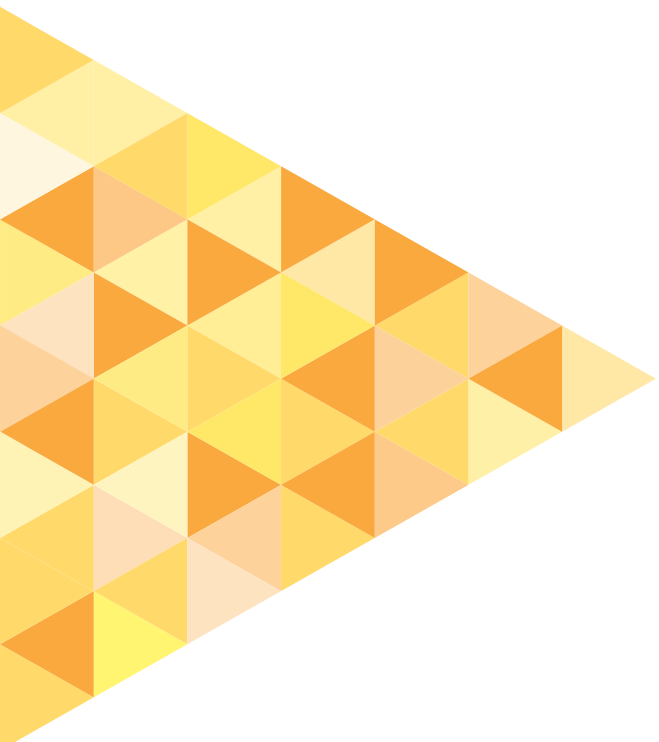


Thomas Felkl

Sektoranalyse der Chemie- und Raffinerieindustrie

Eine Untersuchung im Rahmen des Projekts „H2PRO: Wasserstoff – Ein Zukunftsthema der beruflichen Bildung im Kontext der Energiewende“



BIBB Discussion Paper

Zitiervorschlag:

Felkl, Thomas: Sektoranalyse der Chemie- und Raffinerieindustrie : eine Untersuchung im Rahmen des Projekts „H2PRO: Wasserstoff – Ein Zukunftsthema der beruflichen Bildung im Kontext der Energiewende“. Version 1.0 Bonn, 2023. https://res.bibb.de/vet-repository_781297



© Bundesinstitut für Berufsbildung, 2022

Version 1.0
April 2023

Herausgeber

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

CC Lizenz

CC Lizenz

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

Weitere Informationen finden sie im Internet auf unserer Creative-Commons-Infoseite
<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0>.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Diese Netzpublikation wurde bei der Deutschen Nationalbibliothek angemeldet und archiviert:
urn:nbn:de:0035-vetrepository-781297-7

Sektoranalyse der Chemie- und Raffinerieindustrie: Eine Untersuchung im Rahmen des Projekts „H2PRO: Wasserstoff – Ein Zukunftsthema der beruflichen Bildung im Kontext der Energiewende“

Thomas Felkl

Abstract:

Die vorliegende Sektoranalyse überprüft die Arbeitsaufgaben der Fachkräfte auf mittlerer Qualifikationsebene im Untersuchungsfeld (Sektor) der „Chemie- und Raffinerieindustrie“ hinsichtlich sich ändernder Qualifikationsanforderungen und der Passung vorhandener Ausbildungsberufe. Dafür wird der technische Wandel in den genannten Branchen im Kontext der Dekarbonisierung analysiert. Wasserstoff wird in diesen Industrien seit ca. 100 Jahren in den Produktionsprozessen verwendet. Differenziert nach typischen Handlungsfeldern werden künftige Arbeitsaufgaben abgeleitet und dazu passende technische Ausbildungsberufe ermittelt. Die Sektoranalyse soll zeigen, ob der potentielle technologische Wandel in der Chemie- und Raffinerieindustrie zu Tätigkeiten führen wird, die sich außerhalb des bisherigen Spektrums der Facharbeit befinden.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Sektoren innerhalb des H2PRO-BIBB-Projekts „Wasserstoff als Zukunftsthema für die berufliche Bildung“	14
Abbildung 2: Verschiedene Pfade der Ammoniak- und Harnstoffsynthese, vereinfachte Darstellung (eigene Darstellung)	21
Abbildung 3: Verschiedene Pfade der Methanolsynthese, vereinfachte schematische Darstellung (eigene Darstellung)	23
Abbildung 4: Technologiepfade zur Herstellung von Olefinen und Aromaten (HVC), vereinfachte Darstellung	26
Abbildung 5: Kunststoffproduktion über die Fischer-Tropsch-Synthese, vereinfachte Darstellung (eigene Darstellung)	27
Abbildung 6: Synthese von Olefinen und Aromaten über Methanol (eigene Darstellung)	27
Abbildung 7: Spannweite für CO ₂ -Vermeidungskosten für den Einsatz von erneuerbarem Strom – Differenzbetrachtung in Bezug auf fossile Energieträger (Purr et al. 2019, S. 86).....	29

