein und wissen, wie sie sich im Gefahrfall (bspw. bei Gasaustritt) zu verhalten haben.

„Eigenschaften, ich muss die [Stoff-]Eigenschaften kennen. [...] Es gibt so viele Gerüchte um Wasserstoff, wie explosiv das ist und die Hindenburg und all das Zeug, das hat ja keinen Zusammenhang eigentlich mit dem, was wir jetzt machen. Wir haben ja ganz andere Tanksysteme. Aber man muss den Teilnehmern ein bisschen die Angst nehmen und ihnen auch aufzeigen, was die Eigenschaften sind. Die hohe Zündfähigkeit natürlich, dass man weiß, dass wenn ich am Gasentlassen bin oder ein Teil ersetze usw., dass ich darauf schaue, dass ich das richtige Werkzeug nehme. [...] Aber man muss sich einfach ein bisschen bewusst werden, wenn ich den Zustand des Fahrzeugs nicht kenne [...], dass ich weiß, wie ich mit dem Fahrzeug umgehe. Weil, ich sehe ja die Leckage nicht, ich rieche es nicht, ich höre es nicht.“ (Trainer/-in Weiterbildung Mobilität-00-03, Pos. 41)

„Jetzt mit den Brennstoffzellenfahrzeugen, da geht es letztendlich [...] um das Erkennen spezifischer Gefährdungsmaßnahmen im Umgang mit solchen Fahrzeugen. Und dafür sind halt Grundlagen zum Thema Wasserstoff erstmal vonnöten, weil sich daraus dann die Sicherheitsmaßnahmen ableiten lassen. Und das spielt für die Werkstätten schon eine große Rolle, weil eben für die Instandsetzung und für die Diagnose an der Wasserstofftechnologie dann doch nicht der konventionelle Erdgasantrieb herangezogen werden kann aufgrund der besonderen Eigenschaften von Wasserstoff und der Anlagen.“ (Berufsschullehrer/-in Mobilität-00-02_v2, Pos. 33)

4.1.2 Fahrzeugbau

Mit Blick auf den Fahrzeugbau muss zwischen der Fahrzeugentwicklung und Endmontage beim Hersteller und der Fertigung von Komponenten und Systemen beim Zulieferer unterschieden werden. Beim Fahrzeughersteller finden lediglich 20 bis 30 Prozent der Wertschöpfung beim Endhersteller statt. Die Fertigung des Brennstoffzellensystems wird meist von Unternehmen der Zulieferketten übernommen. Zudem muss zwischen Vor- und Nachinbetriebnahme der Fahrzeuge unterschieden werden, weil die Systeme erst am Ende der Produktionslinien mit Wasserstoff befüllt werden und unter Strom stehen (siehe auch DISPAN 2013).

Neben den oben angeführten fahrzeugtechnischen Berufen, die in Entwicklungswerkstätten, in der Montage, in Prüfständen oder für Nacharbeiten eingesetzt werden, ist in der Fahrzeug- und Zulieferindustrie auch eine Reihe produktionsbezogener Berufe zur Steuerung und Optimierung der Produktionsabläufe und zur Wartung der Produktionsanlagen gefragt. Gesucht werden laut Stellenanzeigen z.B. Elektroniker/-innen für Automatisierungstechnik, Mechatroniker/-innen, Industriemechaniker/-innen oder Verfahrensmechaniker/-innen für Beschichtungstechnik. Ob und wie Mitarbeiter/-innen bezogen auf Wasserstoffqualifiziert werden müssen, ist vom Aufgabenzuschnitt und den möglichen Berührungspunkten mit Wasserstofftechnologien abhängig. In der Praxis werden in der Regel auch Beschäftigte geschult, die nicht direkt an wasserstoffführenden Systemen arbeiten.

Hinsichtlich der notwendigen Kenntnisse, Fähigkeiten und Fertigkeiten bestehen Unterschiede gegenüber Servicewerkstätten insbesondere im Prototypen- bzw. Vorserienbau. Hier gelten höhere Arbeitsschutzanforderungen, z.B. weil die Fahrzeuge noch nicht eigensicher sind. Zudem können Spezialkenntnisse notwendig sein, wenn neue Bauteile an- oder umgebaut werden müssen, die sich auf die Funktionsweise der Fahrzeugsysteme und auf die Sicherheit am Arbeitsplatz auswirken. Im Umgang mit Wasserstoff und den notwendigen Prüfungen am Gassystem ergeben sich aber keine gravierenden Unterschiede gegenüber Servicewerkstätten. In den Qualifizierungshandreichungen der Berufsgenossenschaften sind Schulungen und Unterweisungen speziell für den Vorserienbau ausgewiesen. Diese sind aufgrund der höheren Sicherheitsanforderungen umfangreicher (vgl. DGUV 2018).

4.2 Qualifizierung und Weiterbildung

Um an Brennstoffzellenfahrzeugen arbeiten zu können, müssen Fachkräfte für Hochvolt- und Gassysteme qualifiziert werden. Die Art der Qualifikation ist von den Arbeitsaufgaben und

der damit verbundenen Gefährdungsbeurteilung abhängig. Die Verantwortung für die Qualifikation trägt der Arbeitgeber (vgl. DEUTSCHER BUNDESTAG 2015). Die zuständigen Fachkräfte in den Kfz-Betrieben werden meist nach Bedarf qualifiziert, wenn die Anschaffung von Brennstoffzellenfahrzeugen bevorsteht.

Die Berufsgenossenschaft Holz und Metall hat Qualifizierungsstufen für Hochvoltssysteme und Gasantriebe veröffentlicht, bei denen es sich um sicherheitsorientierte Qualifikationen handelt, und die in der Regel als Grundlage für die in der Wasserstoffmobilität angebotenen Schulungen und Unterweisungen dienen. Die Qualifizierungen sind nach E-Stufen (Entwicklung/Produktion) und S-Stufen (Service/Aftersales) unterteilt (siehe Tabelle 3). Weil für Arbeiten an Vorserienfahrzeugen höhere Sicherheitsanforderungen bestehen, sind die Schulungen für die E-Stufen umfangreicher. Im Falle der Gasqualifizierung kann auch eine Schulung zur Gasanlagenprüfung (GAP) absolviert werden, um das Qualifizierungsniveau zur Arbeit an Gasantrieben im Servicebetrieb (2S) zu erreichen, sofern Wasserstoff in der Schulung behandelt wurde (vgl. DGUV 2018, S. 5). Für die Hochvoltschulungen gibt es mehrere Einstiegsoptionen, die sich nach den elektrotechnischen Vorkenntnissen der Fachkräfte richten und dementsprechend unterschiedliche Inhalte und Schulungsdauern umfassen. Während die Hochvoltschulung je nach Einstieg mehrere Tage dauert, kann die Gasschulung auch an einem Tag absolviert werden (vgl. DGUV 2018; 2021).

Tabelle 3: Qualifizierungsstufen für Hochvoltssysteme und Gasantrieben nach DGUV 209-093 und DGUV FBHM-099. (vgl. DGUV 2018; 2021)

Stufe	Hochvolt	Gasantriebe
E/S	Sensibilisierte Person Bedienen von HV-Fahrzeugen	Bedienen von Fahrzeugen mit Gasantrieb
1E/1S	Fachkundig unterwiesene Person (FuP) Allg. Arbeiten am Fahrzeug	Arbeiten an Fahrzeugen mit Gasantrieb (außer Gassystem)
2E/2S	Fachkundige Person Hochvolt (FHV) Arbeiten an HV-Systemen im spannungsfreien Zustand	Arbeiten an Gassystemen
3E/3S	Fachkundige Person Hochvolt (FHV) Arbeiten an unter Spannung stehenden HV-Komponenten	Aufbau und Änderung (3E) bzw. Nachrüsten von Gassystemen (3S)

In den befragten Betrieben erhielten die Beschäftigten die Sicherheitsschulungen für Hochvolt und Gas durch einen Weiterbildungsanbieter sowie eine Produktschulung durch den Fahrzeughersteller. In einem der befragten Betriebe wurden auch jene Fachkräfte nochmals in der Hochvolttechnik geschult, die nach der aktuellen Ausbildungsordnung für

Kfz-Mechatroniker/-innen ausgebildet wurden, welche das Arbeiten an Hochvoltssystemen bereits als Mindeststandard umfasst. Hintergrund ist, dass mit Abschluss der Ausbildung zwar offiziell mindestens das Niveau 2S erreicht wurde, dieses aber häufig nicht zertifiziert wird. Die Zertifizierung spielt aber für Arbeitgeber aufgrund der Versicherungssicherheit eine wichtige Rolle, weil im Schadensfall nachgewiesen werden muss, dass die Beschäftigten ausreichend geschult oder unterwiesen wurden.

