



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

Forschungsprojekt: Abschlussbericht

Thomas Felkl, Dr. Gert Zinke

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)

Laufzeit: IV/2021 – III/2024

Bonn, 01.09.2025

Bundesinstitut für Berufsbildung
Friedrich-Ebert-Allee 114 - 116
53113 Bonn
Telefon: 0228 107-2510
E-Mail: thomas.felkl@bibb.de

Mehr Informationen unter:
www.bibb.de/

Zitiervorschlag

Felkl, Thomas; Zinke, Dr. Gert: 7.8.218 - Wasserstoff – ein Zukunftsthema der beruflichen Bildung im Kontext der Energiewende (H2PRO) : Forschungsprojekt: Abschlussbericht. Bonn, 2025.

Online: https://res.bibb.de/vet-repository_783884.

© 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 Problemstellung und Einordnung des Projekts H2PRO	5
2 Projektziele und Forschungsfragen	8
3 Methodische Vorgehensweise	9
3.1 Sektoranalysen	10
3.2 Experten- und Fachinterviews.....	11
3.3 Fallbeispiele	12
3.4 Datenauswertung	12
3.5 Veranstaltungen	13
3.6 Projektbeirat.....	13
3.7 Ergebnisse aus den Sektoren	13
3.7.1 Erzeugung, Speicherung und Transport von Wasserstoff.....	13
3.7.2 Stahlindustrie	15
3.7.3 Chemie- und Raffinerieindustrie	16
3.7.4 Mobilität	19
3.7.5 Wärmeversorgung.....	22
3.8 Sektorübergreifende Befunde und Handlungsempfehlungen.....	23
4 Zielerreichung.....	27
4.1 Meilensteinplan.....	27
4.2 Projektplan	29
4.3 Begründung der Einsparung von Mitteln	29
5 Ausblick und Transfer	30
6 Veröffentlichungen	30
6.1 Pressemitteilungen.....	30
6.2 Factsheets.....	30
6.3 BIBB-Discussion Paper	31
6.4 Weitere Zeitschriftenartikel	31
6.5 Transfer in Praxis/Politik	31
7 Literaturverzeichnis.....	32

Das Wichtigste in Kürze

Das BMBF-geförderte Forschungsprojekt beschäftigte sich mit der Frage, welche Qualifizierungs- und Ordnungsbedarfe auf der mittleren Fachkräfteebene durch die Umstellung der deutschen Wirtschaft auf Wasserstofftechnologien entstehen.

Im Projekt H2PRO wurden die fünf Sektoren

- Erzeugung/Speicherung/Transport von Wasserstoff
- Mobilität
- Stahlindustrie
- Chemische Industrie/Raffinerie sowie
- Wärmeversorgung

als Forschungsfelder abgesteckt und jeweils in gesonderten Sektoranalysen untersucht. Diese Sektoren wurden ausgewählt, weil sie als wichtigste Anwendungsbereiche von Wasserstoff gelten (HEBLING u. a. 2019; NATIONALER WASSERSTOFFRAT).

Für die Sektoranalysen wurden umfassende Literaturrecherchen durchgeführt. Zudem wurden erste Kontakte ins Forschungsfeld aufgenommen. Die Zwischenergebnisse wurden jeweils als BIBB-Discussion-Paper publiziert und sind auf der BIBB-Website öffentlich abrufbar.

Im Projektverlauf wurden fünf thematisch abgegrenzte Factsheets auf der BIBB-Website veröffentlicht.¹

In den einzelnen Sektoren wurden exemplarische Berufe identifiziert, bei denen Fachkräfte mit Wasserstoff in Berührung kommen und entsprechende Anforderungen sicher beherrschen müssen. Ausbildungs-, Weiterbildungs- und Umschulungspotentiale wurden sektorbezogen ausgelotet. Auf der Basis von Annahmen und Zwischenergebnissen der ersten Phase konzentrierte sich die weitere Forschungsarbeit auf drei der fünf Sektoren, weil die Betrachtung der Sektoren ergab, dass die Chemie- und Raffinerieindustrie sowie die Stahlindustrie eine weitere Bearbeitung nicht erfordern bzw. ermöglichen.

Die Fachkräfte der **Chemie- und Raffinerieindustrie** arbeiten bereits seit Jahrzehnten mit Wasserstoff und der technologische Wandel im Rahmen der üblichen chemischen Verfahrenstechnik abläuft. Dementsprechend wurden in diesem Sektor keine weiteren Untersuchungen durchgeführt.

In der **Stahlindustrie** gilt bei der Stahlerzeugung die Reduktion von Sauerstoff mittels Wasserstoffes als einzige Alternative zu Kohle. Ein beispielhafter Abgleich mit möglichen Anforderungen an Fachkräfte und den bereits in der Ausbildung verankerten Kompetenzen im Rahmen der Sektorstudie machte deutlich, dass in den stahlspezifischen Berufen keine grundsätzlich neuen Qualifikationsbedarfe entstehen. Dies bezieht sich insbesondere auf

¹ https://www.bibb.de/dienst/dapro/de/index_dapro.php/detail/7.8.218

ordnungsrelevante Anpassungen. Deshalb und aus Kapazitätsgründen wurde auch dieser Sektor nicht weiterbearbeitet. Anpassungsmaßnahmen können dennoch auf Umsetzungsebene, wie z. B. arbeitsplatzbezogene Unterweisung zu Arbeitssicherheit und Gesundheitsschutz beim Umgang mit H₂ (Grundlage Rechtsvorschriften) und aufgabenbezogene technisch-fachliche Befähigungen, notwendig werden.

Im Sektor **Wasserstofferzeugung** (inklusive Wasserstoffspeicherung und -transport) wurden differenziert nach typischen Handlungsfeldern künftige Arbeitsaufgaben projiziert, darauf aufbauend einschlägige, technische Ausbildungsberufe ermittelt und deren Passung geprüft. Im Rahmen von Betriebserkundungen und Interviews untersuchte Praxisbeispiele zeigen, wie Fachkräfte bei der Erzeugung, Speicherung und dem Transport von Wasserstoff eingesetzt werden, welche Qualifikationsanforderungen daraus erwachsen und wie diese im Rahmen der Berufsbildung „bedient“ werden.

Die Ergebnisse demonstrieren, dass alle notwendigen Arbeitsaufgaben mit bestehenden Ausbildungsberufen abgedeckt werden können. Zukünftigen Auszubildenden in wasserstofferzeugenden Unternehmen können auf Grundlage technikoffener Formulierungen in den Ausbildungsordnungen bedarfsorientiert entsprechende Kompetenzen in Richtung Wasserstoff vermittelt werden. Hinweise auf neue, zu schaffende Ausbildungsberufe gibt es nicht. Zusätzliche Qualifikationen sind abhängig von der Funktion und den auszuübenden Arbeitsaufgaben insbesondere aufgrund sicherheitstechnischer Aspekte auch für bereits berufstätige Fachkräfte notwendig.

Die Hauptverantwortung für die Qualifizierung und den Einsatz der Fachkräfte liegt auch hier bei den Arbeitgebern und den Arbeitgeberinnen.

Bestehende Rechtsverordnungen stellen für die Weiterbildung sicher, dass sicherheitsrelevante Qualifizierungsinhalte bezüglich des Arbeitens an Wasserstofferzeugungsanlagen, bedarfsorientiert und auf bestehenden Ausbildungsberufen sattehend, durch Schulungen und Unterweisungen im Rahmen der Anpassungsfortbildung vermittelt werden können.

Im **Mobilitätssektor** wurden ebenfalls Handlungsbedarfe für die Ordnungsarbeit und die Praxis der dualen Ausbildung geprüft. Wesentliche Grundlage sind Experteninterviews mit Personen aus Betrieben, Weiterbildungseinrichtungen, Berufsschulen, Wissenschaft und Verbänden, die im Rahmen des Projekts H2PRO geführt wurden. Im Mittelpunkt 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 u. a. 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.

Im **Wärmesektor** bestätigten die Auswertungen der Experteninterviews die Erkenntnis, die bereits durch die Sektoranalyse, in Phase I des Projekts, für die Wärmeversorgung formuliert wurde (Hiller 2023, S. 30): Kompetenzen für Fachkräfte für den Einsatz von Wasserstoff können in Form von kurzen Weiterbildungen vermittelt werden – der Bedarf nach Änderung der Ausbildungsordnung oder der Schaffung eines neuen Berufs besteht nicht.

Gleichwohl entstehen durch den Einsatz von Wasserstoff Qualifizierungsbedarfe sowie zusätzliche Anforderungen an Fachkräfte, die je nach Tätigkeit unterschiedlich ausfallen und den entsprechenden Tätigkeitsbereichen zugeordnet werden können. Neben fachlichen Kompetenzen umfassen diese auch persönliche Anforderungen.

Um die zukünftigen Aufgaben von Fachkräften im Kontext des Einsatzes von Wasserstoff besser einordnen zu können, wird die Ausgangssituation von Betrieben im Wärmesektor analysiert, einschließlich ihrer Erwartungen an die Rolle von Wasserstoff. Besonders im Fokus steht der Beruf Anlagenmechaniker/-in Sanitär-, Heizungs- und Klimatechnik. Die Befragten sehen die umfangreichen und anspruchsvollen Inhalte dieser Ausbildung teilweise als Hindernis für eine stärkere Spezialisierung auf Wasserstofftechnologien. Gleichzeitig wird ein hoher Bedarf an Fachkräften mit elektrotechnischen Kenntnissen im Gebäudesektor festgestellt, die für den Betrieb und die Umsetzung von auf Wasserstoff basierten Anlagen zur dezentralen Energieversorgung als unverzichtbar gelten.

Abseits des Gebäudesektors gibt die Auswertungen im Wärmesektor Hinweise zum Qualifizierungsbedarf für Fachkräfte in Industriebetrieben der Grundstoffproduktion (Nutzer von Prozesswärme) und werfen auch einen Blick auf die auf Wasserstofftechnologie spezialisierte Industrie, die sich in den letzten Jahren entwickelt hat.

Neben mehreren Publikationen und einer Reihe von Vorträgen wurden zwei Fachtagungen mit jeweils mehr als hundert Teilnehmenden realisiert. Sie unterstützten einerseits den Transfer der Ergebnisse, andererseits wurden diese so einem Praxistest unterzogen und konnten teilweise noch geschärft und justiert werden. Beide Fachtagungen sind auf der Projektseite dokumentiert. Bei der zweiten Fachtagung wurden im Rahmen eines Marktplatzes Umsetzungsbeispiele aus Betrieben, Bildungszentren und Berufsschulen präsentiert. Die Verstetigung eines Netzwerkes über die Leando-Plattform wird angestrebt.

Als übergreifende, verallgemeinernde Schlussfolgerungen und Ausblick bleibt:

Generell können in der Berufsausbildung an den Lernorten auf Grundlage der Mindestanforderungen der Ausbildungsordnungen und der Rahmenlehrpläne bedarfsorientiert und exemplarisch entsprechende Qualifikationen in Richtung Wasserstoff vermittelt werden.

Für die Berufsorientierung ist die Wasserstofferzeugung und -nutzung ein Beispielfeld für eine moderne Wirtschaft und Berufsausbildung.

1 Problemstellung und Einordnung des Projekts H2PRO

In der Transformation des Energiesystems bieten Wasserstoff und seine Folgeprodukte dort eine vielversprechende Perspektive, wo der Einsatz direkt- bzw. batterieelektrischer Systeme technisch nicht möglich oder wirtschaftlich unvorteilhaft ist. Wichtigste Anwendungsbereiche sind dabei die Chemieindustrie, die Stahlindustrie, der Mobilitätssektor sowie die Wärme- und die Energieversorgung (HEBLING u. a. 2019; NATIONALER WASSERSTOFFRAT).

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; BAUM u. a. 2021).

Der Verkehrssektor verursachte im Jahr 2021 mit rund 148 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalenten 20 Prozent 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 CO₂ entfallen rund 98 Prozent auf den Straßenverkehr (UMWELTBUNDESAMT 2022b).

Als industrieller Roh- und Hilfsstoff in der Stahlproduktion und Chemieindustrie sowie in den Raffinerien kann Wasserstoff entscheidend dazu beitragen, fossile Stoffe zu ersetzen und damit verbundene Emissionen zu vermeiden. In der Produktion von Primärstahl kann Wasserstoff beispielsweise als Reduktionsmittel im Direktreduktionsverfahren genutzt werden, um das Kohle-Koks, das in der Hochofenroute verwendet wird, zu ersetzen (AGORA ENERGIEWENDE/WUPPERTAL INSTITUT 2019). Die Stahlindustrie verursachte im Jahr 2018 rund ein Drittel der industriellen CO₂-Emissionen in Deutschland. Der CO₂-Ausstoß der Stahlindustrie lag im Jahr 2018 bei 58,4 Millionen Tonnen. Insgesamt betrachtet, macht die Stahlproduktion ungefähr sechs Prozent der deutschlandweiten CO₂-Emissionen aus (WIRTSCHAFTSVEREINIGUNG STAHL 2020).