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Beispiel für Projekte mit Ammoniaksynthese über grünen Wasserstoff	22
Tabelle 2: Beispiel für Projekte mit Methanolsynthese über grünen Wasserstoff, ohne Verwendungskontext	24
Tabelle 3: Beispiele für Projekte zur Synthese von Olefinen und Aromaten mittels Methanol	28
Tabelle 4: Beispiel für Projekte zur Herstellung von synthetischen Kraftstoffen über die Methanolroute	31
Tabelle 5: Typische, in Frage kommende Ausbildungsberufe für den Teilprozess Anlagen planen und entwickeln	33
Tabelle 6: Typische, in Frage kommende Ausbildungsberufe im Kontext des Errichtens der Anlagen	35

Tabelle 7: Typische, in Frage kommende Ausbildungsberufe im Kontext der technischen Überprüfung und Inbetriebnahme.....	37
Tabelle 8: Auszug aus dem Ausbildungsrahmenplan für den Beruf Produktionstechnologe/Produktionstechnologin (vgl. (BMW (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz) 16.06.2008; BMWi Juni 2018).....	38
Tabelle 9: Auszug aus dem Ausbildungsrahmenplan für den Beruf Mechatroniker/in (vgl. (BMW Juni 2018).....	39
Tabelle 10: Auszug aus dem Ausbildungsrahmenplan für den Beruf Industriemechaniker/in (vgl. (BMW 28.06.2018c).....	40
Tabelle 11: Ausbildungsberufe im Kontext Wasserstofferzeugung.....	41
Tabelle 12: Auszug aus dem Ausbildungsrahmenplan für den Beruf Chemikant/in (vgl. (BMW 10.06.2009)	41
Tabelle 13: Auszug aus dem Ausbildungsrahmenplan für den Beruf Produktionsfachkraft Chemie (vgl. (BMW 23.03.2005).....	42
Tabelle 14: Ausbildungsberufe im Kontext der Überwachung der Anlagen.....	43
Tabelle 15: Auszug aus dem Ausbildungsrahmenplan für den Beruf Fachinformatiker/in Fachrichtung Digitale Vernetzung (vgl. (BMW 28.02.2020).....	43
Tabelle 16: Ausbildungsberufe im Kontext der Instandhaltung.....	44
Tabelle 17: Auszug aus dem Ausbildungsrahmenplan für den Beruf Anlagenmechaniker/in (vgl. (BMW 28.06.2018b)	45
Tabelle 18: Auszug aus dem Ausbildungsrahmenplan für den Beruf Chemikant/in, die Instandhaltung betreffend (vgl. (BMW 10.06.2009)	45
Tabelle 19: Auszug aus dem Ausbildungsrahmenplan für den Beruf Mechatroniker/in (vgl. (BMW 28.06.2018a).....	45
Tabelle 20: Übersicht geltender Gesetze und Regeln	48