Wichtiges Qualitätskriterium für die Befragten ist der Praxisanteil in den Schulungen. Auch wenn in der Handreichung für Gasantriebe kein Praxisanteil vorgegeben ist, geben die Befragten an, dass eine reine Theorieschulung zu kurz greift. Begründet wird dies mit den Arbeitsschutzanforderungen sowie mit dem Verweis, dass ein praktischer Beruf auch praktisches Lernen erfordert. Zudem bestehen bei Betrieben, die sich dem Thema Wasserstoff annehmen, teilweise noch Unsicherheiten oder Kenntnislücken, was notwendige Schulungen und Zertifikate angeht. Hier werden mehr Transparenz und Beratung gewünscht.

4.3 Wasserstoff in der Berufsschule

Grundsätzlich wird von den befragten Berufsschullehrkräften die Herausforderung beschrieben, mit der Entwicklungsgeschwindigkeit in der Fahrzeugbranche Schritt zu halten. Dies betrifft über Elektrifizierung hinaus auch die Digitalisierung (z.B. Entertainment- und Assistenzsysteme) sowie die allgemein zunehmende Komplexität der Fahrzeuge. Im Karosseriebau wird die zunehmende Vielfalt der eingesetzten Materialien betont. Mit Blick auf die Elektromobilität bestehen den Befragten zufolge noch Verbesserungspotenziale, die sich auf die Verzahnung von Theorie und Praxis beziehen. In vielen kleineren Werkstätten gehört die Elektromobilität noch nicht zum Arbeitsalltag, wodurch das erlernte Wissen nicht immer durch regelmäßige Praxisübungen gefestigt werden kann.

*„[W]ir haben in den Prüfungen [...] festgestellt, wir haben Schüler gehabt, die vier Jahre in der Hochvolttechnik ausgebildet wurden offiziell und in der Prüfung haben sie das erste Mal ein Auto freigeschaltet. Und da haben wir gesagt, okay, da müssen wir in den Schulen, was eigentlich gar nicht unsere Aufgabe wäre, [...] mehr praktische Anteile in den Unterricht reinnehmen, als nur diese reine Theorie.“
(Berufsschullehrer/-in)*

Das Thema Wasserstoff ist noch nicht an allen Berufsschulen angekommen. Erste Schulen arbeiten aber daran, Wasserstoff-Inhalte in den Unterricht zu integrieren und Qualifizierungsangebote zu schaffen. Manche Schulen arbeiten dafür mit regionalen Wasserstoff-Initiativen und Weiterbildungsanbietern zusammen. Voraussetzung, um das Thema Wasserstoff erfolgreich vermitteln zu können, ist den Befragten zufolge, dass die notwendige Rahmenthematik der Elektromobilität bzw. Hochvolttechnik von den Schülern/Schülerinnen durchdrungen wurde. Den Schülern/Schülerinnen fällt es leichter, einen Zugang zur Wasserstoffthematik zu finden und die Unterrichtsinhalte zu erfassen, wenn die Einbettung ins Mobilitäts- und Fahrzeugsystem verstanden wurde. Zudem wird so die notwendige Grundlage geschaffen, um Wasserstoff im Laborunterricht behandeln zu können, weil für diesen bestimmte Erfahrungswerte mit elektrischen Grundgrößen vorhanden sein müssen. In einem Leuchtturmprojekt, in dem eine Gasqualifikation auf 2S-Niveau mit Wasserstoff-Spezialisierung in Zusammenarbeit mit einem

Weiterbildungsanbietern angeboten wird, wurde die Wasserstoffthematik im Lernfeld 12 des Lehrplans verortet. In Theorieeinheiten werden zunächst allgemeines Wasserstoffwissen und Sicherheitsaspekte vermittelt. Das theoretische Wissen wird dann im Labor- und Werkstattunterricht vertieft. Insgesamt werden dort ca. 12 - 14 Unterrichtsstunden für das Thema Wasserstoff aufgewandt.

„Ich habe es gemerkt, ich bin einfach mal so rein, quasi ohne vorbereitenden Unterricht, das war im zweiten Lehrjahr, da war das Thema Hochvolttechnik sehr wenig durchdrungen von den Schülern und dann auch der Bezug zum Wasserstoff überhaupt nicht so da oder die Notwendigkeit. Wenn man dann ein Lehrjahr später, im dritten dann reingeht, dann gestaltet sich das schon völlig anders und auch die Unterrichtsinhalte können viel leichter erfasst werden, weil die ganze Rahmenthematik schon viel klarer ist.“ (Berufsschullehrer/-in Mobilität-00-09, Pos. 29)

Die Berufsschulen stehen vor der Aufgabe, den wachsenden Antriebsmix in ihrem Unterricht abbilden zu müssen. Ein Befragter erwartet, dass die Berufsschulen aufgrund der Marktentwicklung von Brennstoffzellenfahrzeugen gezwungenermaßen in das Thema Wasserstoff hineinwachsen werden. Anders als in der Elektromobilität, sollten die Berufsschulen der technologischen Entwicklung aber nicht hinterherlaufen, sondern Wasserstoff frühzeitig in den Unterricht aufnehmen, um auf den Markthochlauf vorbereitet zu sein.

„Also ich denke, also das ist schon meine Hoffnung, dass die künftige Entwicklung uns Schulen einfach zwingen wird, sich des Themas anzunehmen. Wir haben ja auch die Elektromobilität nicht unbedingt so ernst genommen. Am Anfang vor 10 Jahren hat jeder gesagt, naja, lassen wir den Spinner, den Herrn Musk, das wird eh nichts, der fällt auf die Nase. Und am Ende haben wir uns alle damit auseinandersetzen müssen.“ (Berufsschullehrer/-in Mobilität-00-09, Pos. 45)

Herausforderungen für die Berufsschulen werden in den baulichen Maßnahmen gesehen, um die Fachräume wasserstofftauglich zu machen, sowie in der Beschaffung von Fahrzeugen und Unterrichtsexponaten, die mit hohen Kosten verbunden sind. Zudem sind Lehrerfortbildungen notwendig, die die verfügbaren Weiterbildungsbudgets der Schulen teilweise übersteigen.

Den Befragten zufolge wird das Thema Wasserstoff von den Schülerinnen und Schülern mit teils großem Interesse angenommen und setzt in manchen Fällen Diskussionen zur Energiewende in Gang, die über den beruflichen Bezug hinausgehen. Hier bietet die Wasserstoffthematik gute Anknüpfungspunkte, um die Auszubildenden über das aufgabenspezifische Wissen hinaus für gesellschaftliche und technologische Zusammenhänge der Energiewende zu sensibilisieren.

4.4 Ausbildung und Ordnungsmittel in fahrzeugtechnischen Berufen

Auch wenn der Verbrennungsmotor noch viele Jahre präsent sein wird, liegt die Zukunft des Mobilitätssystems und der fahrzeugtechnischen Berufe in der Elektromobilität. Mit den Neuordnungen der Berufsausbildungen „Kraftfahrzeugmechatroniker/-in“ (2013) und „Karosserie- und Fahrzeugbaumechaniker/-in“ (2014 und 2023) wurde die Hochvolttechnik

als Ausbildungsstandard verankert. So wurden frühzeitig die qualifikatorischen Grundlagen geschaffen, um die Kfz-Berufe auf die Elektromobilität vorzubereiten. In den Interviews wird betont, dass es im Beruf „Kraftfahrzeugmechatroniker/-in“ heute wichtig ist, mehr Personen im Schwerpunkt System- und Hochvolttechnik auszubilden und bei Ausbildungsbetrieben für den Schwerpunkt zu werben. Dabei wird häufig auf die Ausbildungsdauer verwiesen. Auszubildende erhalten nach dreieinhalb Jahren den Gesellenbrief, die Zahl der Elektrofahrzeuge nimmt aber schnell zu, was in absehbarer Zeit zu einem deutlich veränderten Fahrzeugmarkt führen wird und eine vorausschauende Ausbildung umso wichtiger macht. Wie umfassend Auszubildende im Bereich Elektromobilität ausgebildet werden, hängt stark davon ab, ob Elektrofahrzeuge bereits zum Arbeitsalltag im Ausbildungsbetrieb gehören, was in kleineren Betrieben nicht immer der Fall ist.