Die Potentiale der chemischen Industrie zur Reduktion der deutschlandweiten CO₂-Emissionen sind aus mehreren Gründen relevant. Zum einen ist sie mit 39,5 Mt CO₂ im Jahr 2019 (VCI 2021, S. 117) ein relevanter Emittent von CO₂. Zum anderen ist sie mit 12,5 Mrd. m³ Wasserstoff jährlich bisher der größte Verbraucher von Wasserstoff in der deutschen Wirtschaft (WEHL 2022). Allerdings ist dieser Wasserstoff bis dato nur sehr selten „grün“. Der Wirtschaftszweig bzw. Produktionsbereich der „Kokerei und Mineralölverarbeitung“, dem die Raffinerien im Wesentlichen zuzuordnen sind, hatte im Jahr 2019 einen CO₂-Ausstoß von 26,89 Mt (STATISTISCHES BUNDESAMT DEUTSCHLAND 2022). Somit gehören die Raffinerien neben der Chemie- und der Stahlindustrie zu den relevantesten industriellen Emittenten.

Im Wärmesektor wird Wasserstoff in einigen Energiewende-Szenarien lediglich als Ergänzungslösung betrachtet (MEYER/HERKEL/KOST 2021), andere stellen fest, dass er für die

Klimaschutzziele des Gebäudesektors unabdingbar ist: „Transformationspfade müssen alle wesentlichen Technologien – sowohl Wärmepumpen (WP) [...] als auch H₂-basierte Strom- und Wärmeerzeuger – als mögliche Lösungsoption beinhalten“ (THOMSEN u. a. 2022, S. 7; vgl. auch WIETSCHEL/ZHENG 2021). Die Wärmeversorgung verbraucht über 50 Prozent der Endenergie in Deutschland (BMW i 2019, Grafik Nr. 9) und trägt erheblich zur Emission von Treibhausgasen bei: Ein Drittel der gesamten Treibhausgasemissionen lassen sich auf die Wärmenutzung zurückführen. Dabei haben Haushalte einen Anteil von 11 Prozent, die Industrie einen Anteil von 16 Prozent und der Sektor Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (GHD) einen Anteil von 5 Prozent (QUASCHNING 2016, S. 10).

Durch seine flexiblen Herstellungs- und Speicheroptionen ermöglicht Wasserstoff eine effizientere Integration erneuerbarer Energien in das Energiesystem. Insbesondere in Zeiten mit hohem Wind- oder Sonnenstromüberschuss, wenn überschüssige Strommengen nicht ins Netz eingespeist werden können, kann Wasserstoff als Speichermedium genutzt werden (WIETSCHEL u. a. 2018). Insgesamt ermöglichen die Power-to-X-Technologien eine tiefere Verknüpfung der Infrastrukturen in den Bereichen Energie, Mobilität und Industrie (Sektorenkopplung) und tragen zur umfangreichen Versorgung mit erneuerbaren Energien bei (EPP/PFAFF 2019).

Entsprechend jeweiliger Annahmen in ihren Szenarien prognostizieren Studien einen Wasserstoffbedarf von etwa 50 bis 120 TWh im Jahr 2030 und von etwa 400 bis 700 TWh im Jahr 2045 (ARIADNE 2021; PROGNOSE/ÖKO-INSTITUT/WUPPERTAL-INSTITUT 2021; BUNDESREGIERUNG 2020). Der Nationale Wasserstoffrat geht von einem Bedarf von 616 TWh klimaneutral hergestelltem Wasserstoff und Wasserstoffderivaten von 2045 bis 2050 in der Chemieindustrie, den Raffinerien, der Stahlindustrie, dem Verkehrssektor, der Gebäudewärme und der Energieversorgung aus. Damit würden jährlich rund 170 Millionen Tonnen CO₂ vermieden, davon 55 Millionen Tonnen allein in der Stahlindustrie (NATIONALER WASSERSTOFFRAT 2023).

Mit dem politisch angestrebten Ziel von 10 GW Elektrolysekapazität bis 2030 könnten bis zu 28 TWh des Gesamtbedarfs an Wasserstoff aus inländischer Produktion gedeckt werden. Dies führt einerseits zu einem hohen Importbedarf und zur Notwendigkeit des Aufbaus internationaler Infrastrukturen, Märkte und Partnerschaften (MÖNNING u. a. 2022; ACATECH/LEOPOLDINA/UNION DER DEUTSCHEN AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN 2022). Andererseits erfordert das Ziel einer umfangreichen inländischen Produktion einen erheblichen Ausbau erneuerbarer Energien (HOLZ u. a. 2022).

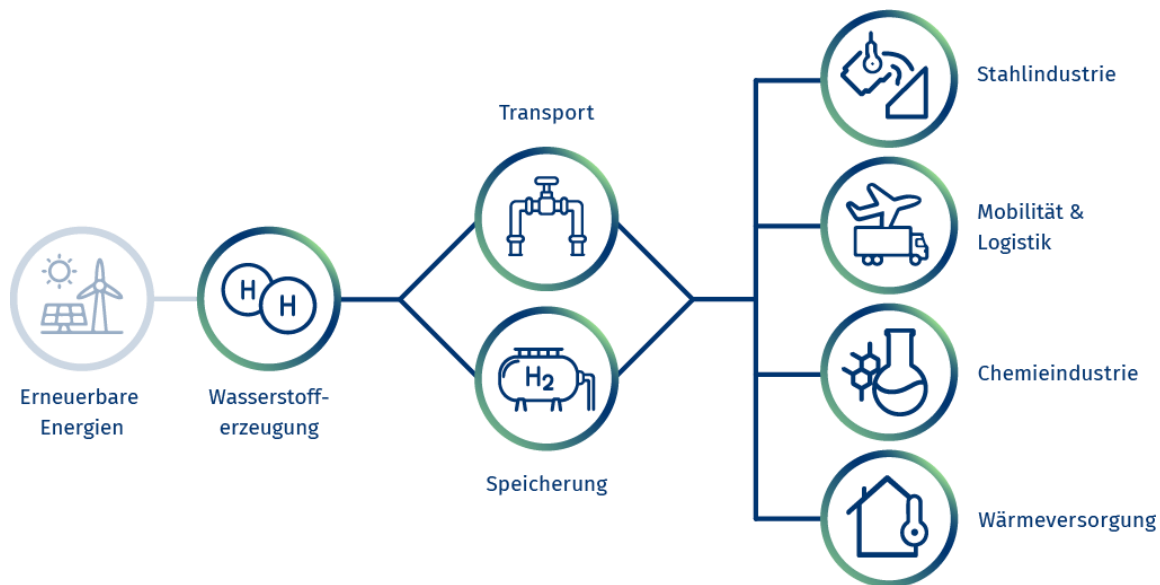


Abbildung 1: Die Wertschöpfungskette „Wasserstoff“ mit den im Projekt untersuchten Sektoren Wasserstoffherzeugung, Stahlindustrie, Mobilität, Chemieindustrie und Raffinerie sowie Wärmeversorgung

Um den geplanten Umbau der Wirtschaft hin zu wasserstoffbasierten Technologien in den unterschiedlichen Sektoren zu bewältigen, sieht der Maßnahmenkatalog der Bundesregierung in der NWS unter anderem die Stärkung von Bildung und Ausbildung vor:

„Bildung und Ausbildung stärken – national und international: Mit der Unterstützung und Weiterentwicklung der beruflichen und wissenschaftlichen Aus- und Weiterbildung im Bereich der Wasserstofftechnologien ebnen wir den Weg für Arbeitende und Betriebe hin zu einer effizienten und sicheren Handhabung von Wasserstofftechnologien. Dies betrifft vor allem die Qualifizierung von Personal zur Produktion, Betrieb und Wartung in Bereichen, in denen Wasserstoff bisher nur eine untergeordnete Rolle gespielt hat...“ (BUNDESREGIERUNG 2020, S. 25).

Gut ausgebildete Fachkräfte auf allen Ebenen sind ein Schlüsselfaktor für den Aufbau und den Markthochlauf der Wasserstoffwirtschaft. Entlang der gesamten Wertschöpfungskette werden qualifizierte Fachkräfte benötigt, die die notwendigen Technologien herstellen, ihr tägliches Funktionieren sichern und wichtige Innovationsimpulse liefern (STEEG u. a. 2022).

Es wird erwartet, dass die Nachfrage nach Fachkräften für wasserstoffbezogene Tätigkeiten in den verschiedenen Branchen und Regionen je nach Marktreife der Technologien und dem Umfang der Wasserstoffaktivitäten zeitlich und regional unterschiedlich sein wird. Durch die verbesserten Möglichkeiten der Sektorenkopplung durch Wasserstoff ist auch zu erwarten, dass die Nachfrage nicht nur nach spezifischen Wasserstoffkompetenzen, sondern auch nach Fachkräften für die Arbeit an vernetzten Energiesystemen und infrastrukturellen Schnittstellen insgesamt steigen wird (GRIMM/JANSER/STOPS 2021; FLECKENSTEIN 2022).

Eine Stellenanzeigenauswertung des Instituts für Arbeitsmarkt- und Berufsforschung zeigt, dass die Nachfrage nach wasserstoffbezogenen Kompetenzen eng mit den Phasen des Hochlaufs verbunden ist. Neben der Nachfrage nach Personen mit Qualifikationen oberhalb der dualen Berufsausbildung besteht bereits in frühen Phasen der Marktentwicklung ein

konkreter Bedarf an Fachkräften in technischen Ausbildungsberufen. Die Nachfrage nach wasserstoffbezogenen Tätigkeiten entwickelt sich je nach Marktreife der Technologien und Umfang der Wasserstoffaktivitäten ungleichmäßig (GRIMM/JANSER/STOPS 2021).

Es gibt bereits Studien, die die Nachfrage nach wasserstoffbezogenen Kompetenzen quantitativ analysiert haben (ROLANDBERGER 2020; DWV 2018; NPM 2021; ZENK u. a. 2023). Dass die Einführung von Wasserstoffanwendungen und der Aufbau entsprechender Wertschöpfungsketten zu Veränderungen in verschiedenen Sektoren führen, ist zu erwarten. Allerdings ist noch wenig darüber bekannt, wie sich dies auf Arbeit, Beschäftigung und Qualifikationsbedarf auswirkt. Es gibt bisher keine umfassenden Untersuchungen zu den betroffenen Berufen auf mittlerer Ebene und den damit verbundenen Qualifikationsanforderungen (KRICHEWSKY-WEGENER/ABEL/BOVENSCHULTE 2020).

Eine regionale Bedarfsanalyse für Nord-Ost-Niedersachsen (LENZ/BRAUN 2023) 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 ein Forschungsbedarf hinsichtlich neuer Qualifizierungsanforderungen in Berufen mit Relevanz für die Wasserstoffwirtschaft. Es muss untersucht werden, welche Auswirkungen sich auf die Aus- und Weiterbildung ergeben und ob ein Anpassungsbedarf hinsichtlich der Ordnungsmittel besteht. Neben Qualifikationsinhalten sind auch Fragen zur Umsetzung von Aus- und Weiterbildungsmaßnahmen relevant. Engpässe bei Fachkräften können den Ausbau klimafreundlicher Technologien behindern, wie es beispielsweise beim Ausbau von Wärmepumpen oder der Gebäudesanierung der Fall ist (RUNST/OHLENDORF 2015; ÖKO-INSTITUT/FRAUNHOFER ISE 2022). Daher ist es wichtig, frühzeitig Maßnahmen zur Fachkräftequalifizierung in der Wasserstoffwirtschaft zu ergreifen, um ähnliche Hemmnisse zu vermeiden.

Unter den zahlreichen Projekten in Forschung und Entwicklung, die die Bundesregierung und insbesondere das BMBF im Kontext der NWS fördern (BMBF 2023; BUNDESREGIERUNG 2020), befassen sich nur wenige mit Fragen der Aus- und Weiterbildung auf der mittleren Fachkräfteebene oder adressieren gar spezifische ordnungsbezogene Fragestellungen. Diese Lücke wird durch das vorliegende Projekt geschlossen.