Tabelle 21: Teilprozesse und Funktionsaufgaben 50

Inhalt

Abstract	1
Abbildungsverzeichnis.....	2
Tabellenverzeichnis.....	2
Inhalt.....	5
Das Wichtigste in Kürze (Executive Summary).....	7
1 Zielstellung der Sektoranalyse und Einordnung innerhalb des H2PRO-Projekts	12
2 Vorgehen bei der Sektoranalyse	14
3 Gesellschaftliche, wirtschaftliche und technische Einordnung der Wasserstoffnutzung	15
4 Strukturen der Sektoren der Chemie und der mineralölverarbeitenden Industrie.....	18
5 Prozesse und Produkte im Kontext der Dekarbonisierung von Wasserstoff	20
5.1 Ammoniak in der Düngerwertschöpfungskette	20
5.2 Die Methanol-Wertschöpfungskette.....	22
5.3 Die Kunststoff-Wertschöpfungskette.....	25
5.3.1 Fischer-Tropsch-Synthese.....	27
5.3.2 Methanol-to-Olefin-/Aromaten-Route (MTO/MTA)	27
5.4 Wertschöpfungskette synthetische Kraftstoffe	28
6 Identifizierung einschlägiger Ausbildungsberufe in Teilprozessen	31
6.1 Anlagen planen und entwickeln	33
6.2 Anlagen errichten	33
6.3 Anlagen überprüfen und in Betrieb nehmen	37
6.4 Anlagen betreiben	40
6.5 Anlagen überwachen.....	42
6.6 Anlagen instand halten.....	44
7 Für weitere Arbeitsaufgaben (regelmäßige Revision, Wartung, Instandhaltung und Ändern von Anlagen) bzw. Teile davon können Ausgebildete in den Berufen zum Einsatz kommen, die in der folgenden Tabelle aufgeführt sind.	44

8	Geltende Rechtsgrundlagen zur Arbeit an Anlagen zur Erzeugung, Speicherung und dem Transport von Wasserstoff und Konsequenzen für die Qualifikation der eingesetzten Fachkräfte.....	46
8.1	Anlagencharakteristik als Ausgangspunkt.....	46
8.1.1	Explosionsgefährdungen	47
8.1.2	Druckanlagen.....	47
8.2	Übersicht geltender Gesetze und Regeln.....	48
8.3	Typische Funktionen von Fachkräften bei Arbeiten an Anlagen zur Herstellung, Verwendung, Verarbeitung, Speicherung und dem Transport von Wasserstoff	50
8.4	Anforderungen an die Qualifikation der Fachkräfte nach Funktion	51
8.4.1	Fachkundige Personen	51
8.4.2	Fachkundige, beauftragte und unterwiesene Personen	51
8.4.3	Zur Prüfung befähigte Personen	51
8.5	Zugelassene Überwachungsstellen für überwachungsbedürftige Anlagen.....	53
8.6	Zwischenbilanz	54
9	Schulungs- und Weiterbildungsangebote als Indikatoren für Qualifikationsbedarfe.....	54
10	Erste Schlussfolgerungen zur Einschätzung der Notwendigkeit möglicher ordnungsrelevanter Qualifikationsbedarfe.....	55
11	Literaturverzeichnis.....	55

Das Wichtigste in Kürze (Executive Summary)

Diese Sektorstudie ist am Bundesinstitut für Berufsbildung (BIBB) im Rahmen des Projekts „H₂PRO: Wasserstoff als Zukunftsthema für die berufliche Bildung“ (H₂PRO) entstanden. H₂PRO wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert und zwischen Oktober 2021 und September 2024 durchgeführt. Ausgangspunkt ist die politische Zielsetzung der Bundesregierung, Wasserstoff verstärkt einzusetzen, um fossile Energieträger abzulösen und Klimaneutralität zu erreichen. Die Bundesregierung setzt dafür mit der Nationalen Wasserstoffstrategie (NWS) den Handlungsrahmen.