Die für Wasserstoffantriebe notwendige Gasqualifikation ist kein standardmäßiger Teil der Kfz-Ausbildung. Ob Wasserstoff in der Ausbildung vorkommt, hängt von der Initiative des Ausbildungsbetriebs und der Berufsschule ab. Seitens der Befragten wird aber die Relevanz gesehen, das Thema Wasserstoff insbesondere in der Nutzfahrzeugtechnik und im Schwerpunkt System- und Hochvolttechnik vermehrt zu behandeln. Die Auszubildenden sollten den Befragten zufolge bereits ein Grundverständnis des Stoffs und der Brennstoffzellentechnologie vermittelt bekommen und die Rolle von Wasserstoff im zukünftigen Mobilitätssystem verstehen. Auch hier wird argumentiert, dass der sich rasch wandelnde Fahrzeugmarkt eine zukunftsgerichtete Ausbildung erfordert.

„Das muss jetzt nicht mega breitgetreten werden, aber ich finde, dass gerade wenn jetzt Leute in der Nutzkraftfahrzeugausbildung sind [...], dass man dann schon sagt, da sollte man vielleicht mal ein, zwei Schulungseinheiten oder ein, zwei Schultage [...] daran verbringen, wirklich mal zu sagen, wo sind denn da die Gefahren, wo sind denn da aber auch die Vorteile. Und dass man das den Leuten so ein bisschen nahebringt, weil ich glaube, die Technik ist vielen gar nicht bekannt.“ (Kfz-Meister/-in, Mobilität-01-02, Pos. 49)

In der Frage, ob eine Gasqualifikation explizit in der Ausbildungsordnung verankert werden sollte, gehen die Meinungen auseinander. Ein Teil der Befragten würde eine Integration auf dem Niveau 2S (Arbeiten an Gasantrieben von Serienfahrzeugen nach DGUV, s. oben) befürworten. Dies wird insbesondere mit dem Wunsch begründet, dass ausgebildete Kfz-Fachkräfte in der Lage sein sollten, an allen auf dem Markt verfügbaren Antriebsarten zu arbeiten. Andere Befragte halten eine technologieoffenere Formulierung für sinnvoller, da sie den Ausbildungsbetrieben die Entscheidung überlässt. Hier wird argumentiert, dass unter Umständen nur ein kleiner Anteil der Kfz-Fachkräfte künftig an Wasserstofffahrzeugen arbeiten wird, weswegen die Verankerung einer entsprechenden Gasqualifikation als allgemeiner Ausbildungsstandard zu weit gehen würde.

4.4.1 Kraftfahrzeugmechatroniker/-in

Der Ausbildungsberuf „Kraftfahrzeugmechatroniker/-in“ ist mit 20.751 neuen Auszubildenden im Jahr 2022 nicht nur der zahlenmäßig wichtigste fahrzeugtechnische Beruf, sondern auch der beliebteste Ausbildungsberuf unter männlichen Jugendlichen (vgl. BIBB 2024b). Kfz-Mechatroniker/-innen arbeiten in der Fahrzeugindustrie und Servicewerkstätten in der Planung, Wartung, Prüfung, Diagnose, Instandsetzung und

Umrüstung von Fahrzeugen. Die Ausbildung gliedert sich in einen übergreifenden Teil und die fünf Schwerpunkte Personenkraftwagentechnik, Nutzfahrzeugtechnik, Motorradtechnik, System- und Hochvolttechnik und Karosserietechnik. Mit der im Jahr 2013 erfolgten Neuordnung wurde das Arbeiten an Hochvoltssystemen im spannungsfreien Zustand schwerpunktübergreifend in der Ausbildungsordnung verankert. Mit dem Schwerpunkt System- und Hochvolttechnik wurde eine Spezialisierungsmöglichkeit für die Elektromobilität geschaffen, die auch das Arbeiten an Hochvoltssystemen unter Spannung umfasst (vgl. BUNDESGESETZBLATT 2013a). Eine Gasqualifikation ist kein expliziter Ausbildungsstandard. In der Ausbildungsordnung heißt es lediglich, dass explosionsgefährliche Gase zu beachten sind, wenn fahrzeugtechnische Systeme in einen arbeitssicheren Wartungs- und Reparaturzustand versetzt werden. Brennstoffzellen werden in der Ausbildungsordnung ebenfalls erwähnt, allerdings nur mit dem Hinweis, dass elektrotechnische Sicherheitsregeln beim Arbeiten an diesen zu beachten sind (vgl. ebd.).

Tabelle 4: Auszug aus der Ausbildungsordnung für Kraftfahrzeugmechatroniker/-innen. (vgl. BUNDESGESETZBLATT 2013a)

Teil des Ausbildungsberufsbilds	Fertigkeiten, Kenntnisse und Fähigkeiten
Außer Betrieb nehmen und in Betrieb nehmen von fahrzeugtechnischen Systemen (§ 4 Absatz 3 Nummer 2)	a) herstellerspezifische Vorgaben, Sicherheitsvorschriften und Schutzmaßnahmen, insbesondere Normen und Vorschriften für das elektrotechnische Arbeiten an Hochvoltfahrzeugen sowie Unfallverhütungsvorschriften und Regeln der Technik, anwenden b) erhöhtes Gefährdungspotenzial an Fahrzeugen erkennen c) Sicherheitsvorgaben für Hochvoltssysteme beachten und Arbeitsbereich sichern d) Systeme nach Arbeitsanweisung spannungsfrei schalten, gegen Wiedereinschalten sichern, Spannungsfreiheit feststellen e) Funktionen überprüfen und Ergebnisse dokumentieren f) elektrotechnische Gefahren beurteilen und analysieren g) fahrzeugtechnische Systeme in arbeitssicheren Wartungs- und Reparaturzustand versetzen, insbesondere deren explosionsgefährliche Stoffe, Treibstoffe, Gase, Flüssigkeiten sowie elektrische Spannungen beachten

4.4.2 Karosserie- und Fahrzeugbaumechaniker/-in

Beim Beruf „Karosserie- und Fahrzeugbaumechaniker/-in“ handelt es sich um einen dreieinhalbjährigen Ausbildungsberuf mit 1.149 neu abgeschlossenen Verträgen im Jahr 2022 (vgl. BIBB 2024a). Karosserie- und Fahrzeugbaumechaniker/-innen arbeiten bei Herstellern von Serien- und Sonderfahrzeugen oder in Betrieben der Fahrzeuginstandhaltung. Die Berufsausbildung gliedert sich in einen fachrichtungsübergreifenden Teil und die drei Fachrichtungen Karosserieinstandhaltungstechnik, Karosserie- und Fahrzeugbautechnik und Caravan- und Reisemobiltechnik. Die letztgenannte Fachrichtung wurde mit der im Jahr 2023 erfolgten Neuordnung hinzugefügt. Zudem wurde das Arbeiten an Hochvoltssystemen unter Spannung als Zusatzqualifikation (ZQ) verankert (vgl. BUNDESGESETZBLATT 2023). Das Arbeiten an HV-Systemen im spannungsfreien Zustand war schon zuvor fachrichtungsübergreifender Teil des Berufsbilds. Insgesamt werden alternative Antriebe und elektrotechnische Tätigkeiten in der

neuen Ausbildungsordnung stärker betont. Die für die Arbeit an Brennstoffzellenfahrzeugen grundsätzlich erforderlichen HV-Qualifizierungen sind in den Ordnungsmitteln somit vorhanden. Zwar wird in der Ausbildungsordnung auf die Beachtung explosionsfähiger Gase bei Reparaturarbeiten verwiesen, von einer expliziten Integration einer Gasqualifikation oder einem Verweis auf Wasserstoff wurde in der Neuordnung aber abgesehen. Stattdessen wurde mit „Nieder- und Hochvoltsysteme, alternative Antriebe und Energiegewinnungsanlagen“ (ebd.) eine technologieoffene Formulierung gewählt.