2 Projektziele und Forschungsfragen

Das Ziel des Projekts ist es, im Sinne einer Früherkennung neue Kompetenzanforderungen und Qualifizierungsbedarfe entlang der Wasserstoff-Wertschöpfungskette in Ausbildungsberufen, in exemplarischen Sektoren zu beschreiben und in Bezug auf neue Anforderungen für die berufliche Bildung zu analysieren.

Hierfür sind in den einzelnen Sektoren Verfahren, Prozesse, Arbeitsaufgaben, Werkzeuge sowie Tätigkeiten und die Arbeitsteilung in den unterschiedlichen Teilprozessen (in Bezug auf Berufe und Qualifizierungsniveaus) zu identifizieren sowie mögliche Leerstellen in Ordnungsmitteln zu prüfen. Des Weiteren werden Weiterbildungsstrategien und -angebote ermittelt und mit den bestehenden Ausbildungsordnungen der entsprechenden Branchen und Einsatzfelder abgeglichen.

Aus den identifizierten Lücken werden Empfehlungen für die Ordnungsarbeit und die Aus- und Weiterbildungspraxis abgeleitet. Hierbei werden ordnungsrelevante Fragen mit den Ordnungsakteuren der jeweiligen Diffusionsfelder diskutiert.

Auf Basis dieser Erkenntnisse sollen Handlungsempfehlungen für politische und praxisunterstützende Akteure der Berufsbildung abgeleitet werden.

Auf Grundlage dieser Zielsetzungen ergeben sich folgende Forschungsfragen, die durch das Projekt H2PRO zu klären sind:

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

3 Methodische Vorgehensweise

Grundlage für das methodische Vorgehen sind berufswissenschaftliche Arbeiten des Berufsbildungsinstituts Arbeit und Technik (biat) (bspw. BECKER/SPÖTTL 2006; SPÖTTL/WINDELBAND 2006; SPÖTTL 2005) sowie jüngere Arbeiten aus dem Bundesinstitut für Berufsbildung (BIBB) (bspw. ZINKE u. a. 2017; HACKEL/BLÖTZ/REYMERS 2015). Das methodische Vorgehen im Projekt erfolgte in zwei Hauptphasen. In Phase 1 wurden mittels Sektoranalysen ein erster Zugang zu den Forschungsfeldern erschlossen, um die weiteren Forschungsschritte vorzubereiten und auf Grundlage dieser Zwischenergebnisse den weiteren Forschungsverlauf genauer planen zu können. Leitfadengestützte Experteninterviews waren in der zweiten Projekthälfte das wichtigste Methodeninstrument. Arbeitsprozessorientierte Betriebsfallstudien wurden in nur wenigen Fällen genutzt, da wasserstoffführende Anlagen allgemein noch nicht im Regelbetrieb anzutreffen waren. Eine zusätzliche Validierung von Annahmen, Ergebnissen und Handlungsempfehlungen mit Berufsbildungspraxis und Berufsbildungspolitik fand insbesondere durch zwei Fachtagungen und damit verbunden Validierungsworkshops sowie die Rückkopplung mit einem

einberufenen Projektbeirat statt. Die Beantwortung der Forschungsfragen erfolgte zunächst sektorbezogen und wurde in den sektorbezogenen Teilberichten dokumentiert. Im Folgenden wird näher auf die einzelnen Schritte der Forschungsarbeit und dabei eingesetzte Methodeninstrumente eingegangen.

3.1 Sektoranalysen

Mit Hilfe der Sektoranalysen wurde in Anlehnung an Spöttl (2005, S. 113ff.) ein erster strukturierter Zugang zum Forschungsfeld eröffnet und inhaltlich wie auch methodisch die Grundlage für das weitere Vorgehen geschaffen. Sektoranalysen behandeln auf einer Makroebene relevante Felder des Berufsbildungssystems und erarbeiten Erkenntnisse zu Fragen politisch-ökonomischer Relevanz, Entwicklungsrichtungen, Qualifizierungsbedarf, Berufsprofilen, um diese für die Berufsbildungspolitik nutzbar zu machen. (SPÖTTL 2005, S. 113).

Sektoranalysen müssen neben der Makroebene auch die Mesoebene berücksichtigen, da sonst strukturelle Merkmale von Systemen dominieren und prozessuale Aspekte zu sehr vernachlässigt werden (SPÖTTL 2005, S. 113). Die Sektoranalyse auf der Mesoebene erschließt die „Dimension der Facharbeit“, um Erkenntnisse für Weiterentwicklung der Berufe zu gewinnen (SPÖTTL 2005, S. 113f.). Aufgrund des jungen Diffusionsstadiums von Wasserstofftechnologien sowie der hohen strukturellen Heterogenität der Anwendungskontexte kommt der Sektoranalyse eine besondere Bedeutung und eine weitläufige Stellung im Forschungsverlauf zu.

Im Rahmen der Sektoranalysen wurden insbesondere mit Experten der Ausbildungspraxis und Projektbeiratsmitgliedern, die sich mit der Herstellung und dem Einsatz von Wasserstoff beschäftigten, Vorgespräche geführt. Die jeweiligen Gespräche wurden protokolliert, jedoch nicht aufgezeichnet und transkribiert.

Zunächst wurde der Wandel in den Wertschöpfungsketten, der sich durch den erwarteten Einsatz von grünem Wasserstoff begründet, durch folgende Betrachtungen bearbeitet: Es wurden die Sektoren und ihre Grenzen gemäß Fragestellung genauer definiert, dementsprechend wurden relevante wirtschaftliche Eckwerte zusammengestellt, um die ökonomische Struktur der Sektoren zu erfassen. In einem nächsten Schritt wurde der auftretende technologische Wandel je Sektor beschrieben und die hierbei relevanten Wertschöpfungsketten und deren Teilprozesse erfasst, relevante Ausbildungsberufe und bestehende Qualifikationsstrategien identifiziert und soweit möglich deren Tauglichkeit im Kontext des Wandels diskutiert. Dazu wurden Ausbildungsordnungen, insbesondere Berufsprofile sowie Ausbildungsrahmenpläne, in Frage kommender Berufe mit typischen Arbeitsaufgaben abgeglichen. Als Zwischenergebnisse konnten so bereits weitgehende Einordnungen und Antworten auf die Forschungsfragen gefunden werden.

Diese Zwischenergebnisse wurden auf der ersten, im Rahmen des Projekts organisierten Fachtagung präsentiert und in Workshops mit Experten diskutiert.

Nur in drei der fünf Sektoren wurden die Untersuchungen in der zweiten Projekthälfte vertieft:

Denn die Betrachtung der Sektoren ergab, dass die **Chemie- und Raffinerieindustrie** und die **Stahlindustrie** eine weitere Bearbeitung nicht erfordern bzw. ermöglichen.

Die Fachkräfte der **Chemie- und Raffinerieindustrie** arbeiten bereits seit Jahrzehnten mit Wasserstoff und der technologische Wandel im Rahmen der üblichen chemischen Verfahrenstechnik abläuft. Dementsprechend wurden in diesem Sektor keine weiteren Untersuchungen durchgeführt.

In der **Stahlindustrie** gilt bei der Stahlerzeugung die Reduktion von Sauerstoff mittels Wasserstoffes als einzige Alternative zu Kohle. Ein beispielhafter Abgleich mit möglichen Anforderungen an Fachkräfte und den bereits in der Ausbildung verankerten Kompetenzen führte im Rahmen dieser Sektorstudie zu dem Ergebnis, dass in den stahlspezifischen Berufen keine grundsätzlich neuen Qualifikationsbedarfe entstehen. Dies bezieht sich insbesondere auf ordnungsrelevante Anpassungen. Deshalb und aus Kapazitätsgründen wurde auch dieser Sektor nicht weiter bearbeitet.

3.2 Experten- und Fachinterviews

Die Experteninterviews dienten der Validierung der in der Sektoranalyse erarbeiteten Ergebnisse.

Bogner/Littig/Menz (2014, S. 13) definieren Experten wie folgt:

„Experten lassen sich als Personen verstehen, die sich – ausgehend von einem spezifischen Praxis- oder Erfahrungswissen, das sich auf einen klar begrenzten Problemkreis bezieht – die Möglichkeit geschaffen haben, mit ihren Deutungen das konkrete Handlungsfeld sinnhaft und handlungsleitend für Andere zu strukturieren.“ (BOGNER/LITTIG/MENZ 2014, S. 13)

Der Expertenstatus ist eine Zuschreibung, die der Person Expertise sowie Entscheidungs- und Durchsetzungskompetenz unterstellt. (BOGNER/LITTIG/MENZ 2014, S. 35). Mit Bezug auf die Fragestellung des Projekts bestand der Kreis der Expert/innen aus Fachleuten der betrieblichen Praxis, aber auch Vertretern der Berufsschulen, Fachverbände, Weiterbildungsanbieter sowie der Wissenschaft.

Experteninterviews sind dabei nicht über die methodische Vorgehensweise, sondern über den Gegenstand definiert. (BOGNER/LITTIG/MENZ 2014, S. 9) Da es im vorliegenden Fall gilt, das Sachwissen der Experten bezüglich des Forschungsthemas möglichst umfassend und weitgehend zu erfassen (BOGNER/LITTIG/MENZ 2014, S. 24), wurde allgemein die Form der systematisierenden Experteninterviews in halboffene und mit semistrukturierten Leitfäden gewählt.

Absicht gemäß Aufgabenbeschreibung war es, je Sektor ein bis zwei Interviews zu führen. Diese Zahl wurde teilweise deutlich überschritten (siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht**

gefunden werden.). Mehrfach waren die Interviews eine Kompensation geplanter Fallbeispiele, da in vielen Bereichen keine im Realbetrieb laufenden Anlagen vorzufinden waren bzw. kein Zugang möglich war.

Tabelle 1: Übersicht über die befragten Expert/innen

		Betriebsvertreter/-innen	Berufsschulen	Verbände	Sonstige (Wissenschaft, Weiterbildungsanbieter etc.)
Erzeugung		7			
Transport/ Speicherung		7			
Mobilität		3	4	1	4
Wärme		9	2		
Chemie		2			
Stahl		2			

Die Interviews erfolgten leitfadengestützt. Die Leitfäden dienten zur Strukturierung der Themenfelder sowie als Hilfsmittel in der Erhebungssituation. (BOGNER/LITTIG/MENZ 2014, S. 27). Die Durchführung der Interviews erfolgte vor Ort oder online. Die Gespräche wurden aufgenommen für die spätere Transkription und Analyse.

3.3 Fallbeispiele

Fallbeispiele konnten, da sektorenabhängig teilweise nur begrenzt verfügbar und aufgrund limitierter Kapazitäten, nur in kleiner Anzahl durchgeführt werden. Sie waren dann jeweils mit Interviews kombiniert.

Grundsätzlich galt es, die Wasserstoffwertschöpfungskette anhand von Fallbeispielen nachzuzeichnen. Hierzu wurden entlang der Wertschöpfungskette in den einzelnen Diffusionsfeldern Unternehmen, die als Early Adapter identifiziert werden konnten, kontaktiert. Es wurden sowohl Ansprechpartner aus der Technologieentwicklung, der Produktionsplanung und der Aus- und/oder Weiterbildung interviewt. Wo es möglich war, wurden teilnehmende Beobachtungen durchgeführt. Hier wurden Daten über berufliche Tätigkeiten, Qualifizierungsbedarf, Passung der aktuellen Berufe, Herausforderungen und notwendige Weiterbildungsmaßnahmen erhoben.

3.4 Datenauswertung

Alle Daten der Interviews und Fallbeispiele wurden transkribiert und mittels der qualitativen Inhaltsanalyse in Anlehnung an Mayring (2022) und Kuckartz (2016) ausgewertet. Die Transkription wurde mittels der Software NoScribe (DRÖGE 2024) durchgeführt. Das genaue Vorgehen kann den jeweiligen Teilberichten entnommen werden.

3.5 Veranstaltungen

Im Projektverlauf waren zwei Fachtagungen geplant, die einerseits zum Ergebnistransfer und andererseits zur Ergebnisvalidierung dienten.

Bereits nach einer ersten, ca. einjährigen Projektphase fand die erste eintägige Fachtagung statt. Hier wurden u. a. vier sektorbezogene Workshops durchgeführt, die sich auf die Wasserstofferzeugung (Workshop 1), die Mobilität (Workshop 2), die Wärme (Workshop 3) sowie die Stahlerzeugung und Chemische Industrie (Workshop 4) konzentrierten.

Neben der Präsentation und Diskussion eigener Ergebnisse standen hier auch andere verwandte Projekte auf dem Programm, so dass Bezugnahmen und ein fachlicher Austausch möglich wurden.