Regenerativ hergestellter (grüner) Wasserstoff ist auf Grund seiner Eigenschaften für die Dekarbonisierung der Wirtschaft in dreierlei Hinsicht von Bedeutung: Als Energieträger (Energiewirtschaft, Wärme/Klima, Verkehr/Mobilität), als Reduktionsmittel (Stahlindustrie) und als Rohstoff (Chemische Industrie). Grüner Wasserstoff kann mittels Elektrolyse unter Einsatz von Strom aus Wasser hergestellt werden und bietet sich daher als Energieträger und Energiespeicher an. Als Rohstoff ist Wasserstoff in der Chemie- und Raffinerieindustrie von besonderer Bedeutung.

Damit die Transformation der Energiewirtschaft gelingt, werden Fachkräfte auf allen Ebenen gebraucht. H₂Pro nimmt hier den qualitativen Aspekt in den Blick und untersucht, welche Qualifikationsanforderungen an Fachkräfte durch den Einsatz von Wasserstoff entstehen. Im Fokus des Projekts sind Ausbildungsberufe in verschiedenen Sektoren entlang der Wertschöpfungskette Wasserstoff. H₂PRO bezieht sich geographisch auf Deutschland und betrachtet die nationale Wirtschaft.

Das Forschungsdesign von H₂PRO folgt einem qualitativen Ansatz und setzt die Instrumente Sektoranalysen, leitfadengestützte Experteninterviews und Betriebsfallstudien ein. Insgesamt werden fünf Sektoranalysen zeitgleich durchgeführt. Sie dienen der Positionierung und Erschließung der Untersuchungsfelder. So ist die vorliegende Sektoranalyse eine Annäherung an „den Aufgabenwandel und die Inhalte von Arbeitsaufgaben“ (Spöttl 2005) im Bereich der Chemie. Sie erarbeitet erste Annahmen, die den Charakter von Zwischenergebnissen haben und im weiteren Verlauf des H₂PRO-Projekts überprüft und vertieft werden.

Die Betrachtung der **chemischen Industrie** im Rahmen dieser Studie ist 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 2022c) 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 Düngewertschöpfungskette, 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 et al. 2019). Die technologische Reife von TRL¹ 9 für die elektrolysebasierte Ammoniaksynthese wird im Jahr 2031 erwartet (VCI 2019, S. 34).

Methanol ist ein wichtiger chemischer Rohstoff, der auch als Energieträger genutzt werden kann (Hebling et al. 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

¹ Technology Readiness Level

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 und 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; Bazzanella und 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, S. 189), 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 da. Das synthetische Naphtha kann durch Hydrocracking, Isomerisierung und Destillation zu einem Kraftstoff-Mix aufbereitet werden (Arnold et al. 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 2021b, 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 et al. 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 2021b, 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 5.1) und der vorgelagerten Dampfreformierung von Erdgas zur Wasserstoffgewinnung, der Methanolsynthese (siehe Kapitel 5.2), 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 auf Grund des Einsatzes von grünem Wasserstoff werden deshalb in diesem Sektor nicht notwendig sein. Vielmehr kann die Chemieindustrie als Vorbild für andere Sektoren dienen.

1 Zielstellung der Sektoranalyse und Einordnung innerhalb des H2PRO-Projekts

Mit der Nationalen Wasserstoffstrategie (NWS) setzt die Bundesregierung den Rahmen für den Markthochlauf von Wasserstoff-Technologien und für den Aufbau einer Wasserstoff-Infrastruktur (BMWi, 2020) in Deutschland. Denn ohne die Nutzung von Wasserstoff als Energieträger ist der vollständige Ersatz von fossilem Erdgas, Erdöl und Kohle – und damit Klimaneutralität nicht möglich (dena 2018). Im Unterschied zu fossilen Energieträgern verbrennt Wasserstoff ohne CO₂-Emissionen. Er gilt deshalb als ‚game changer‘ für die Energiewende (Gerbert et al. 2018).

Für die Realisierung des von der NWS anvisierten Markthochlaufs der Wasserstoffwirtschaft werden auf allen Ebenen Fachkräfte gebraucht (Steeg et al. 2022).