Tabelle 5: Auszug aus der Ausbildungsordnung für Karosserie- und Fahrzeugbaumechaniker/-innen. (vgl. BUNDESGESETZBLATT 2023)

Berufsbildposition	Fertigkeiten, Kenntnisse und Fähigkeiten
Außerbetriebnehmen und Inbetriebnehmen von fahrzeugtechnischen Systemen (§ 4 Absatz 2 Nummer 2)	a) Vorschriften, insbesondere Normen, Herstellervorgaben, Sicherheitsbestimmungen und Schutzmaßnahmen für das elektrotechnische Arbeiten an Hochvoltfahrzeugen sowie Unfallverhütungsvorschriften und allgemein anerkannte Regeln der Technik, umsetzen b) Gefährdungspotenziale an Fahrzeugen erkennen sowie Sicherheitsbestimmungen einhalten c) Sicherheitsregeln für Hoch- und Niederspannungssysteme beachten und Arbeitsbereich sichern d) Systeme nach Arbeitsanweisung spannungsfreischalten, gegen Wiedereinschalten sichern, Spannungsfreiheit feststellen e) elektrotechnische Gefahren analysieren und bewerten f) fahrzeugtechnische Systeme in arbeitssicheren Wartungs- und Reparaturzustand versetzen, insbesondere ihre explosionsgefährlichen Stoffe, Treibstoffe, Gase, Flüssigkeiten und elektrische Spannungen beachten g) Bauteile, Baugruppen, Systeme und Anlagen, insbesondere Klimaanlage, elektrische Anlagen, pneumatische, hydraulische und pyrotechnische Systeme, nach Herstellervorgaben in Betrieb nehmen, Funktionen überprüfen h) Hochvolt-, Energieversorgungs- und Energiemanagementsysteme sowie alternative Antriebsarten prüfen und in Betrieb nehmen i) Gesamtfunktion prüfen, Systeme und Anlagen in Betrieb nehmen, Sicherheitsbestimmungen beachten j) Ergebnisse dokumentieren

4.4.3 Land- und Baumaschinenmechatroniker/-in

Beim Beruf „Land- und Baumaschinenmechatroniker/-in“ handelt es sich um einen dreieinhalbjährigen Ausbildungsberuf mit 2.907 neu abgeschlossenen Verträgen im Jahr 2022 (vgl. BIBB 2024c). Land- und Baumaschinenmechatroniker/-innen arbeiten häufig bei Maschinenherstellern, land- oder bauwirtschaftlichen Großbetrieben oder Händlern mit Werkstattbetrieb. Ein großer Teil der Tätigkeit findet im Außenbetrieb auf dem Feld oder der Baustelle statt. Berufsprofilgebende Tätigkeiten sind z.B. das Warten, Prüfen, Installieren und Instandsetzen von Fahrzeugen, Maschinen, Anlagen und Geräten, das Diagnostizieren von Fehlern in mechanischen, hydraulischen und elektronischen Systemen oder das Bearbeiten und Fügen von Bauteilen (vgl. BIBB n.d.). Auf den Beruf der Land- und Baumaschinenmechatroniker/-innen wirken umfangreiche technische Veränderungen ein,

die kontinuierliche Kompetenzerweiterung und eine hohe Lern- und Anpassungsfähigkeit von den Fachkräften verlangen.

Grundsätzlich werden Land- und Baumaschinen durch mehr Elektronik, Hydraulik und Sensorik-basierte Assistenzsysteme immer komplexer (vgl. RAMM 2022, 34ff.). Ein wichtiger Veränderungstreiber in der Land- und Bautechnik ist die Digitalisierung. Die Maschinen und Anlagen der Land- und Bautechnik sind zunehmend vernetzt und digital in die Wertschöpfungskette integriert, woraus sich Bedarfe für IT-Anwenderkenntnisse und für Kompetenzen im Umgang mit wachsenden Datenmengen ergeben (vgl. RANFT/ZINKE 2019, S. 62ff.). Das Thema alternative Antriebe bzw. Antriebselektrifizierung gewinnt in der Land- und Bautechnik ebenfalls an Beachtung, allerdings nicht mit derselben Geschwindigkeit und denselben technologischen Entwicklungslinien wie im Kfz-Gewerbe. Zwei Erhebungen unter Lernenden und Absolvierenden der Landbautechnik zufolge, spielen alternative Antriebe bislang noch eine deutlich untergeordnete Rolle in der betrieblichen Praxis (vgl. RAMM 2022, S. 23; RANFT/ZINKE 2019, S. 49). Qualifizierungen für Hochvolttechnik und Gassysteme sind in der Ausbildungsordnung nicht explizit verankert (vgl. BUNDESGESETZBLATT 2014). Diskussionen um die Erweiterung der Ausbildungsinhalte im Beruf „Land- und Baumaschinenmechatroniker/-in“ sind auch häufig von der Frage begleitet, ob das Berufsbild damit überfrachtet wird.

Tabelle 6: Auszug aus der Ausbildungsordnung für Land- und Baumaschinenmechatroniker/-innen. (vgl. BUNDESGESETZBLATT 2014)

Teil des Ausbildungsberufsbilds	Fertigkeiten, Kenntnisse und Fähigkeiten
Instandsetzen von Fahrzeugen, Systemen und Betriebseinrichtungen (§ 3 Absatz 2 Nummer 17)	a) Verschleißteile nach Wartungs- und Instandhaltungsplänen im Rahmen der vorbeugenden Instandhaltung austauschen b) Bauteile, Baugruppen und Anlagen unter Beachtung ihrer Funktionen auch mit Hilfe von Hebezeugen und Montagehilfen demontieren und hinsichtlich Lage und Funktion kennzeichnen c) Bauteile, Baugruppen und Anlagen instand setzen, insbesondere an Motoren und deren Aggregaten, Kraftübertragungssystemen, Fahrwerken, Lenk- und Bremssystemen d) Kühl-, Lüftungs-, Pumpen- und Heizsysteme instand setzen e) elektrisch und elektronisch betätigte Einrichtungen sowie Kontrolleinrichtungen instand setzen f) im Rahmen der Instandsetzung Einzelfunktionen prüfen g) Bauteile, Baugruppen und Anlagen montieren h) Gesamtfunktion im Betriebszustand prüfen, einstellen und Ergebnisse dokumentieren

4.5 Exkurs: Brennstoffzellenproduktion

Die Produktion der Brennstoffzellensysteme findet überwiegend bei Unternehmen der Zulieferketten statt. Die zentralen Schritte in der Brennstoffzellenfertigung sind das Herstellen der Katalysatorlegierung, das Herstellen und Beschichten der Membran (CCM) und die anschließende Konfiguration der Membran-Elektrolyt-Einheit (MEA) aus CCM und Gasdiffusionsschichten (GDL) sowie das Zusammenfügen mit den Bipolarplatten (BPP).

Anschließend werden mehrere hundert Brennstoffzellen zu einem Stack verpresst. Dieser wird mit den Subsystemen zum Brennstoffzellensystem montiert und dieses final getestet (vgl. FÜHREN u. a. 2022). Ein brancheneinheitlicher Produktionsprozess besteht bisher nicht. Genutzte Materialien und produktionstechnologische Verfahren können sich je nach Hersteller und Anwendungskontext unterscheiden. Aktuell findet die Brennstoffzellenproduktion in Deutschland noch im Rahmen flexibel anpassbarer Fertigungsprozesse mit kleinen Stückzahlen statt (vgl. SIEBEL 2022). Zulieferunternehmen befinden sich aber in Vorbereitung der Serienproduktion, die hochautomatisiert ablaufen soll.

In der Serienproduktion werden vor der Inbetriebnahme des Brennstoffzellensystems automatisierte Produktionsschritte und einfache Montagetätigkeiten überwiegen. Das Brennstoffzellensystem steht erst in den Testschritten unter Spannung und wird mit Wasserstoff befüllt. Die möglichen Berührungspunkte mit Wasserstoff und unter Spannung stehenden Hochvoltkomponenten des Brennstoffzellensystems entlang des Produktionsprozesses sind deshalb überschaubar. Für die Instandhaltung der Produktionsanlagen, die Begleitung des Produktionsprozesses und das Testen der Brennstoffzellensysteme werden in erster Linie Fachkräfte mit elektrotechnischer Ausbildung gesucht. An der Herstellung der Katalysatorlegierung sind zudem auch Chemikant/-innen in geringer Zahl beteiligt. Für vergleichsweise einfache Montagetätigkeiten am Brennstoffzellensystem vor Inbetriebnahme wird keine spezielle Ausbildung benötigt.