Wesentliche Projektergebnisse wurden gegen Ende des Projekts in einer zweitägigen Fachtagung diskutiert und bestätigt. Unter den nahezu 100 Teilnehmenden waren etwa ein Drittel Vertreter/innen aus Berufsschulen, ein weiteres Drittel aus Betrieben und das letzte Drittel waren Mitarbeitende aus zuständigen Stellen, Bildungsdienstleister, Experten und andere. Im Plenum wurden die eigenen Ergebnisse präsentiert und konnten von den Teilnehmenden per Mentimeter kommentiert und diskutiert werden. Im Rahmen eines Marktplatzes wurden Poster und Exponate rund um die Berufsausbildung zur Thematik Wasserstoff vorgestellt und die Möglichkeit zur Vernetzung geschaffen². In Fortsetzung ist es gelungen, dieses Netzwerk zu verstetigen und dafür insbesondere die Plattform Leando zu nutzen.

3.6 Projektbeirat

Für die Dauer des Projekts wurde ein Projektbeirat eingerichtet, der insgesamt dreimal tagte und das Projekt beratend unterstützte. Einzelne Beiratsmitglieder berieten auf Grundlage ihrer Expertise das Projektteam und eröffneten Zugänge zu Betrieben, Verbänden und anderen Einrichtungen.

3.7 Ergebnisse aus den Sektoren

3.7.1 Erzeugung, Speicherung und Transport von Wasserstoff

Die künftig entlang der Prozesskette Wasserstofferzeugung verwendeten Techniken und Technologien, ihre technische Umsetzung und Größe sowie ihr Stellenwert sind noch nicht vollständig absehbar.

Trotzdem liegen bereits erste Zwischenergebnisse und Studien von Dritten zum Fachkräftebedarf vor, auf die hier hingewiesen sei:

Den qualitativen Fachkräftebedarf betreffend wird von dritter Seite eingeschätzt, dass in Deutschland vorhandene Bildungsprogramme im Bereich der Erstausbildung (beruflich und

² Die Beiträge des Marktplatzes wurden auf folgender Seite dokumentiert:
<https://www.bibb.de/de/190444.php>

hochschulisch) aufgrund ihrer Breite eine gute Basis für die Beschäftigung in der Wasserstoffbranche bieten. Der Qualifizierungsbedarf kann daher zunächst relativ kurzfristig mit Zusatzqualifikationen und Weiterbildungsangeboten abgedeckt werden (KRICHEWSKY-WEGENER/ABEL/BOVENSCHULTE 2020). Eine KPMG-Studie schätzt ein: „Die in Deutschland bestehende Berufsausbildung bietet gute Grundlagen. Viele bestehende technische Berufe verfügen bereits über breite Kompetenzprofile, die in der Wasserstoffwirtschaft dringend benötigt werden.“ (KPMG 2023)

Diese Einschätzung stimmt mit Zwischenergebnissen der hier vorliegenden Studie überein und wird durch sie bestätigt (ZINKE 2022).

Die Wasserstoffnutzung ist in der (deutschen) Chemieindustrie seit mehr als 100 Jahren Alltag. Entsprechend wurden wesentliche Anforderungen zur Fachkräftequalifizierung, einschließlich den Ausbildungsordnungen, in die Berufsbildung integriert. Dies betrifft sowohl die stofflichen Eigenschaften von Wasserstoff und die damit verbundene Prozesskompetenz als auch die technische Ausführung der Anlagen und die dafür notwendigen Materialeigenschaften. Für die Beurteilung des Fachkräftebedarfs ist die konventionelle Herstellung und Nutzung von Wasserstoff deshalb ein wichtiges Bezugsfeld. Hier finden sich rund um die Erzeugung, Speicherung und den Transport von Wasserstoff Arbeitsplätze, die demonstrieren, welche Qualifikationen bei Verrichtung einschlägiger Arbeitsaufgaben notwendig sind, welche Ausbildungsberufe dabei vorzugsweise eingesetzt werden und wie viele Arbeitskräfte wofür notwendig sind. „Dementsprechend sind hier entsprechende Kompetenzen im Wasserstoffkontext in den relevanten Handlungsfeldern (Anlagen planen und entwickeln, Anlagen errichten, Anlagen überprüfen und in Betrieb nehmen, Anlagen betreiben, Anlagen überwachen sowie Anlagen instand halten) vorhanden und die bestehenden Ausbildungsberufe decken den wasserstoffbezogenen Qualifikationsbedarf hinreichend ab.“ (FELKL 2023).

Dies kommt z. B. auch in Aussagen von zwei Ausbildungsleitern zum Ausdruck: „Verglichen mit den konventionellen Wasserstofferzeugern (partielle Verbrennung, Steamreforming), liefert so eine Anlage (zur Erzeugung von grünem Wasserstoff) eher kleinere Mengen an Wasserstoff. Ich hatte auch deutlich gemacht, dass das dann nur eine andere Quelle ist, die in das Leitungssystem einspeist. An den Beruflichkeiten ändert sich nichts.“ (Ausbildungsleiter, Chemie-01-01) „Es spiegelt ein wenig das Selbstverständnis in der Prozessindustrie wider, dass dort eh schon der Umgang mit Wasserstoff Alltagsgeschäft ist. Somit kommt dieses Thema im Teil der betrieblichen Ausbildung und nicht in den „vorgeschalteten“ Ausbildungszentren vor.“ (Ausbildungsleiter, Chemie-01-02)

Diese Informationen sind eine erste Basis für die hier zu beantwortenden Forschungsfragen zum qualitativen Fachkräftebedarf auf mittlerer Ebene. Andere Interviews außerhalb der Chemieindustrie zeigten, dass die Herstellung von grünem Wasserstoff, der zugehörige Anlagenbau und die Speicherung sowie der Transport für Unternehmen und Mitarbeitende eine neue Herausforderung darstellen.

Die Herausforderung für Unternehmen, die bisher nicht mit Wasserstoff arbeiteten, besteht ganz wesentlich im Transfer, der Anwendung und Umsetzung von Lösungen in ihre Aus- und

Weiterbildung. Dies beginnt mit Fragen nach den für die jeweiligen Arbeitsaufgaben passenden Ausbildungsberufen.

Beispiel: In einem Fall wurde von einem Elektrolyseurhersteller anfangs ein neuer Ausbildungsberuf für notwendig gehalten. „Letztendlich hat sich in der Zusammenarbeit mit dem BIBB herausgestellt, dass vorhandene Berufe wie der Mechatroniker passen.“ (Projektleiter, Erzeugung-01-03)

Auf Grundlage eines systematischen Analyseansatzes entlang der Arbeitsprozesse rund um die Wasserstofferzeugung wurde die Passung vorhandener, einschlägiger Ausbildungsberufe und deren Ausbildungsordnungen geprüft und bestätigt³. Bezogen auf ausgewählte Arbeitsaufgaben werden für die Besetzung entsprechender Arbeitsplätze mehrere Ausbildungsberufe als geeignet gesehen. Aus der Untersuchung heraus wird kein Neuordnungsbedarf für notwendig gehalten. Hinweise auf den Bedarf zusätzlicher, neuer Ausbildungsberufe gibt es nicht.

Die Fort- und Weiterbildung betreffend, wird aus den Analysen erkennbar, dass bestehende Rechtsverordnungen weiterführende, sicherheitsrelevante und notwendige Qualifizierungsinhalte, die das Arbeiten an Wasserstofferzeugungsanlagen betreffen, beinhalten. Sie werden bedarfsorientiert durch Schulungen und Unterweisungen im Rahmen der Anpassungsfortbildung vermittelt.

Weitere Informationen im Teilbericht Erzeugung

3.7.2 Stahlindustrie

Der Abgleich bestehender Ausbildungsordnungen mit antizipierten Veränderungen in Berufsprofilen weist aktuell auf keinen akuten ordnungsrelevanten Anpassungsbedarf hin. Zum jetzigen Zeitpunkt und aktuellem Kenntnisstand wird auch von keinem berufsspezifischen Weiterbildungsbedarf für bereits ausgebildete Fachkräfte ausgegangen.

Betrachtet man die technikoffene Kompetenzvermittlung innerhalb der Ausbildung von Fachkräften im Stahlsektor, lässt sich zwar sagen, dass die heutigen Fachkräfte ausreichend vorbereitet sind, die grüne Transformation der Stahlindustrie kompetent zu begleiten und zu unterstützen. Jedoch kann diese Aussage nur auf Grundlage von Annahmen getroffen werden, da zum Zeitpunkt der Untersuchung die Umstrukturierung in der Stahlindustrie zwar begonnen, jedoch kaum umgesetzt ist. Die Beobachtung von möglichen Tätigkeitsveränderungen und sich daraus ergebenden Änderungsbedarfen war daher nicht möglich. Ein Abgleich zwischen bestehenden Ordnungsmitteln und sich durch die Technologieumstellung möglicherweise ergebenden Änderungsbedarfe konnte nur theoretisch vollzogen werden. Somit können keine abschließenden Aussagen über Veränderungen im Qualifikationsbedarf getroffen werden.

³ Siehe Abschlussteilbericht für den Sektor Erzeugung. Hier ist die ausführliche Analyse der Ordnungsmittel und in Frage kommender Berufe entlang der Prozesskette dokumentiert.

Als sinnvoll werden zum aktuellem Zeitpunkt eher allgemeinere Weiterbildungsmöglichkeiten auf Umsetzungsebene für Fachkräfte im Stahlsektor angesehen, die auf eine Wissensvermittlung in Bezug auf Wasserstoff im Generellen, die Einsatzmöglichkeiten in der Stahlproduktion sowie Sicherheitsaspekte abzielen und angehende sowie bereits etablierte Fachkräfte für die zukünftige Arbeit vorbereiten. Weiterbildungsangebote dieser Art bestehen bereits und werden von Stahlunternehmen genutzt. Inwieweit derartige Kenntnisse ggf. auf Ordnungsebene verankert werden müssen, ist aktuell nicht absehbar. Aufgrund der mangelnden Möglichkeiten zur Beobachtung von Veränderungen und aus Kapazitätsgründen wurden im Projekt weiterführende Untersuchungen in diesem Sektor zurückgestellt.

Weitere Informationen im Teilbericht Stahlerzeugung

3.7.3 Chemie- und Raffinerieindustrie

Die Betrachtung der **chemischen Industrie** im Rahmen des Projekts war aus mehreren Gründen relevant. Zum einen ist sie mit energiebedingten 39,5 Mt CO₂ im Jahr 2019 (VCI 2021, S. 117) ein relevanter Emittent von CO₂ und zum anderen ist sie mit 12,5 Mrd. m³ Wasserstoff bisher der größte Verbraucher von Wasserstoff in der deutschen Wirtschaft (WEHL 2022). Die Herstellung von Kraft- und Brennstoffen in dem Wirtschaftszweig der Mineralölverarbeitung, also in den Betrieben der **Raffinerien**, ist ein weiterer Teilbereich des hier zu untersuchenden Forschungsfelds. Der Wirtschaftszweig der Kokerei und Mineralölverarbeitung hatte einen CO₂-Ausstoß von 26,89 Mt (STATISTISCHES BUNDESAMT DEUTSCHLAND 2022) und ist somit ein ähnlich großer Emittent von CO₂ wie die chemische Industrie. Die Raffinerien liefern zudem der chemischen Industrie Naphtha. Grüner Wasserstoff und Kohlenstoff aus nichtfossilen Quellen sind die wichtigsten Rohstoffalternativen zum Erdöl und Erdgas und ermöglichen die Dekarbonisierung der Produkte beider Industrien.

Chemische Grundstoffe, die mittels grünem Wasserstoff dekarbonisiert werden können, sind vor allem Ammoniak als Ausgangsstoff der Düngerwertschöpfungskette, Olefine und Aromaten in der Kunststoffwertschöpfungskette sowie Methanol. Im **Bereich der Kraftstoffe** ist es beispielsweise möglich, Benzin, Diesel und Kerosin synthetisch herzustellen. Bei den Investitionen in neue verfahrenstechnische Anlagen muss bedacht werden, dass diese oftmals eine Lebensdauer von über 50 Jahren aufweisen und somit Investitionsentscheidungen heute eine deutlich langfristige Wirkung haben.

Der technologische Wandel in den Produktionsprozessen, der durch die Umstellung auf grünen Wasserstoff hervorgerufen wird, ist der Ausgangspunkt für die Analyse der Änderungen der Qualifikationsbedarfe an den entsprechenden Arbeitsplätzen und wird im Folgenden skizziert.