Wasserstoffanwendungen bringen in verschiedenen Sektoren die Einführung neuer Technologien sowie die Restrukturierung von Produktionszusammenhängen mit sich. Weitgehend unbekannt ist, wie sich die Verbreitung von Wasserstoffanwendungen und der Aufbau entsprechender Wertschöpfungsketten auf Arbeit, Beschäftigung und Qualifikationsbedarf auswirken.

Zur Frage, welche Berufe auf mittlerer Ebene betroffen sind und wo Qualifikationsbedarfe bestehen, liegen bislang keine tiefergehenden Erhebungen vor. Ersten Einschätzungen nach, deckt die duale Berufsausbildung mit ihrer Breite sowie ihrer Orientierung auf flexibles Handeln in unterschiedlichen Arbeitssituationen bereits einen weiten Teil der Arbeitsanforderungen in Wasserstoffkontexten ab. (Krichewsky-Wegener et al. 2020).

Zu erwarten ist, dass sich die Nachfrage nach Fachkräften für wasserstoffbezogene Tätigkeiten in den einzelnen Branchen und Regionen je nach Marktreife der Technologien und Umfang der Wasserstoffaktivitäten zeitlich und regional ungleichmäßig entwickelt.

Aufgrund der verbesserten Möglichkeiten zur Sektorenkopplung durch Wasserstoff ist auch zu erwarten, dass nicht nur die Nachfrage nach Wasserstoffkompetenzen im engeren Sinne, sondern nach Fachkräften für die Arbeit an vernetzten Energiesystemen bzw. infrastrukturellen Schnittstellen insgesamt steigt (Grimm et al. 2021). Qualifizierte Fachkräfte, die die Anlagen herstellen, ihr tägliches Funktionieren sichern und wichtige Innovationsbeiträge liefern, sind für einen reibungslosen Wasserstoff-Hochlauf unverzichtbar.

Umso mehr ist eine differenziertere Untersuchung dazu notwendig, welche Qualifikationsanforderungen an Fachkräfte durch den Einsatz von Wasserstoff in verschiedenen Bereichen der Wirtschaft entstehen. Das Projekt soll dazu folgende Fragen klären:

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 auf Grundlage der identifizierten Qualifizierungsbedarfe abgeleitet?

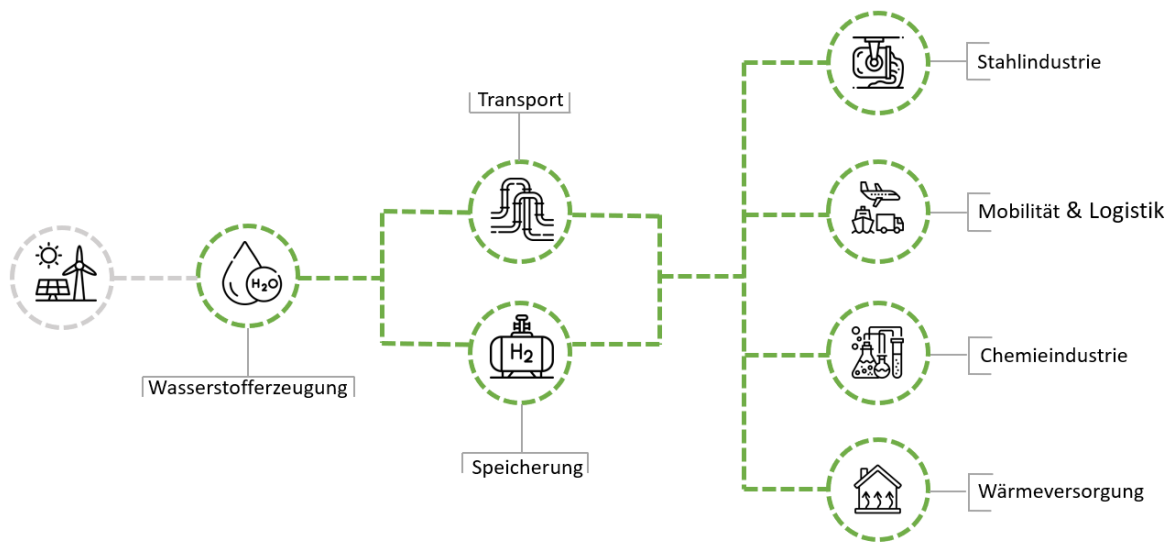
Ziel der Sektoranalyse ist es zunächst, eine erste kontextbezogene Annäherung an „den Aufgabenwandel und die Inhalte von Arbeitsaufgaben“ (Spöttl 2005) im Untersuchungsfeld (Sektor) zu erfassen. Sie dient der Positionierung und Erschließung des Untersuchungsfeldes.