Für die Arbeitsaufgaben, in denen sich Berührungspunkte mit hohen Spannungen und Wasserstoff ergeben können (z.B. Teststände, Prototypenbau, Prüfung von Rückläufern), sind vertiefte Kenntnisse und Fähigkeiten in Bezug auf Hochvoltssysteme, Stoffeigenschaften, unter Druck stehende Gassysteme und Brennstoffzellen erforderlich. Die dafür notwendigen Qualifikationen sind denen in Kfz-Berufen sehr ähnlich. Die Betrachtung der Stellengesuche der Hersteller zeigt auf, dass für die Qualifizierung der Beschäftigten teilweise auch die Handreichungen und Qualifizierungsstufen der Berufsgenossenschaften für die Fahrzeugindustrie herangezogen werden.

4.6 Ausblick: Binnenschifffahrt

4.6.1 Technologischer Wandel

Die Umstellung auf alternative Kraftstoffe in der Schifffahrt ist ein wichtiger Schritt zur Dekarbonisierung des weltweiten Güter- und Personenverkehrs. Rund 70 Prozent der gehandelten Güter werden über den Seeweg transportiert. Im Jahr 2018 entfielen auf Hochsee-, Binnen- und Fischereischifffahrt insgesamt 1,056 Mio. Tonnen CO₂-Emissionen (vgl. IMO 2020). Zur hohen Umweltbelastung in der Schifffahrt tragen insbesondere die schadstoffreichen Schweröle bei (vgl. UMWELTBUNDESAMT 2022).

In der Hochseeschifffahrt werden in erster Linie synthetische Kraftstoffe als Antriebsalternativen diskutiert. Aufgrund seiner Energiedichte und seiner vorteilhaften Transport- und Lagereigenschaften wird vor allem grünes Methanol als aussichtsreiche Kraftstoffalternative angeführt (vgl. ZERTA u. a. 2023, 41ff.). Die Direktnutzung von Wasserstoff als Antriebslösung spielt in der maritimen Schifffahrt nur für küstennahe

Fahrten auf kurzen Strecken eine Rolle. Allerdings können Brennstoffzellen zur Versorgung von Hilfssystemen auf Schiffen genutzt werden, um den sonst aus Dieselaggregaten gewonnene Strom zum Betrieb von Bordnetzen oder der Hotellerie auf Kreuzfahrtschiffen zu ersetzen (vgl. ebd., 30f.).

Die Küsten- und Binnenschifffahrt in Deutschland emittierte 2023 rund 1,4 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalente (vgl. UMWELTBUNDESAMT 2024). Von den in Deutschland zugelassenen Schiffen sind 67 Prozent Fracht- und Fahrgastschiffe. Den Rest machen Fähren, Schuten und Schub-/Schubschleppboote und Bunkerboote aus (vgl. WSV 2022). Aufgrund der geringeren Energiebedarfe bieten sich in der Binnenschifffahrt bessere Anwendungsmöglichkeiten für die Direktnutzung von Wasserstoff im Antrieb. Brennstoffzellen werden aktuell in vereinzelt Forschungs- und Entwicklungsprojekten als Antriebsoption für Binnenschiffe erprobt. Bislang befindet sich mit der ELEKTRA aber lediglich ein Schubboot mit Brennstoffzellenantrieb in Betrieb (vgl. E4SHIPS n.d.).

4.6.2 Berufe und Qualifikationen

Die Binnenschifffahrt stellt hinsichtlich ihrer Arbeitsstrukturen eine Besonderheit dar, weil Schiffsbetrieb und -instandhaltung an Bord häufig von den gleichen Person ausgeführt werden. Binnenschifffahrtsskapitäne/Binnenschifffahrtsskapitäninnen und Binnenschiffer/-innen werden sowohl für die Vorbereitung und Durchführung der Fahrten wie auch für das Erkennen und Beheben von Störungen am Schiffskörper und am Motor ausgebildet. Die Umstellung vom Verbrennungsmotor auf einen Brennstoffzellen-Elektroantrieb würde einen umfassenden technologischen Wandel bedeuten, der neue Kompetenzbedarfe nach sich zieht. Wie auch in anderen Anwendungsfeldern von Brennstoffzellen werden Fachkenntnisse der Elektro- und der Gastechnik für Wartungs- und Instandsetzungsarbeiten entscheidend sein. Das stark auf mechanische Anlagen ausgerichtete Kompetenzspektrum der Binnenschiffer/-innen und Binnenschifffahrtsskapitäne/Binnenschifffahrtsskapitäninnen würde sich somit deutlich erweitern. Die geführten Gespräche haben zudem gezeigt, dass Fachkräfte im Schiffsbetrieb auch stärker für das Thema Energiemanagement sensibilisiert werden müssen, weil das optimale Verhältnis aus Geschwindigkeit und Energieverbrauch mit der Nutzung alternativer Antriebe eine größere Rolle spielt. Die Antriebselektifizierung in der Schifffahrt wirft auch Fragen nach möglichen Veränderungen der Arbeitsteilung zwischen Instandhaltungspersonal an Bord und an Land auf. Beispielsweise kann die Fehlersuche am Antriebssystem in Zukunft zunehmend über Fernwartungen erfolgen und spezielle Instandsetzungsarbeiten können nicht mehr vom Bordpersonal durchgeführt werden. Mit fortschreitender Anwendung von Brennstoffzellenantrieben in der Binnenschifffahrt sollten die Veränderungen von Arbeitsstrukturen und Qualifizierungsbedarfen nochmal tiefergehend untersucht werden, um Handlungsbedarfe für die Praxis und die Ordnungsarbeit der Berufsbildung zu prüfen. Bei Anwendung von synthetischem Schiffsdiesel sind hingegen keine Qualifikationsveränderungen zu erwarten, weil dieser bereits heute in modernen Verbrennungsmotoren eingesetzt werden kann.

Tabelle 7: Auszug aus der Ausbildungsordnung für Binnenschiffer/-innen. (vgl. BUNDESGESETZBLATT 2022)

Berufsbildpositionen	Fertigkeiten, Kenntnisse und Fähigkeiten
----------------------	--

Prüfen und Instandsetzen von mechanischen und technischen Anlagen sowie von Schiffsmotoren (§ 4 Absatz 2 Nummer 7)	a) Fehler und Störungen eingrenzen und lokalisieren, insbesondere durch Funktionskontrollen und unter Berücksichtigung des Aufbaus von Anlagen und Motoren sowie unter Berücksichtigung von Herstellerunterlagen b) Leckagen an Kühlwasser-, Treibstoff- und Ölleitungen sowie an Druckluftleitungen beheben c) konfektionierte Kühlwasser-, Treibstoff- und Ölleitungen wechseln und nach Herstellerangaben entlüften d) Leitungen, Relais und Ventile von Druckluftsystemen wechseln e) Räder und Kugellager von Rolllukendächern wechseln f) Bauteile und Baugruppen unter Berücksichtigung ihres Aufbaus und ihrer Funktionsweise demontieren, zum Transport sichern und transportieren g) Bauteile und Baugruppen durch manuelles Spanen und Trennen bearbeiten h) Montage vorbereiten und Ausrüstungsteile unter Berücksichtigung der Schiffskonstruktion und sicherheitsrelevanter Vorgaben montieren, insbesondere durch Bohren, Gewindeschneiden, Schleifen, Trennen und Verbinden i) Funktionalität nach durchgeführten Maßnahmen zur Behebung von Störungen überprüfen j) durchgeführte Sichtprüfungen, Kontrollen und Maßnahmen dokumentieren k) Gesundheits- und Umweltschutz sowie Nachhaltigkeit bei der Durchführung von Instandsetzungsarbeiten sicherstellen l) Bedarfe an Betriebs- und Hilfsstoffen feststellen, deren Beschaffung organisieren sowie Lieferungen annehmen und zur Rechnungsstellung prüfen
--	--

4.7 Ausblick: Luftfahrt

4.7.1 Technologischer Wandel

Die Dekarbonisierung des Flugverkehrs ist eine der größten Herausforderungen für die Klimawende. Bis zum Covid-19-bedingten Einbruch war der internationale Flugverkehr der am stärksten wachsende Verursacher von Treibhausgasemissionen unter den Verkehrssektoren. Im Jahr 2019 entfielen 3,8 Prozent der EU-weiten Emissionen auf den nationalen und internationalen Flugverkehr (vgl. EUROPÄISCHES PARLAMENT 2022).