Ammoniak (NH₃) ist ein bedeutender Ausgangsstoff für die Herstellung von Harnstoff und somit von Kunstdüngern. Ammoniak wird dabei mittels des Haber-Bosch-Verfahrens aus Wasserstoff und Stickstoff synthetisiert. Der Einsatz von grünem Wasserstoff statt Wasserstoff aus Erdgas, kann die prozessbedingten Kohlendioxid-Emissionen vermeiden (VCI 2019, S. 32). Für den nachfolgenden Schritt der Harnstoffsynthese muss jedoch eine

alternative und nichtfossile Kohlenstoffquelle herangezogen werden (HEBLING u. a. 2019). Die technologische Reife von TRL⁴ 9 für die elektrolyse-basierte Ammoniaksynthese wird im Jahr 2031 erwartet (VCI 2019, S. 34).

Methanol ist ein wichtiger chemischer Rohstoff, der auch als Energieträger genutzt werden kann (HEBLING u. a. 2019). Als Rohstoff kann er für Kunststoffe und synthetische Kraftstoffe Verwendung finden. Herkömmliche Verfahren der Methanolsynthese sind die Partialoxidation von Schweröl sowie das Dampfreformieren von Erdgas (VCI 2019, S. 37). Alternative Verfahren, die keine oder weniger fossile Kohlendioxidemissionen verursachen, sind die Erdgas-Methan-Pyrolyse, die Biomassevergasung und die Wasserelektrolyse. Alle Verfahren erzeugen ein Synthesegas aus Wasserstoff und Kohlenmonoxid bzw. Kohlendioxid, aus dem Methanol synthetisiert wird. Die CO₂-basierten Methanolrouten sind technologisch fortgeschritten, jedoch muss an der Gesamtumsetzung und an der Integration in größere Produktionsketten noch gearbeitet werden (ZELT 2021, S. 188).

Kunststoffe bilden eine der bedeutsamsten Produktgruppe der chemischen Industrie und finden Anwendung in sämtlichen Bereichen des Lebens. Im Jahr 2021 wurden 15 Mt Kunststoff in Deutschland verarbeitet (BRANCHENSTATISTIK DER KUNSTSTOFFVERARBEITUNG IN DEUTSCHLAND 2022). In Deutschland fielen entlang der Kunststoffwertschöpfungskette schätzungsweise ca. 49 Mt CO₂ im Jahr 2017 an, davon entfallen ungefähr 35 Mt CO₂ auf die Kunststoffverbrennung (AGORA ENERGIEWENDE/WUPPERTAL INSTITUT 2019, S. 182). Das Rohöl wird in den Raffinerien zu Naphtha (Rohbenzin) weiterverarbeitet, das insbesondere für die Kunststoffproduktion benötigt wird. Jährlich werden in Deutschland ca. 21,5 Mt Naphtha verbraucht (VCI 2019, S. 42). Naphtha wird in sogenannten Steamcrackern bei bis zu 900°C zu Olefinen und Aromaten weiterverarbeitet. Die Ausgangsprodukte des Steamcrackers werden auch als High Value Chemicals (HVC) bezeichnet. Mit den HVC können die verschiedensten Kunststoffe, wie beispielsweise Polyethylen, Polypropylen, aber auch synthetische Fasern, Harze und Waschmittel hergestellt werden (BAZZANELLA/AUSFELDER 2017, S. 70).

Mittels der **Fischer-Tropsch-Synthese** ist es möglich, aus Synthesegas, das aus Kohlenmonoxid und Wasserstoff besteht, synthetisches Naphtha herzustellen (VCI 2019, S. 43). Die Fischer-Tropsch-Synthese kann CO₂ nicht direkt verarbeiten. Hierfür muss im Vorfeld das energiearme CO₂ mit hohem Energieaufwand zu CO umgewandelt werden. Dabei kommt das „Reverse-Water-Gas-Shift“-Verfahren zum Einsatz (ZELT 2021, S. 161). Es ist zu erwarten, dass der Fischer-Tropsch-Synthese-Pfad mit grünem Wasserstoff und CO₂ ab dem Jahr 2030 ein TRL von 9 erreichen wird (VCI 2019, S. 49).

Statt durch fossiles Naphtha im Steamcracker Olefine und Aromaten zu erzeugen, ist es mittels der **Methanol-to-Olefin-Synthese** bzw. der **Methanol-to-Aromatics-Synthese** möglich, die benötigten Stoffe auf Grundlage von Methanol zu erzeugen. Zu den beiden Syntheseverfahren wurde bereits intensiv Forschung betrieben, so dass bei den MTO-Prozessen die technologische Reife bei TRL 9 und bei MTA bei TRL 7 liegt (VCI 2019, S. 43;

⁴ Technology Readiness Level.

BAZZANELLA/AUSFELDER 2017). Würden sämtliche Kunststoffprodukte mittels der MTO/MTA-Produktionskette produziert werden, würde ein Bedarf an elektrischer Energie von ca. 320 TWh entstehen (AGORA ENERGIEWENDE/WUPPERTAL INSTITUT 2019, S189), was ungefähr 64 Prozent des Gesamtstromverbrauchs in Deutschland im Jahr 2019 entspricht (AG ENERGIEBILANZEN E.V. 2020).

Synthetische Kraftstoffe auf Grundlage von regenerativ hergestelltem Strom und nichtfossilem Wasserstoff haben das Potenzial, die CO₂-Emissionen im Verkehrssektor stark zu senken. Konkret ist hiermit die synthetische Herstellung von Benzin, Diesel und Kerosin gemeint, aber auch synthetische Treibstoffe, die keine konventionelle Entsprechung haben, wie beispielsweise Dimethylether. Der Vorteil von synthetischen Kraftstoffen ist, dass die bestehenden Fahrzeugflotten sowie die dazugehörigen Infrastrukturen weiterhin genutzt werden können. Die Herstellung von synthetischen Kraftstoffen ist sehr energieaufwendig. Weitestgehend besteht Konsens, dass der Flugverkehr aus technischen Gründen langfristig auf flüssige Kraftstoffe angewiesen ist und somit zur Dekarbonisierung nur synthetische Kraftstoffe und Biokraftstoffe in Frage kommen. Für die Herstellung von synthetischen Kraftstoffen stehen vor allem die Produktionsrouten über die Methanol-Synthese und der Fischer-Tropsch-Synthese zur Diskussion (NATIONALE PLATTFORM ZUKUNFT DER MOBILITÄT, S. 14).

Die **Fischer-Tropsch-Synthese** stellt einen möglichen Startpunkt der Kraftstoffsynthese dar. Das synthetische Naphtha kann durch Hydrocracking, Isomerisierung und Destillation zu einem Kraftstoff-Mix aufbereitet werden (ARNOLD/KOBIELA/PASTOWSKI 2018). Die Fischer-Tropsch-Synthese kann in bestehenden Erdöl-Raffinerien integriert werden und somit ist die Nutzung der vorhandenen Infrastruktur möglich (NATIONALE PLATTFORM ZUKUNFT DER MOBILITÄT, S. 14). Besonders vorteilhaft ist bei der Kerosinherstellung auf Grundlage des Fischer-Tropsch-Verfahrens, dass bereits eine Beimischungszulassung bis zu einem Anteil von 50 Prozent im Luftfahrtsektor besteht (MKS WISSENSCHAFTLICHE BEGLEITFORSCHUNG, S. 15; BUNDESREGIERUNG 2021, S. 12). An der Fischer-Tropsch-Synthese zur Herstellung von eFuels arbeiten Firmen wie die deutsche Sunfire, die US-amerikanische LanzaTech oder auch New CO₂Fuels aus Israel (ARNOLD/KOBIELA/PASTOWSKI 2018, S. 70).

Ein anderer Startpunkt der Herstellung synthetischer Kraftstoffe ist die **Methanolsynthese**. Grundsätzlich kann Methanol konventionellen Kraftstoffen beigemischt und somit in heutigen Verbrennungsmotoren eingesetzt werden. Die Nutzung von reinem Methanol bedarf jedoch der Anpassung von Verbrennungsmotoren (NATIONALE PLATTFORM ZUKUNFT DER MOBILITÄT, S. 14). Methanol kann zur Kraftstoffherstellung zu Dimethylether (DME) und zu langkettigen Kohlenwasserstoffen wie Benzin (Methanol-to-Gasoline) oder Kerosin (Methanol-to-jet) umgewandelt werden. Im Gegensatz zu der Fischer-Tropsch-Route ist die Methanolroute noch nicht für die Bereitstellung von Kerosin für den Flugverkehr zugelassen (BUNDESREGIERUNG 2021, S. 10; MKS WISSENSCHAFTLICHE BEGLEITFORSCHUNG, S. 19). Der TRL der Methanolroute wird aktuell für das Jahr 2020 auf 7 bis 9 eingeschätzt. Eine technologische Reife von TRL 9 und somit eine großvolumige Verfügbarkeit wird bis zum Jahr 2030 erwartet (ZELT 2021, S. 189).

Auf Grundlage der hier beschriebenen technologischen Veränderungen lassen sich die potentiellen Auswirkungen auf betroffene Arbeitsprozesse diskutieren. Entlang der wasserstoffbezogenen Wertschöpfungsketten in der Chemieindustrie und den Raffinerien

lassen sich eine Vielzahl von betroffenen Teilprozessen und Aufgabencluster identifizieren. Der Fokus liegt jedoch hier ausschließlich auf technischen Prozessen und Aufgaben, da insbesondere hier sicherheitsrelevante Tätigkeiten und Verantwortungsbereiche auf mittlerer Qualifikationsebene betroffen sind. Dementsprechend werden in dieser Studie folgende Handlungsfelder näher betrachtet:

1. Anlagen planen und entwickeln
2. Anlagen errichten
3. Anlagen überprüfen und in Betrieb nehmen
4. Anlagen betreiben
5. Anlagen überwachen
6. Anlagen instand halten

Für die hier aufgezeigten Handlungsfelder kommen jeweils eine Vielzahl unterschiedlicher Berufe in Betracht, die nicht nur im Chemiesektor, sondern in vielen weiteren Wirtschaftszweigen zum Einsatz kommen.

Am Beispiel der Ammoniaksynthese (siehe Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) und der vorgelagerten Dampfreformierung von Erdgas zur Wasserstoffgewinnung, der Methanolsynthese (siehe Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**), aber auch anhand der Reinigung von Mineralölprodukten in den Raffinerien mittels Wasserstoff (KRETSCHMER 2021) wird deutlich, dass der Umgang mit Wasserstoff seit Jahrzehnten in den Betrieben der chemischen Industrie und in den Raffinerien in allen betroffenen Handlungsfeldern eine Selbstverständlichkeit ist.

Der Umbau der Produktionsketten zur Dekarbonisierung mittels grünen Wasserstoffes wird beträchtliche Investitionen in Forschung und Entwicklung von Produkten und Produktionsverfahren sowie den Bau neuer Produktionsanlagen erfordern. Die Arbeitsprozesse der Fachkräfte werden sich hierbei jedoch nicht grundlegend ändern, da sich die beschriebenen technischen Veränderungen im Spektrum der üblichen chemischen Verfahrenstechnik bewegen. Eine Anpassung der Qualifikationen und Qualifikationsstrategien aufgrund des Einsatzes von grünem Wasserstoff werden deshalb in diesem Sektor nicht notwendig sein. Vielmehr kann die Chemieindustrie als Vorbild für andere Sektoren dienen.

Weitere Informationen im Teilbericht Chemie- und Raffinerieindustrie
--

3.7.4 Mobilität

Der Fokus der Untersuchung im Sektor Mobilität wurde auf Kfz-Werkstätten gerichtet, weil hier im Rahmen des Service und der Instandhaltung der Schwerpunkt im Umgang mit wasserstoffbetriebenen Systemen liegt und sich Ergebnisse exemplarisch auch auf andere Anwendungen transferieren lassen. Zudem wurden für die Anwendungsbereiche Schiffs- und Flugverkehr kurze Ausblicke erstellt.

Berufe, die für die Arbeit an Fahrzeugantrieben ausgebildet werden, sind in erster Linie Kraftfahrzeugmechatroniker/-innen, Karosserie- und Fahrzeugbaumechaniker/-innen und Land- und Baumaschinenmechatroniker/-innen.

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 Hochvoltssystemen⁵. Mit der Verbreitung der Elektromobilität geht eine deutliche Veränderung der fahrzeugtechnischen Berufe einher, die in den Ordnungsmitteln bereits Eingang fand.

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.

Die Nutzung von Brennstoffzellenfahrzeugen verursacht neue Anforderungen an Kenntnisse und Fähigkeiten der zuständigen Fachkräfte, 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.