Auf Grundlage der Sektoranalyse werden zum einen differenziert Annahmen erarbeitet, die es im weiteren Forschungsverlauf zu überprüfen und zu vertiefen gilt. Zum anderen trägt sie dazu bei, die weiteren Forschungsinstrumente zu präzisieren und Zugänge für Fallstudien zu erhalten (Spöttl 2005; Spöttl und Windelband 2006). Die Zwischenergebnisse der Sektoranalyse basieren in erster Linie auf intensiven Literaturstudien, Gesprächen mit Expert/innen aus Verbänden, Wissenschaft und Unternehmen sowie vereinzelt Betriebsbesichtigungen.

Die vorliegende Untersuchung ist eine von insgesamt fünf Sektoranalysen im H2PRO-Projekt. Geographisch bezieht sie sich – wie alle anderen Sektoranalysen – auf Deutschland. Diese Sektoranalyse ist auf die Chemie- und Raffinerieindustrie ausgerichtet.

Parallel erfolgen im Rahmen des Projekts weitere Sektoranalysen bezogen auf die Wasserstoffherzeugung, die Stahlerzeugung, die Mobilität und den Wärmesektor (Abbildung 1).

Abbildung 1: Sektoren innerhalb des H2PRO-BIBB-Projekts „Wasserstoff als Zukunftsthema für die berufliche Bildung“



2 Vorgehen bei der Sektoranalyse

Das Untersuchungsdesign umfasst drei zeitlich hintereinandergeschaltete Arbeitsschritte:

- Sektoranalysen der fünf Untersuchungsfelder Wasserstoffherzeugung, Chemieindustrie, Stahlindustrie, Mobilität, Wärmeversorgung
- Leitfadengestützte Experteninterviews
- Arbeitsprozessorientierte Betriebsfallstudien

Aufgrund des jungen Diffusionsstadiums von Wasserstofftechnologien sowie der hohen strukturellen Heterogenität der Anwendungskontexte kommt der Sektoranalyse eine besondere Relevanz und eine weitläufige Stellung im Forschungsverlauf zu.

Sie fungiert als Wissensbasis, indem sektorspezifische Strukturen auf Produkt-, Produktions-, Markt- und Beschäftigungsebene mitsamt ihrer wasserstoffbezogenen Wandlungsdynamiken erörtert und auf „Dimensionen der Facharbeit“ (Spöttl 2005) hin beleuchtet werden.

Es werden erste Tätigkeits- und Aufgabenfelder beschrieben und berufsprofilbezogene Abgrenzungsfragen beantwortet. Zudem gilt es, charakteristische Strukturen der Erstausbildung und Weiterbildung darzustellen, Qualifizierungsstrategien hervorzuheben und zukunftsorientierte Qualifizierungsangebote zu identifizieren.

Das Untersuchungsfeld im Sektor der Chemie- und Raffinerieindustrie wird in diesem Zusammenhang weiter differenziert und abgegrenzt. Damit können Aufgabencluster und Einsatzfelder von Berufen besser unterschieden werden.

3 Gesellschaftliche, wirtschaftliche und technische Einordnung der Wasserstoffnutzung

Wasserstoff ist auf Grund seiner Eigenschaften für die Dekarbonisierung der Wirtschaft in dreierlei Hinsicht von Bedeutung: als Energieträger (Energiewirtschaft, Wärme/Klima, Verkehr/Mobilität), als Reduktionsmittel (Stahlindustrie) und als Rohstoff (Chemische Industrie).