Regenerativ erzeugtes Kerosin in Kombination mit effizienter Triebwerkstechnologie bietet eine Perspektive für klimaneutrales Fliegen auf längeren Strecken. Die Direktnutzung von Wasserstoff in Verbrennungsmaschinen oder Brennstoffzellenantrieben von kleineren Flugzeugen wird insbesondere für den Einsatz auf Regional- und Kurzstrecken erforscht. Während für die Nutzung von synthetischem Kerosin nur geringfügige Anpassungen der Triebwerke und Infrastruktur notwendig sind, erfordert die Direktnutzung von Wasserstoff neue Tanksysteme, Gastriebwerke und Flugzeugkonzepte (vgl. DLR 2021). Von einer kommerziellen Anwendung wasserstoffbetriebener Flugzeuge ist die Luftfahrtindustrie aktuell noch weit entfernt. Entsprechende Technologien und innovative Flugzeugtypen werden im Rahmen von Forschungsprojekten entwickelt und erprobt. Große Flugzeugbauer und einzelne Start-Ups arbeiten daran, Wasserstoffantriebe für den Flugverkehr zu kommerzialisieren (vgl. AIRBUS 2022).

4.7.2 Berufe und Qualifikationen

Große Technologiesprünge erfolgen in der Luftfahrt mit der Einführung neuer Flugzeugmodelle bzw. -typen, weswegen die Entwicklungszyklen deutlich länger sind als in anderen Industrien. Um den hohen Sicherheitsstandards gerecht zu werden, müssen neue Technologien Langzeiterprobungen und zahlreiche Maximaltests durchlaufen und für die Luftfahrt zertifiziert sein. Gleiches gilt für die Produktion, wo die Anpassung der Prozesse aufgrund von Neuberechnungen, Simulationen und Zertifizierungen sehr lange dauern kann. Die Aufgabenprofile der Fachkräfte im Flugzeugbau sind in der Regel klar definiert und Sicherheitskonzepte sehen bestimmte Qualifikationen und Qualitätsnachweise vor, um Aufgaben und Aufträge ausführen zu dürfen. Mit der Einführung neuer Technologien in der Produktion werden neue Fertigungsanweisungen erstellt, in denen die notwendigen Arbeitsschritte sehr detailliert beschrieben sind.

Ausbildungsberufe für den Flugzeugbau sind in erster Linie Fluggerätmechaniker/-innen und Fluggerätelektroniker/-innen. Der Beruf Fluggerätmechaniker/-in gliedert sich in die Fachrichtungen Instandhaltungstechnik, Triebwerkstechnik und Fertigungstechnik. Mit der Neuordnung 2013 wurden die beiden Berufe inhaltlich stärker angenähert. Zudem werden im Flugzeugbau je nach Unternehmen Ausbildungsberufe wie z.B. Mechatroniker/-in und Verfahrensmechaniker/-in für Beschichtungstechnik für Produktionstätigkeiten ausgebildet. Die Auszubildenden durchlaufen in ihrer Ausbildung verschiedene Produktionsbereiche und werden gegen Ende ihrer Ausbildung einem Produktionsbereich zugeordnet. Neue Technologien werden meist über die dazugehörigen Fertigungsanweisungen in die Ausbildung integriert. Aktuell spielt Wasserstoff in der flugzeugtechnischen Ausbildung noch keine Rolle. Wenn Wasserstofftechnologien tatsächlich im Flugverkehr eingesetzt werden, wird es voraussichtlich Grundschulungen geben und darauf aufbauende Spezifikationen in den einzelnen Produktionsbereichen. Mögliche Qualifizierungs- und Anpassungsbedarfe durch Wasserstoff sollten im Zuge fortgeschrittener Entwicklungen noch einmal tiefergehend geprüft werden. Allerdings sind die Ausbildungsordnungen in flugtechnischen Berufen bereits sehr offen gestaltet, sodass ein akuter Neuordnungsbedarf durch Veränderungen von Antriebs- und Speichertechnologien unwahrscheinlich ist.

Tabelle 8: Auszug aus der Ausbildungsordnung Fluggerätmechaniker/-in (fachrichtungsübergreifend). (vgl. Bundesgesetzblatt 2013b)

Teil des Ausbildungsberufsbilds	Fertigkeiten, Kenntnisse und Fähigkeiten
Montieren und Demontieren von Geräten, Baugruppen und Systemen (§ 4 Absatz 3 Nummer 3)	a) Standard- und Spezialwerkzeuge, Prüf- und Messgeräte unterscheiden und unter Beachtung der Richtlinien des Werkzeug und Betriebsmittelmanagements handhaben b) Werkstoffe, Geräte, Baugruppen und Systeme unter Beachtung deren Funktion und Eigenschaften handhaben c) elektrische und mechanische Verbindungen nach Eigenschaften und Funktionen unterscheiden, herstellen und sichern d) Aufbau von elektrischen, pneumatischen und hydraulischen Leitungen und deren Verlegungsarten unterscheiden

	e) Bauteile, insbesondere aus luftfahrtspezifischen Werkstoffen, formen f) Montage- und Demontagetechniken anwenden und Bauteile anpassen g) Bauteile, Geräte, Baugruppen und Systeme zur Lagerung und zum Transport vorbereiten h) Funktion von Potenzialausgleichsleitern prüfen und beurteilen i) Übergangswiderstände messen und beurteilen; Isolationswiderstände beachten j) Einbauorte identifizieren, Bauteile und Geräte einmessen und ausrichten
Durchführen von Funktionsprüfungen und Einstellarbeiten (§ 4 Absatz 3 Nummer 4)	a) Test- und Prüfgeräte anwenden b) Funktionsprüfungen an Baugruppen, Systemen und Fluggerät nach Beanstandung, Fertigung und Instandhaltung durchführen c) Einstellarbeiten an Baugruppen, Systemen und Fluggerät nach Fertigung und Instandhaltung durchführen
Instandhaltung (§ 4 Absatz 3 Nummer 5)	a) Inspektions-, Wartungs-, Instandsetzungs- und Modifikationsarbeiten nach Instandhaltungsunterlagen an luftfahrzeug- und typenspezifischen Systemen durchführen b) Bauteile, Geräte und Baugruppen mit begrenzter Lebensdauer kontrollieren c) Fehlersuche und Überprüfungen an luftfahrzeug- und typenspezifischen Systemen durchführen

5 Diskussion

5.1 Ausbildungsberufe und Weiterbildungsstrategien

Im Vergleich zu anderen Anwendungsfeldern sind Wasserstoffaktivitäten im Straßenverkehr bereits weiter fortgeschritten. Ausbildungsberufe mit hoher Bedeutung für den Wasserstoffhochlauf im Mobilitätssektor sind Kraftfahrzeugmechatroniker/-in, Karosserie- und Fahrzeugbaumechaniker/-in und Land- und Baumaschinenmechatroniker/-in, weil diese für die Arbeit an Antriebssystemen ausgebildet werden. Aber auch ausgebildete Fachkräfte die allgemeine Arbeiten am Fahrzeug ausführen, wie z.B. Fahrzeuglackierer/-innen oder Fahrzeuginterieur-Mechaniker/-innen müssen mit der neuen Technologie und dem neuen Stoff insoweit vertraut sein, dass ein sicheres Arbeiten gewährleistet ist. Entlang der Wertschöpfungskette von Brennstoffzellenfahrzeugen kommt bei Fahrzeugherstellern und Zulieferern eine Reihe weiterer produktionsbezogener Berufe zum Einsatz – hier sind in erster Linie industrielle Metall- und Elektroberufe zu nennen – die ebenfalls entsprechend der jeweiligen Technologien und Arbeitsaufgaben qualifiziert werden müssen. Hinsichtlich der Weiterbildungsstrategien kann festgehalten werden, dass Fachkräfte im Kfz-Gewerbe aktuell nach Bedarf und nicht „auf Vorrat“ für Wasserstoff qualifiziert werden. In den meisten Betrieben erhalten die Fachkräfte Sicherheitsschulungen für Hochvolttechnik und Gasantriebe mit Wasserstoff-Spezialisierung durch einen Weiterbildungsanbieter und eine

Produktschulung durch den Fahrzeughersteller. Die Berufsgenossenschaften haben Handreichungen mit Qualifizierungsstufen zur Verfügung gestellt, die als Grundlage für die angebotenen Sicherheitsschulungen dienen. Weiterbildungsstrategien und rechtliche Regularien sind somit bereits etabliert, aber die Qualifizierungsangebote werden mit fortschreitender Marktentwicklung von Brennstoffzellenfahrzeugen ausgebaut werden müssen.