Wasserstoffbetriebene Fahrzeuge mit Verbrennermotor sind technisch vergleichbar mit konventionellen Verbrennern sowie mit Fahrzeugen, die mit Flüssiggas (LPG) betrieben werden und bereits seit Jahrzehnten vorhanden sind.

Der Arbeitsschutz ist bei Arbeiten in Wasserstoff-Werkstätten von zentraler Bedeutung. Gefahrenpotenziale bestehen neben den hohen Spannungen durch die Entzündbarkeit des

⁵ 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).

Wasserstoffs und durch die Drücke in den Leitungen. Die Risiken sind beherrschbar, erfordern aber Kompetenzen zur Gefahrenvermeidung.

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 Arbeit an Brennstoffzellenfahrzeugen bevorsteht.

Die Berufsgenossenschaft Holz und Metall hat Qualifizierungsstufen für Hochvoltsysteme und Gasantriebe geregelt. Die Qualifizierungen sind nach E-Stufen (Entwicklung/Produktion) und S-Stufen (Service/After-sales) unterteilt (vgl. DGUV 2018, S. 5). Angeboten und umgesetzt werden diese Weiterbildungen durch Bildungsanbieter sowie Produktschulungen der Fahrzeughersteller.

Die betriebliche Aus- und Weiterbildung berücksichtigt diese Techniken, dort wo gefordert, grundsätzlich bereits über Jahre.

Am Lernort Berufsschule ist das Thema Wasserstoff noch nicht in der Breite angekommen. Erste Schulen arbeiten daran, Wasserstoff-Inhalte in den Unterricht zu integrieren und Qualifizierungsangebote zu schaffen. Manche Schulen arbeiten dafür mit regionalen Wasserstoffinitiativen und Weiterbildungsanbietern zusammen.

In den Ordnungsmitteln, einschließlich der Ausbildungsrahmenpläne und Rahmenlehrpläne sind Ankerpunkte für wasserstoffbezogene Inhalte bereits enthalten. Allerdings ist eine umfassende „Gasqualifikation“ kein expliziter Ausbildungsstandard. In der Ausbildungsordnung des Kfz-Mechatronikers/der Kfz-Mechatronikerin 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. BUNDESGESETZBLATT 2013).

Auf Grundlage der vorliegenden Ergebnisse lässt sich für den Mobilitätsbereich keine abschließende ordnungspolitische Handlungsempfehlung formulieren. Ob die deutlichere Integration entsprechender Inhalte in den Ordnungsmitteln einschlägiger Berufe notwendig ist, sollte im Zuge der Neuordnungen gemeinsam mit den Sachverständigen erneut 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.

3.7.5 Wärmeversorgung

Die vorliegende Studie konzentriert sich auf den Sektor Wärmeversorgung und legt dabei den Schwerpunkt auf die Bereitstellung von Gebäudewärme mit dem Ausbildungsberuf Anlagenmechaniker/in Sanitär- Heizungs- und Klimatechnik. Weitere relevante Ausbildungsberufe für die Wasserstoffinfrastruktur und für Industriebetriebe, die Prozesswärme nutzen sind Querschnittsberufe aus dem Metall- und Elektrobereich: Mechatroniker/in, Elektroniker/in für Betriebstechnik, Rohrleitungsbauer/in, Industrie- und Konstruktionsmechaniker/in, Verfahrenstechniker/in.

Mittels Leitfaden gestützter Experteninterviews (KRUSE 2015, S.171) befragt die Studie Geschäftsführer/innen, Ausbildungsleiter/innen, Projektleiter/innen, Fachkräfte und weitere Personen aus dem Umfeld der Berufsbildungspraxis. Die Auswertung erfolgt nach der Methode der qualitativen Inhaltsanalyse nach KUCKARTZ UND RÄDIKER (2022).

Die Auswertungen der Experteninterviews bestätigen Erkenntnisse, die auch die in Phase I des H2PRO-Projekts durchgeführten Sektoranalyse für die Wärmeversorgung formuliert (Hiller 2023, S.30), und die sich in den Arbeiten der anderen Sektoren wiederfindet: Kompetenzen für Fachkräfte für den Einsatz von Wasserstoff können in Form von kurzen Weiterbildungen vermittelt werden – der Bedarf nach Änderung der Ausbildungsordnung oder der Schaffung eines neuen Berufs besteht nicht.

Gleichwohl gibt es durch die bevorstehenden Einsatz von Wasserstoff Qualifizierungsbedarf und Anforderungen an die Fachkräfte in unterschiedlichem Ausmaß, die nicht aus dem Blick geraten sollten. Die Studie fasst diese als Gesamtschau zusammen und ordnet die Anforderungen Tätigkeitsbereichen zu. In diesen Gesamtüberblick sind auch Anforderungen an die Persönlichkeit integriert.

Um zukünftige Aufgaben von Fachkräften in Hinblick auf Wasserstoff besser einordnen zu können, beschreibt die Studie die Ausgangssituation verschiedener Betriebe im Wärmesektor und deren Erwartungen an die Rolle von Wasserstoff. Dabei geht sie besonders auf den Beruf Anlagenmechaniker/in Sanitär- Heizungs- und Klimatechnik ein und stellt fest, dass die umfangreichen und anspruchsvollen Inhalte dieser Ausbildung von den Befragten teilweise als Hemmschuh für eine Spezialisierung gesehen werden. Außerdem ist der Bedarf an Fachkräften mit elektrotechnischen Kenntnissen im Gebäudesektor groß und für die Umsetzung von auf Wasserstoff basierten Anlagen für die dezentrale Energieversorgung unabdingbar. Abseits des Gebäudesektors gibt die Studie Hinweise zum Qualifizierungsbedarf für Fachkräfte in Industriebetrieben der Grundstoffproduktion (Nutzer von Prozesswärme) und wirft auch einen Blick auf die auf Wasserstofftechnologie spezialisierte Industrie, die sich in den letzten Jahren entwickelt hat.

3.8 Sektorübergreifende Befunde und Handlungsempfehlungen

Die Erzeugung und Nutzung grünen Wasserstoffs in der deutschen Wirtschaft erreicht viele Branchen und Wirtschaftsbereiche. Im Rahmen der Untersuchung wurden fünf ausgewählte Sektoren näher daraufhin untersucht, welche Qualifikationsanforderungen sich dadurch verändern oder neu entstehen, welche Ausbildungsberufe betroffen sind und ob dies Konsequenzen für die Fortschreibung der Ordnungsmittel hat.

Es kann festgestellt werden, dass ein großer Teil relevanter Ausbildungsberufe mehrfach und in unterschiedlichen Branchen betroffen ist (Tabelle 2).

Tabelle 2: Betroffene Ausbildungsberufe nach Sektoren (Erzeugung, Speicherung und Transport, Chemie, Stahl, Mobilität und Wärme)

Ergebnisse: Relevante Ausbildungsberufe						
Anlagenmechaniker/-in	X	X	X	X		
Anlagenmechaniker/-in für Sanitär-, Heizungs-, und Klimatechnik		X				X
Chemikant/-in und Produktionsfachkraft Chemie	X		X			
Elektroniker/-innen, versch.	X	X	X	X	X	X
Fachinformatiker/-in	X	X	X			
Konstruktionsmechaniker/in	X	X	X	X		
Karosserie- und Fahrzeugbaumechaniker/-in					X	
Kraftfahrzeugmechatroniker/-in					X	
Land- und Baumaschinenmechatroniker/-in					X	
Industriemechaniker/-in	X	X	X	X		
Mechatroniker/-in	X	X	X	X	X	
Rohrleitungsbauer/-in		X				
Schornsteinfeger/-in						X
Planungsberufe (Technische/-r Systemplaner/-in; Technische/-r Produktdesigner/-in)	X	X	X	X		
Verfahrenstechnologe/-in Metall				X		

Gleichzeitig wurde deutlich, dass generell keine drängenden Änderungen in den Ausbildungsordnungen und Rahmenlehrplänen dieser Ausbildungsberufe notwendig sind. Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass es keine Notwendigkeit für ordnungspolitische Maßnahmen auf Bundesebene gibt.

Vielmehr sind in den Ordnungsmitteln entsprechende technikoffen formulierte Ankerbegriffe vorhanden, die eine flexible, auf Wasserstoff gerichtete Ausbildung ermöglichen⁶.

Praxisunterstützende Maßnahmen im Sinne von Förderprogrammen oder ähnlichem werden ebenfalls nicht für notwendig befunden.

Beispiele guter Praxis wurden identifiziert und im Rahmen des Projekts weiterverbreitet.

Die Initiative und das Engagement von Ausbildern/-innen und Lehrer/-innen, dass demonstrieren die Beispiele, können durch Wertschätzung oder durch Kleinprojekte auf regionaler Ebene gefördert werden. Des Weiteren gibt es bereits geförderte Projekte, die sich mit grünem Wasserstoff befassen und im Zusammenhang damit auch Themen der Berufsbildung verfolgen.

Weiterhin konnte kein Bedarf an zusätzlichen bundeseinheitlichen Fortbildungsregelungen oder an der Änderung vorhandener bundeseinheitlicher Fortbildungsregelungen ausgemacht werden. Für die Fort- und Weiterbildung zum Thema grüner Wasserstoff gibt es sektorbezogene und aufgabenbezogene ausreichend Regelungen, z. B. von Berufsgenossenschaften, die zum Teil verbindliche Anforderungen an die Fortbildung von Mitarbeitenden stellen.

Dies wurde durch die Ergebnisse der AG 5, der [DIN-Normungsroadmap](#) bestätigt, an der H2PRO-Projektmitarbeitende beteiligt waren.

Je konkreter und kompetenzbezogener Fortbildungsangebote werden, desto aufgabenbezogener sind die hinterlegten Inhalte und die zu vermittelnden Kompetenzen. Wasserstoff ist hier dann nur ein Teilaspekt, z. B. bei Fortbildungen für das Arbeiten an bzw. die Instandhaltung von Wasserstoffherzeugungsanlagen (Abbildung 1).

⁶ Ein anschauliches Beispiel hierfür liefert die Ausbildungsverordnung für den Beruf Elektroniker/-in für Maschinen und Antriebstechnik. Die dort enthaltene Berufsbildposition „Instandhalten und Instandsetzen von Antriebs-, Energieerzeugungs- und Energiespeichersystemen“ (§4 Absatz2 Nummer14) wurde bewusst abstrakt formuliert, sodass beispielsweise unter Energieerzeugungssystemen Wasserstoff-Brennstoffzellen und unter Energiespeichersystemen Wasserstofftanks verstanden werden können.



Abbildung 2: Je konkreter, desto stärker aufgaben- und kompetenzbezogen

Es geht also oft nicht um eine wasserstoffspezifische, sondern vielmehr um eine aufgabenbezogene, „maßgeschneiderte“ Fortbildung der Mitarbeitenden, wenn es um die konkrete Befähigung geht. Solche Angebote zu entwickeln, liegt zumeist in den Händen der Betreiber und/oder Errichter der Anlagen selbst. Ein wesentlicher Teil der Qualifizierung erfolgt informell und im Prozess der Arbeit.

Über formale, in Ausbildungsordnungen und Fortbildungsregelungen gesetzte Mindestforderungen hinaus, liegt es deshalb in der Hand der Akteure (Unternehmer, Ausbilder, Lehrer) in der Aus- und Weiterbildungspraxis eigenständig wasserstoffbezogene Inhalte zu vermitteln.

Ein weiteres Handlungsfeld ist die berufliche Erstausbildung. Wasserstofftechniken haben für dieses Feld einen starken exemplarischen Charakter, weil hier Bezüge zur Transformation der Wirtschaft wie auch der Energiewende hergestellt werden können, wie die folgenden Ansätze demonstrieren sollen.

Aus diesen Befunden lassen sich folgende Handlungsempfehlungen ableiten:

Allgemein- und Fachwissen zur Energiewende durch Wasserstoffbezug stärken

Das Thema Wasserstoff bietet sehr gute Anknüpfungspunkte, um technologische und gesellschaftliche Zusammenhänge der Energiewende zu behandeln. Besonders Berufsschulen können die Wasserstoffthematik schon frühzeitig aufnehmen. Diese Möglichkeit kann genutzt werden, um das Wissen der Schülerinnen und Schüler im Bereich Energiewende über den beruflichen Bezug hinaus zu stärken und weiterführende Diskussionen anzuregen. Thematisch bieten sich da viele Bezugspunkte, die im Rahmen des Projekts gesammelt und mit Praxispartnern mehrfach diskutiert wurden (Tabelle 3).

Tabelle 3: Wasserstoffbezogene Themenfelder im Verhältnis zu den bearbeiteten Sektoren

Themen	H ₂ -Erzeugung	Transport/ Speicherung	Stahl	Chemie	Wärme	Mobilität
Dichtigkeit	X	X	X	X	X	X
„Versprödung“, Werk- und Verbundstoffe	X	X		X	X	X
Druckanlagen/ Verdichtung	X	X		X	X	X
Sicherheit, Explosionsschutz	X	X	X	X	X	X
Wirkungsgrad, Rückverstromung	X				X	X
Technik/Anlagen/ Verfahren	Elektrolyseur (PEM, AEL usw.)	Rohrnetze, Verdichter, Gasdruckregel- anlagen, Hochdruckbehälter, Derivate (efuels, Ammoniak)	Direkt- reduktions- anlage	Haber-Bosch- verfahren u.w.	Verteilnetze, Wärmeerzeuger, Saisonale Speicher	Verbrenner (LOHC), Brennstoff- zelle

Möglichkeiten für Lernortkooperationen und Partnerschaften nutzen

Durch Lernortkooperation kann Auszubildenden ermöglicht werden, ihre Kenntnisse im Bereich Wasserstofftechnologien und Energiewende zu erweitern, wenn bestimmte Technologien im eigenen Ausbildungsbetrieb nicht angewandt werden oder entsprechende Labore in der Berufsschule nicht vorhanden sind. Hier bieten auch digitale Labore oder digitale Zwillinge gute Möglichkeiten zur Zusammenarbeit. Daher bietet es sich an, Potenziale für Lernortkooperationen in den Wasserstoffregionen zu prüfen und entsprechende Initiativen zu stärken.

(Über)regionale Vernetzung von Leuchtturmprojekten realisieren

In unterschiedlichen Regionen werden bereits Leuchtturmprojekte umgesetzt, die andernorts als Ideengeber oder Vorbild dienen können. Eine bessere überregionale Vernetzung der Akteure und Projekte kann dazu beitragen, den Kompetenzaufbau im Bereich Wasserstoff und Energiewende zu unterstützen.

Attraktivität von Energiewendeberufen in der Berufsorientierung stärken

In der Transformation hin zur Klimaneutralität kommt der dualen Berufsausbildung eine Schlüsselrolle zu. Durch Wasserstoff und andere grüne Technologien besitzen die beteiligten Ausbildungsberufe eine hohe Zukunftsrelevanz, die in der Berufsorientierung hervorgehoben werden sollte, um junge Menschen für eine Berufsausbildung in den entsprechenden Industrien und Gewerken zu gewinnen.

Berufsbildung in Wasserstoffstrategien

Die Fachkräftequalifizierung wird in regionalen und überregionalen Wasserstoffstrategien teilweise nur oberflächlich erwähnt. Hier bietet es sich an, regionale Berufsbildungsakteure in den Strategiefindungsprozess einzubeziehen, um Maßnahmen zur Bedarfserhebung und Qualifizierung frühzeitig erarbeiten und konkretisieren zu können.

Transparenz schaffen und Beratung anbieten

In Betrieben, die in der Wasserstoffwirtschaft tätig werden wollen, bestehen teilweise noch Informationsdefizite und Unsicherheiten hinsichtlich der notwendigen Qualifizierungen und entsprechender Rechtsvorgaben. Hier können Beratungsangebote und mehr Transparenz seitens zuständiger Stellen, Verbänden oder Berufsgenossenschaften Abhilfe schaffen.

4 Zielerreichung

Die Forschungsfragen konnten beantwortet werden. Im Bearbeitungsprozess, insbesondere in der zweiten Projekthälfte, wurde sich auf drei der insgesamt fünf ausgewählten Sektoren konzentriert.

Eine intensive Vernetzung des Projekts mit Akteuren und Akteurinnen aus Politik und Praxis fand statt. Hierfür war die durch das Projekt am 07. Februar 2023 organisierte erste Fachtagung mit dem Titel „Wasserstoff, wer kann’s? – Fachkräftequalifizierung für den Schlüsselrohstoff der Zukunft“ relevant. Sie wurde von ca. 120 Teilnehmenden besucht. In den durch das Projektteam angebotenen Workshops zu den einzelnen Sektoren fand ein lebendiger Austausch statt. Damit konnte zusätzlich eine Rückkopplung des Projektes mit der Berufsbildungspraxis erzielt werden.

Im Juni 2024 fand die abschließende, zweite Fachtagung statt, ebenfalls mit nahezu 100 Teilnehmenden.

Die Tagungsdokumentationen sind über die BIBB-Website frei zugänglich:

<https://www.bibb.de/de/165617.php>

Die folgenden Planungsinstrumente demonstrieren, wie die Einzelziele erfüllt und Meilensteine erreicht wurden.

4.1 Meilensteinplan

Tabelle 4: Meilensteinplan des Projekts H2PRO

Nr.	Meilenstein (MS)	Termin
MS 1	Projektstart	01.10.2021
MS 2	Sektoranalyse abgeschlossen	06/2022
MS 3	Erstes Factsheet übermittelt, danach fortlaufend im Projektverlauf	06/2022
MS 4	Experteninterviews geführt/Zwischenergebnisse veröffentlicht	12/2022
MS 5	Erste Fachtagung zum Zwischenstand durchgeführt	12/2022
MS 6	Fallstudien durchgeführt	09/2023

Nr.	Meilenstein (MS)	Termin
MS 7	Zwischenbericht	09/2023
MS 8	Validierungsworkshop hat stattgefunden	03/2024
MS 9	Handlungsempfehlungen erarbeitet	06/2024
MS 10	Artikel für Peer-Review-Verfahren eingereicht	06/2024
MS 11	Zweite Fachtagung für die Ausbildungspraxis durchgeführt	06/2024
MS 12	Projektabschluss/Gesamtstudie und Abschlussbericht erstellt	09/2024

4.2 Projektplan

Tabelle 5: Projektplan H2PRO

Arbeitspakete/ Arbeitsschritte	IV/ 2021	2022 (in Quartalen)			2023 (in Quartalen)			2024 (Quartal I-III)		
Projektstart	M1									
Personalakquise										
Sektoranalysen		M2								
Dokumentation (Factsheets)		M3		M3		M3		M3		
Experteninterviews				M4						
Fachtagung-Zwischenstand				M5						
Zwischenbericht							M6			
Fallstudien							M7			
Validierungs-Workshop								M8		
Handlungsempfehlungen									M9	
Artikel									M 10	
Fachtagung-Abschluss									M 11	
Abschlussbericht, Gesamtstudie und Projektende										M 12

4.3 Begründung der Einsparung von Mitteln

Im Berichtszeitraum konnten Mittel eingespart werden, da durch den Abgang von Personal geplante Mittel nicht vollständig ausgeschöpft wurden. Trotz dieser Anpassungen wurden die Projektziele durch eine vorausschauende Zeitplanung sowie die konsequente Anwendung forschungsökonomischer Grundsätze erreicht.

Ein weiterer Grund für die Einsparungen war die Kooperation mit dem Berufsbildungs- und Technologiezentrum (BTZ) Osnabrück. Diese Zusammenarbeit erwies sich als besonders gewinnbringend, da das BTZ im Rahmen der zweiten Fachtagung sowohl Räumlichkeiten als auch zusätzliche Unterstützungsleistungen bereitstellte. Dies führte nicht nur zu einer

deutlichen Reduktion der Kosten, sondern förderte auch eine intensivere Einbindung in das Netzwerk relevanter Akteure.

Zudem wurde die Mittelverwendung unter Berücksichtigung der Vorgaben der Bundeshaushaltsordnung (BHO) sorgfältig und sparsam geplant.

5 Ausblick und Transfer

Seit dem Projektbeginn im Oktober 2021 hat sich an der Aktualität des Themas Wasserstofferzeugung und -verwendung in der deutschen Wirtschaft wenig verändert, auch wenn das Thema weniger Aufmerksamkeit in der breiten Öffentlichkeit genießt. Vielmehr ist das allgemeine Verständnis um die Rolle des Wasserstoffs in der dekarbonisierten Wirtschaft und den damit einhergehenden Veränderungen gestiegen. Die Diskussionen verlagern sich somit auf die Arbeitsebenen der jeweiligen Teilbereiche. So auch in dem Bereich der Berufsbildung.

In diesem Sinne gilt es im Nachgang des Projekts vor allem zu prüfen, wie die Berufsbildungspraxis im Sinne der in Kapitel 3.8 formulierten Handlungsempfehlungen unterstützt werden kann. Mit der zweiten Fachtagung und dem Vorstoß der Gründung der Community „H2PRO – Wasserstoff in der Berufsbildung“ mit Akteuren der Berufsbildungspraxis, hat das Projekt bereits die Initiative ergriffen, um den Wissenstransfer zwischen den Akteuren voranzutreiben.

Weitere Informationen zu der H2PRO-Community können Sie finden unter:
<https://leando.de/community/d8e5e982-693a-49f2-961f-c70e51a77639/about>

6 Veröffentlichungen

6.1 Pressemitteilungen

Wasserstoff: Fachkräftequalifizierung für den Schlüsselrohstoff der Zukunft
BIBB-Präsident Esser: „Duale Berufsbildung gut gerüstet“
07/2023 | Bonn, 27.03.2023
https://www.bibb.de/de/pressemitteilung_173616.php

6.2 Factsheets

Teilergebnisse sind halbjährlich ab dem II. Quartal 2022 in fünf Factsheets aufbereitet und in Deutsch und Englisch online gestellt:

- Factsheet 1: Berufliche Bildung als blinder Fleck im Wasserstoff-Diskurs
- Factsheet 2: Wasserstofferzeugung: „einschlägige“ Ausbildungsberufe passen – zusätzlich notwendig sind sicherheitsrelevante Qualifikationen
- Factsheet 3: Transformation in der Chemie- und Raffinerieindustrie: Die Berufe sind fit!
- Factsheet 4: Wasserstoff im Verkehrssektor: Zusätzliche Qualifizierungsbedarfe für Fachkräfte in den Werkstätten
- Factsheet 5: Umgang mit Wasserstoff für Fachkräfte im Wärmesektor: Ausbildungsberufe schaffen gute Grundlage, Anpassungsbedarf ist gering

6.3 BIBB-Discussion Paper

HILLER, Barbara: Wasserstoff für die Wärmeversorgung – erste Bestandsaufnahme zu wasserstoffbasierten Anwendungsfeldern und Anforderungen in der Fachkräftequalifizierung: Eine Sektoranalyse im Rahmen des Projekts „H2PRO: Wasserstoff – Ein Zukunftsthema der beruflichen Bildung im Kontext der Energiewende“. Bonn 2023. URL: https://res.bibb.de/vet-repository_781324 (Stand: 16.08.2023)

SCHNEIDER, Maximilian: Sektoranalyse: Wasserstoff im Verkehrssektor: eine erste Bestandsaufnahme zu technologischen Veränderungen und neuen Anforderungen in der Fachkräftequalifizierung. Bonn 2023. URL: https://res.bibb.de/vet-repository_781261 (Stand: 16.08.2023)

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 (Stand: 24.01.2023)

FELKL, Thomas: Sektoranalyse der Chemie- und Raffinerieindustrie: Eine Untersuchung im Rahmen des Projekts „H2PRO: Wasserstoff – Ein Zukunftsthema der beruflichen Bildung im Kontext der Energiewende“ 2022. URL: https://res.bibb.de/vet-repository_781297 (Stand: 15.08.2023)

SCHAD-DANKWART, Inga: Sektoranalyse: Wasserstoff in der Stahlindustrie – eine erste Bestandsaufnahme zu technologischen Veränderungen und neuen Anforderungen in der Fachkräftequalifizierung im Rahmen des Projektes „H2PRO: Wasserstoff – Ein Zukunftsthema der beruflichen Bildung im Kontext der Energiewende“ 2023. URL: https://res.bibb.de/vet-repository_781673 (Stand: 15.08.2023)

6.4 Weitere Zeitschriftenartikel

SCHNEIDER, Maximilian/SCHUR, Alexander: Die Bedeutung des Wasserstoffhochlaufs für den Arbeitsmarkt und die Berufsbildung in Deutschland /Berufsbildung in Wissenschaft und Praxis 4/2023 (52), S. 17-21

HILLER, Barbara/KAUFMANN, Axel: Grüne Wärme – eine Herausforderung für Ausbildungsberufe?/ Berufsbildung in Wissenschaft und Praxis 4/2023 (52), S. 22 - 26