5.2 Qualifikationsbedarfe und Ordnungsmittel

Mit der Einführung von Brennstoffzellenfahrzeugen sind aufseiten der zuständigen Fachkräfte neue Anforderungen an Kenntnisse, Fertigkeiten und Fähigkeiten verbunden, die sich insbesondere auf die Themen Hochvolttechnik, Gastechnik, Stoffkenntnisse und Grundlagen der Brennstoffzellentechnologie beziehen, wobei der Arbeits- und Gesundheitsschutz eine hohe Relevanz hat. Sofern die zuständigen Fachkräfte noch nicht für die Arbeit an Elektrofahrzeugen qualifiziert wurden, ist dies der größte Qualifizierungsschritt hin zum Wasserstoff, weil mit der Elektromobilität ein grundlegender Wandel der Arbeitsaufgaben und eine deutliche Erweiterung der notwendigen Kompetenzen verbunden ist. Hochvoltqualifizierungen wurden in den Berufen „Kraftfahrzeugmechatroniker/-in“ und „Karosserie- und Fahrzeugbaumechaniker/-in“ im Zuge der vergangenen Neuordnungen bereits als Ausbildungsstandard verankert. Eine Gasqualifikation ist nicht Teil der Mindeststandards in Kfz-Berufen. Zwar haben die Befragungen gezeigt, dass Wasserstoffinhalte insbesondere in der Nutzfahrzeugtechnik stärker in der Ausbildung berücksichtigt werden sollten, ein möglicher Anpassungsbedarf der Ordnungsmittel wird aber unterschiedlich bewertet. Während manche der Befragten den Bedarf sehen, eine Gasqualifikation als Ausbildungsstandard zu integrieren, ziehen andere Befragte eine technologieoffene Formulierung vor, die den Betrieben mehr Entscheidungsfreiheit gibt. Somit lässt sich auf Grundlage der vorliegenden Befragungsergebnisse keine abschließende ordnungspolitische Handlungsempfehlung formulieren. Ob die Integration entsprechender Inhalte in den Ordnungsmitteln sinnvoll ist, sollte aber im Zuge künftiger Neuordnungen geprüft werden. In den Feldern Schiffs- und Flugverkehr werden durch den Einsatz von Brennstoffzellenantrieben ebenfalls neue Qualifizierungsbedarfe entstehen, die sich auf ähnliche Themenfelder wie in der Fahrzeugbranche beziehen. Konkrete Aussagen zu möglichen Qualifikationsentwicklungen sind zum jetzigen Zeitpunkt schwierig, weil sich alternative Antriebe in der Schifffahrt und dem Flugverkehr noch in der Entwicklungsphase befinden und weil schwer abzusehen ist, welche Technologie langfristig in welchem Umfang angewandt wird.

5.3 Praxisunterstützende Maßnahmen

Angesichts des rasch voranschreitenden Wandels im Mobilitätssektor ist es umso wichtiger, zukunftsrelevante Technologien frühzeitig in der Ausbildung aufzugreifen und die Lernenden für entsprechende Branchenentwicklungen zu sensibilisieren. Wichtigste Voraussetzung für die wasserstoffbasierte Mobilität ist die Qualifizierung der Fachkräfte und Auszubildenden für Elektrofahrzeuge, weswegen insbesondere der Schwerpunkt System- und Hochvolttechnik im Beruf Kraftfahrzeugmechatroniker/-in häufiger ausgebildet und bei den Betrieben beworben werden sollte. An den Berufsschulen bieten sich gute Möglichkeiten, um Auszubildenden schon heute Grundkenntnisse zu Wasserstoff und Brennstoffzellen zu

vermitteln. Um den Kompetenzaufbau zu fördern, sollten entsprechende Leuchtturmprojekten durch verstärkte überregionale Vernetzung bekannt gemacht werden und andere Schulstandorte als Multiplikatoren unterstützen. Über das aufgabenbezogene Wissen hinaus bietet das Thema Wasserstoff gute Anknüpfungspunkte für Berufsschulen, um den Auszubildenden unterschiedliche technologische und gesellschaftliche Zusammenhänge der Energiewende näher zu bringen und so deren allgemeine Nachhaltigkeitskompetenz zu stärken. In der betrieblichen Ausbildung können Lernortkooperationen dazu beitragen, dass mehr Auszubildende praktische Erfahrungen mit Wasserstofffahrzeugen sammeln können, auch wenn diese im eigenen Ausbildungsbetrieb nicht Teil des Arbeitsalltags sind. Entsprechende Initiativen sollten in den Wasserstoffregionen geprüft und bei Ausbildungsbetrieben beworben werden.

6 Literaturverzeichnis

AIRBUS (Hrsg.): Make it fly! How hydrogen and other technologies shape the future of aviation. Vortrag auf der Wasserstoff-Vollversammlung am 06.07.2022 2022. URL: https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2022/07/Wasserstoff-Vollversammlung_Wie-Wasserstoff-und-andere-Technologien-die-Zukunft-der-Luftfahrt-veraendern_06.07.22.pdf (Stand: 02.04.2024)

BAUER, Wilhelm; RIEDEL, Oliver; HERRMANN, Florian; BORRMANN, Daniel; SACHS, Carolina; SCHMID, STEPHAN, KLÖTZKE, MATTHIAS (Hrsg.): ELAB 2.0. Wirkungen der Fahrzeugelektrifizierung auf die Beschäftigung am Standort Deutschland. Abschlussbericht 2019. URL: <https://public-rest.fraunhofer.de/server/api/core/bitstreams/e391ba92-e041-48f9-9feb-b5850a305b65/content> (Stand: 09.11.2022)

BAUM, Christoph; JANSSEN, Henning; BRECHER, Christian; SCHUH, Günther: 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)

BECKER, Matthias: Beobachtungsverfahren. In: RAUNER, Felix; GROLLMANN, Philipp (Hrsg.): Handbuch der Berufsbildungsforschung. 3. Aufl. Bielefeld 2018, S. 758-763

BIBB (Hrsg.): Datenblatt (DAZUBI) Karosserie- und Fahrzeugbaumechaniker/-in. Regionale Einheit: Deutschland. Stand 09.10.2023 2024a. URL: <https://www.bibb.de/dienst/dazubi/de/1871.php?sd%5Bq%5D=Karosserie-+und+Fahrzeugbaumechaniker&sd%5Bcountries%5D%5B%5D=30&sd%5Boccupations%5D%5B%5D=1290&sd%5Bsearch%5D=> (Stand: 26.03.2024)

BIBB (Hrsg.): Datenblatt (DAZUBI) Kraftfahrzeugmechatroniker/-in. Regionale Einheit: Deutschland. Stand 09.10.2023 2024b. URL: <https://www.bibb.de/dienst/dazubi/de/1871.php?sd%5Bq%5D=Kraftfahrzeugmechatroniker&sd%5Bcountries%5D%5B%5D=30&sd%5Boccupations%5D%5B%5D=1000&sd%5Bsearch%5D=> (Stand: 26.03.2024)

BIBB (Hrsg.): Datenblatt (DAZUBI) Land- und Baumaschinenmechatroniker/-in. Regionale Einheit: Deutschland. Stand 09.10.2023 2024c. URL: <https://www.bibb.de/dienst/dazubi/dazubi/data/Z/B/30/1025.pdf> (Stand: 26.03.2024)

BIBB (Hrsg.): Informationen zu Aus- und Fortbildungsberufen. Land- und Baumaschinenmechatroniker/Land- und Baumaschinenmechatronikerin (Ausbildung) n.d. URL: https://www.bibb.de/dienst/berufesuche/de/index_berufesuche.php/profile/apprenticeship/dsfkoerj (Stand: 11.07.2023)