ZINKE, Gert: Wasserstofferzeugung, wie ist die Berufsausbildung dazu aufgestellt? Lernen und lehren: Elektrotechnik, Informationstechnik, Metalltechnik, Fahrzeugtechnik / 38 (2023), H. 149

ZINKE, Gert: Energiewende am Beispiel Wasserstoff und Implikationen für Berufsbildende Schulen / Bildung und Beruf, Ausgabe Nov./Dez (2023), Seite 12 ff

6.5 Transfer in Praxis/Politik

- Juli 2024: BBFK in Innsbruck – Vortrag: „Ein Gas ist ein Gas, ist ein Gas – oder?“
- Juni 2024: BIBB-Fachtagung „Wasserstoff trifft Berufsbildungspraxis“
- April 2024: Arbeitsgruppe der Nationalen Weiterbildungsstrategie – Impulsvortrag: H2PRO
- April 2024: Online-Fachgespräch der Stiftung Umwelt und Arbeit der IGBCE - Mit beruflicher Qualifizierung zukunftsweisend Fachkräftebedarfe sichern für die Wasserstoffwirtschaft – Vortrag: „Qualifizierungsbedarf in der Wasserstoffwirtschaft“
- Dezember 2023: Future4VET – International Online Meeting “International vocational education and training cooperation in the green transition” – Keynote

- Juni 2023: Meet-Up Wasserstoffbildung – „Gute Beispiele für die Aus- und Weiterbildung im Chemikum Marburg“: – Impuls: „Wasserstoff – Ein Zukunftsthema der beruflichen Bildung“
- Juni 2023: TraSaar GmbH in Saarbrücken – Vortrag: „H₂ – eine Herausforderung für die berufliche Aus- und Weiterbildung?“
- Seit Mai 2023: DIN-Normungsroadmap Wasserstofftechnologien – Teilnahme an diversen AG-Sitzungen zu Weiterbildung
- April 2023: Jahrestagung der Junior-Ingenieur-Akademie – Teilnahme Panel-Diskussion
- April 2023: Jahrestagung BDEV Nord und DGVW Nord – Keynote: „Hochschulbildung und Ausbildung in technischen Bereichen – Herausforderung für die Versorgungswirtschaft“
- April 2023: Online-Sitzung des wirtschaftspolitischen Ausschusses des VAIS – Vortrag
- März 2023: BAVC-Arbeitskreis Berufsbildung in Wiesbaden: Vortrag
- Februar 2023: BIBB-Fachtagung „Wasserstoff – wer kann’s?“
- Oktober 2022: BMBF - Peer Learning Activity – Transition of VET towards Sustainability – Vortrag: “Are our trainings occupations fit for the green transformation?”
- September 2022: Nationaler Wasserstoff Rat – NWR-AG 1 – Fachkräfte: Vortrag „Wasserstoff – Fachkräftebedarf – Berufsbildung“ und Beratung
- Juli 2022: Fachforum „Ausbildung der Zukunft im Mitteldeutschen Revier“ – Vortrag
- März 2022: BAVC-Arbeitskreis Berufsbildung in Wiesbaden – Impulsvortrag
- März 2022: Midterm Conference SPIRE-SAIS – Vortrag „Hydrogen – a future topic of VET in the context of energy transition“

7 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)

AG ENERGIEBILANZEN E.V. (Hrsg.): Anwendungsbilanzen zur Energiebilanz Deutschland - Endenergieverbrauch nach Energieträgern und Anwendungszwecken (2020)

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 (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_Okttober2021_corr0222.pdf (Stand: 04.10.2022)

ARNOLD, Karin; KOBIELA, Georg; PASTOWSKI, Andreas: Technologiebericht 4.3 Power-to- liquids/-chemicals. In: Wuppertal Institut, ISI, IZES (Hrsg.): Technologien für die Energiewende. Teilbericht 2 an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Wuppertal, Karlsruhe, Saarbrücken. (2018)

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)

BAZZANELLA, Alexis; AUSFELDER, Florian: Low carbon energy and feedstock for the European chemical industry. Frankfurt am Main 2017. URL: https://dechema.de/dechema_media/Downloads/Positionspapiere/Technology_study_Low_carbon_energy_and_feedstock_for_the_European_chemical_industry.pdf

BMBF (Hrsg.): Update der Nationalen Wasserstoffstrategie: Turbo für die H2-Wirtschaft 2023. URL: https://www.bmbf.de/bmbf/de/forschung/energiewende-und-nachhaltiges-wirtschaften/nationale-wasserstoffstrategie/nationale-wasserstoffstrategie_node (Stand: 18.08.2023)

BMWi (Hrsg.): Energiedaten 2019: Gesamtausgabe. Stand: Oktober 2019 2019. URL: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energiedaten/energiedaten-gesamt-pdf-grafiken.pdf?__blob=publicationFile&v=1 (Stand: 23.08.2023)

BOGNER, Alexander; LITTIG, Beate; MENZ, Wolfgang: Interviews mit Experten 2014

BRANCHENSTATISTIK DER KUNSTSTOFFVERARBEITUNG IN DEUTSCHLAND (Hrsg.): Mengen und Umsatz der Kunststoff verarbeitenden Industrie nach Sektoren 2019/2020/2021 2022. URL: <https://www.gkv.de/de/statistik/> (Stand: 25.11.2022)

BUNDESGESETZBLATT (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

BUNDESREGIERUNG (Hrsg.): Die Nationale Wasserstoffstrategie (NWS) 2020. URL: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?__blob=publicationFile&v=20

BUNDESREGIERUNG, Die: PtL-Roadmap (2021), S. 1-29

DGUV (Hrsg.): Information 209-093. Qualifizierung für Arbeiten an Fahrzeugen mit Hochvoltsystemen 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)

DRÖGE, Kai: noScribe. AI-powered Audio Transcription (Version 0.3-0.5) [Computer software] 2024. URL: <https://github.com/kaixxx/noScribe>

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>

EPP, Julia; PFAFF, Theresa: Energiezukünfte für Power-to-X-Technologien. In: TATuP - Zeitschrift für Technikfolgenabschätzung in Theorie und Praxis 28 (2019) 3, S. 41-47

FELKL, Thomas: Sektoranalyse der Chemie- und Raffinerieindustrie: Eine Untersuchung im Rahmen des Projekts „H2PRO: Wasserstoff – Ein Zukunftsthema der beruflichen Bildung im Kontext der Energiewende“ 2023. URL: https://res.bibb.de/vet-repository_781297 (Stand: 15.08.2023)

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 (Stand: 03.10.2022)

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)

HEBLING, Christopher; RAGWITZ, Mario; FLEITER, Tobias; GROOS, Ulf; HÄRLE, Dominik; HELD, Anne; JAHN, Matthias; MÜLLER, N.; PFEIFER, T.; PLÖTZ, P.: Eine Wasserstoff-Roadmap für Deutschland. In: Fraunhofer Institut für System-und Innovationsforschung ISI (2019)

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

KPMG (Hrsg.): Wasserstoff: Ein Schlüssel zur Energiewende. Die deutsche Wasserstoffstrategie und ihre Potenziale 2023. URL: <https://hub.kpmg.de/de/wasserstoff-ein-schlüssel-zur-energiewende>

KRETSCHMER, Ansgar 2021: Wasserstoffbedarf der Chemieindustrie. In: CHEMIE TECHNIK, Ausgabe vom 26.04.2021. URL: <https://www.chemietechnik.de/energie-utilities/wasserstoff-einfacher-gehts-nicht-225.html>. URL: <https://www.chemietechnik.de/energie-utilities/wasserstoff-einfacher-gehts-nicht-225.html> (Stand: 24.11.2022)

KRICHEWSKY-WEGENER, Lena; ABEL, Sebastian; BOVENSCHULTE, Marc: Skills Development for Hydrogen Economies – Damit aus einer Wasserstoffstrategie eine Wasserstoff-

(weiter)bildungsstrategie wird. Working Paper of the Institute for Innovation and Technology. Berlin 2020. URL: https://www.iit-berlin.de/wp-content/uploads/2021/01/2020_11_iit-perspektive_Hydrogen-Economies.pdf (Stand: 25.01.2022)

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)

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)

MKS WISSENSCHAFTLICHE BEGLEITFORSCHUNG (Hrsg.): Biokerosin und EE-Kerosin für die Luftfahrt der Zukunft - von der Theorie zu Pilotvorhaben

MÖNNING, Anke; RONSIEK, 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 (Stand: 30.11.2022)

NATIONALE PLATTFORM ZUKUNFT DER MOBILITÄT (Hrsg.): WERKSTATTBERICHT ALTERNATIVE KRAFTSTOFFE KLIMAWIRKUNGEN UND WEGE ZUM EINSATZ ALTERNATIVER KRAFTSTOFFE. ARBEITSGRUPPE 1 KLIMASCHUTZ IM VERKEHR

NATIONALER WASSERSTOFFRAT (Hrsg.): Treibhausgaseinsparungen und der damit verbundene Wasserstoffbedarf in Deutschland. Grundlagenpapier 2023. URL: https://www.wasserstoffrat.de/fileadmin/wasserstoffrat/media/Dokumente/2023/2023-02-01_Grundlagenpapier_H2-Bedarfe_1.pdf (Stand: 28.03.2023)

NATIONALER WASSERSTOFFRAT (Hrsg.): Wasserstoff Aktionsplan 2021-2025. URL: **[Online-Adresse fehlt!]**

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 (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 (Stand: 10.03.2023)

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
(Stand: 19.09.2022)

QUASCHNING, Volker: Sektorkopplung durch die Energiewende. Anforderungen an den Ausbau erneuerbarer Energien zum Erreichen der Pariser Klimaschutzziele unter Berücksichtigung der Sektorkopplung. Berlin 2016. URL: <https://www.volker-quaschning.de/publis/studien/sektorkopplung/Sektorkopplungsstudie.pdf> (Stand: 18.06.2022)

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 (Stand: 20.09.2022)

RUNST, Petrik; OHLENDORF, Jana: Die Rolle des Handwerks auf dem Weg zu einem klimaneutralen Gebäudebestand. Göttingen 2015. URL: <https://publications.goettingen-research-online.de/handle/2/92457> (Stand: 10.03.2023)

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 (Stand: 14.06.2022)

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

STATISTISCHES BUNDESAMT DEUTSCHLAND (Hrsg.): GENESIS-Online: Ergebnis 85111-0001 2022. URL: <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online> (Stand: 13.12.2022)

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)

THOMSEN, Jessica; KOST, Christoph; WANAPINIT, Natapon; MEYER, Robert; ULFFERS, Jan; BAVIA BAMPI, Bruno; LOHMEIER, Daniel; PRADE, Erik; GORBACH, Gregor; SANINA, Natialia; ENGELMANN, Peter; HERKEL, Sebastian; BRAUN, Martin; LENZ, Matthias: Bottom-Up Studie zu Pfadoptionen einer effizienten und sozialverträglichen Dekarbonisierung des Wärmesektors. Studie im Auftrag des Nationalen Wasserstoffrats. Endbericht. Freiburg, Kassel 2022. URL: https://www.wasserstoffrat.de/fileadmin/wasserstoffrat/media/Dokumente/2022/221222_Bottom_Up_Studie_final-1.pdf (Stand: 25.02.2023)

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)

VCI (Hrsg.): Chemiewirtschaft In Zahlen. In: Nachrichten aus Chemie und Technik 8 (2021) 19-20, S. 296

VCI (Hrsg.): ROADMAP CHEMIE 2050 - Auf dem Weg zu einer treibhausgasneutralen chemischen Industrie in Deutschland (2019)

WEHL, Christina von der: VCI -POSITION KOMPAKT Wasserstoffstrategie 2022. URL: <https://www.vci.de/services/vci-positionen-kompakt/wasserstoffstrategie-vci-position-kompakt.jsp> (Stand: 21.06.2022)

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

WIETSCHEL, Martin; ZHENG, Lin: Metastudie Wasserstoff. – Auswertung von Energiesystemstudien. Studie im Auftrag des Nationalen Wasserstoffrats. Karlsruhe 2021. URL: https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Metastudie_Wasserstoff.pdf (Stand: 16.05.2022)

WIRTSCHAFTSVEREINIGUNG STAHL (Hrsg.): Fakten zur Stahlindustrie in Deutschland 2020 2020. URL: https://www.stahl-online.de/wp-content/uploads/WV-Stahl_Fakten-2020_rz_neu_Web1.pdf

ZELT, Ole: Multikriterielle Bewertung von Bereitstellungstechnologien synthetischer Kraftstoffe (2021)

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 (Stand: 24.01.2023)