BMWi (Hrsg.): Die Nationale Wasserstoffstrategie 2020. URL: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?__blob=publicationFile (Stand: 29.04.2022)

BUNDESGESETZBLATT (Hrsg.): Verordnung über die Berufsausbildung zum Karosserie- und Fahrzeugbaumechaniker und zur Karosserie- und Fahrzeugbaumechanikerin (Karosserie- und Fahrzeugbaumechanikerausbildungsverordnung – KFBauMechAusbV) 2023. URL: https://www.bibb.de/dienst/berufesuche/de/index_berufesuche.php/profile/apprenticeship/kafahr23?page=1

BUNDESGESETZBLATT (Hrsg.): Erste Verordnung zur Änderung der Verordnung über die Berufsausbildung zum Mechaniker und zur Mechanikerin für Land- und Baumaschinentechnik. Bonn 2014. URL: https://www.bibb.de/dienst/berufesuche/de/index_berufesuche.php/profile/apprenticeship/dsfkoerj

BUNDESGESETZBLATT (Hrsg.): Verordnung über die Berufsausbildung zum Kraftfahrzeugmechatroniker und zur Kraftfahrzeugmechatronikerin. Bonn 2013a. URL: https://www.bibb.de/dienst/berufesuche/de/index_berufesuche.php/profile/apprenticeship/nh324578

BUNDESREGIERUNG (Hrsg.): Fortschreibung der Nationalen Wasserstoffstrategie. NWS 2023. URL: https://www.bmbf.de/SharedDocs/Downloads/de/2023/230726-fortschreibung-nws.pdf?__blob=publicationFile&v=1 (Stand: 27.07.2023)

BUNDESREGIERUNG (Hrsg.): Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) 2021. URL: <https://www.gesetze-im-internet.de/ksg/BJNR251310019.html>

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

DGUV (Hrsg.): FBHM-099. 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)

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

DLR (Hrsg.): Auf dem Weg zu einer emissionsfreien Luftfahrt. Köln 2021. URL: https://www.dlr.de/de/aktuelles/nachrichten/2021/04/20211215_auf-dem-weg-zu-einer-emissionsfreien-luftfahrt (Stand: 02.04.2024)

E4SHIPS (Hrsg.): Elektra n.d. URL: <https://www.e4ships.de/deutsch/binnenschifffahrt/elektra/>

EUROPÄISCHES PARLAMENT (Hrsg.): CO₂-Emissionen des Luft- und Schiffsverkehrs: Zahlen und Fakten (Infografik) 2022. URL: CO₂-Emissionen des Luft- und Schiffsverkehrs: Zahlen und Fakten (Stand: 28.03.2024)

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

GOTH, Günther C.; KRETSCHMER, Susanne; PREIFFER, Iris (Hrsg.): Auswirkungen der Elektromobilität auf die betriebliche Aus- und Weiterbildung. Bielefeld 2018

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)

IMO (Hrsg.): Fourth IMO Greenhouse Gas Study. Executive Summary 2020. URL: <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Fourth%20IMO%20GHG%20Study%202020%20Executive-Summary.pdf> (Stand: 16.11.2022)

KUCKARTZ, Udo: Qualitative Inhaltsanalyse: Methoden, Praxis, Computerunterstützung. 3. Aufl. Basel 2016

LENZ, Christoph; BRAUN, Johanna: Branchenübergreifende Bedarfsanalyse für Qualifizierungsangebote im Wasserstoff-Kontext in Nord-Ost-Niedersachsen. Lüneburg 2023. URL: <https://www.wasserstoff-niedersachsen.de/wp-content/uploads/2022/09/H2Skills-Bedarfsanalyse-Qualifizierung-Wasserstoff.pdf> (Stand: 10.11.2023)

MÖNNING, Anke; SCHNEEMANN, Christoph; WEBER, Enzo; ZIKA, Gerd; HELMRICH, Robert: Elektromobilität 2035. Effekte auf Wirtschaft und Erwerbstätigkeit durch die Elektrifizierung des Antriebsstrangs von Personenkraftwagen. Nürnberg 2018. URL: <https://www.ipt.fraunhofer.de/en/publications/whitepaper-trendreports-studies/relevance-of-fuel-cells-for-mobility-applications.html> (Stand: 09.04.2024)

PFEIFFER, Sabine: Die doppelte Transformation in der Automobilindustrie. Welche Technologien am Arbeitsplatz aktuell angekommen sind. In: WSI-Mittteilung 76 (2023) 4, S. 296-304

PWC (Hrsg.): E-Bus-Radar 2023. URL: <https://www.pwc.de/de/branchen-und-markte/oeffentlicher-sektor/pwc-e-bus-radar-2023.pdf> (Stand: 13.03.2024)

RAMM, Marius: Technologische Entwicklungen in der Landbautechnik. Hannover 2022. URL: https://hpi-hannover.de/Technologische_Entwicklungen_in_der_Landbautechnik_Ergebnisbericht_LBT-Forward.pdf?m=1657620513 (Stand: 07.07.2023)

RANFT, Sebastian; ZINKE, Gert: Berufsbildung 4.0 - Fachkräftequalifikation und Kompetenzen für die digitalisierte Arbeit von morgen: Der Ausbildungsberuf "Land- und Baumaschinenmechatroniker/-in" im Screening. Wissenschaftliches Diskussionspapier. Bonn 2019. URL: **[Online-Adresse fehlt!]**

REVIERWENDE (Hrsg.); FRAUNHOFER IMW (Hrsg.); HYPOS (Hrsg.): Bestandsaufnahme zum Qualifizierungsbedarf in der Mitteldeutschen Wasserstoffwirtschaft 2024. URL: **[Online-Adresse fehlt!]**

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 (Stand: 08.11.2022)

SCHUR, Alexander Christian; MÖNNIG, Anke; RONSIEK, Linus: Arbeitskräftebedarf und Arbeitskräfteangebot entlang der Wertschöpfungskette „Wasserstoff“. Abschlussbericht der ersten Projektphase 2023. URL: https://res.bibb.de/vet-repository_781481 (Stand: 15.08.2023)

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)

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

SPÖTTL, Georg; WINDELBAND, Lars: Berufswissenschaftlicher Ansatz zur Früherkennung von Qualifikationsbedarf. In: Europäische Zeitschrift für Berufsbildung 39 (2006) 3, S. 72-91

UMWELTBUNDESAMT (Hrsg.): Emissionsübersichten KSG-Sektoren 1990-2023. Tabelle zum Download 2024. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/treibhausgas-emissionen> (Stand: 22.03.2024)

UMWELTBUNDESAMT (Hrsg.): Seeverkehr – Luftschadstoffe, Energieeffizienz und Klimaschutz 2022. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr/emissionsstandards/seeverkehr-luftschadstoffe-energieeffizienz#luftverunreinigung-durch-seeschiffe> (Stand: 09.04.2024)

Verordnung über die Berufsausbildung zum Binnenschiffer und zur Binnenschifferin (Binnenschifferausbildungsverordnung – BinSchAusbV)* 2022

Verordnung über die Berufsausbildung zum Fluggerätmechaniker und zur Fluggerätmechanikerin 2013b

Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Verwendung von Arbeitsmitteln. (Betriebssicherheitsverordnung - BetrSichV) 2015

WSV (Hrsg.): Veränderung des Schiffsbestands der deutschen Binnenflotte im Jahr 2021. Zentrale Binnenschiffsbestandsdatei 2022. URL: https://www.gdws.wsv.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Binnenschiffsbestandsdatei/2021.pdf;jsessionid=3550386C3D3C0E986C62E313F5B55297.live21303?__blob=publicationFile&v=2 (Stand: 22.03.2024)

ZERTA, Martin; DIEHL, Leo; LANDINGER, Hubert; MOLL, Johannes; KLEMM, Peter; SATTLER, Gunter: Maritime Wasserstoffanwender und ihr Anteil am H₂-Bedarf Deutschlands. Eine Studie im Auftrag des Deutschen Maritimen Zentrums 2023. URL: <https://dmz-maritim.de/wp-content/uploads/2023/08/Studie-Wasserstoffanwender-2023.pdf> (Stand: 02.04.2024)