Energieträger

Zur Erreichung der deutschen Klimaziele soll das Energiesystem auf erneuerbare Energieträger umgestellt werden. Der Fokus liegt dabei auf der Elektrifizierung von Endanwendungen und der Dekarbonisierung der Stromerzeugung durch den Ausbau der Stromerzeugung aus Wind- und Solarenergie. Da diese abhängig von Sonneneinstrahlung bzw. Windverhältnissen sind – Stromerzeugung und -verbrauch jedoch zu jedem Zeitpunkt ausgeglichen sein müssen – sind zusätzliche flexible Verbraucher und/oder Stromerzeuger notwendig, um beides auszubalancieren.

Großes Potenzial wird dabei in Wasserstoff als Energieträger gesehen. Dieser kann mittels Elektrolyse unter Einsatz von Strom aus Wasser hergestellt werden. Wasserstoffelektrolyseure können Wasserstoff dann erzeugen, wenn erneuerbarer Strom verfügbar ist. Da Wasserstoff vergleichsweise gut gespeichert sowie transportiert werden kann, bietet sich Wasserstoff als Energieträger und -speicher an. Die Rückverstromung mittels Wasserstoffturbinen erlaubt darüber hinaus Strom zu produzieren, wenn weder Sonne noch Wind verfügbar sind.

Viele Eigenschaften des Wasserstoffs bieten gute Voraussetzungen. Wasserstoff – das leichteste aller Elemente – ist 14-mal leichter als Luft und hat aber den höchsten Energiegehalt pro Masseinheit. Im Vergleich:

- Wasserstoff: 33,33 kWh/kg
- Methan: 13,9 kWh/kg
- Benzin: 12,0 kWh/kg
- Diesel: 11,9 kWh/kg
- Rohöl: 11,6 kWh/kg

Wasserstoff hat jedoch eine geringe volumenbezogene Energiedichte von $3,00 \text{ kWh/Nm}^3$ und muss deshalb für die Nutzung und den Transport mehr noch als andere Gase verdichtet werden. Wasserstoff ist darüber hinaus, weil es das einfachste, kleinste und leichteste Element ist, enorm flüchtig. Der Transport und die Speicherung sind auch mit Problemen behaftet, weil hierfür hochdichte Systeme erforderlich sind.

Wasserstoff ist in der Regel chemisch gebunden und muss erst in Reinform gewonnen werden. Beim Erzeugungsprozess wird die Energie gebunden, die später beim „Verbrauch“ (bspw. Rückverstromung) wieder freigesetzt wird. Wasserstoff kann mittels Elektrolyse aus Wasser oder mittels Dampfreformierung aus kohlenstoffhaltigen Energieträgern wie Erdgas oder Kohle erzeugt werden. Wasserstoff, der aus fossilen Energieträgern gewonnen wird, wird gemeinhin als „grau“ bezeichnet. Wird das im Herstellungsprozess freigesetzte CO_2 abgeschieden und gebunden bzw. gespeichert bezeichnet man den Wasserstoff als „blau“. Wird im Elektrolyseverfahren ausschließlich erneuerbar erzeugter Strom verwendet, bezeichnet man den Wasserstoff als „grün“.

Bei der „Erzeugung“ von Wasserstoff durch Elektrolyse wird Wasser prinzipiell durch elektrischen Strom über Anode und Katode zu Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt. Wasserstoff nimmt dabei Energie auf.

Beim „Verbrauch“ von Wasserstoff – und das ist wieder ein Vorteil – entstehen keine direkten, lokalen CO_2 -Emissionen, sondern nur Wasser(dampf). Die Energie wird freigesetzt.

Jeder Teilprozess verursacht allerdings auch Energieverluste, so dass der „Roundtrip“-Wirkungsgrad (Strom zu Wasserstoff zu Strom) allgemein aktuell noch bei unter 50 Prozent liegt. Deshalb ist die Verwendung von Wasserstoff als reiner Energiespeicher oder als Energieträger für die meisten Anwendungen noch nicht ausreichend wirtschaftlich. Perspektivisch werden die Sektoren Verkehr/Mobilität und Wärme/Klima als potentielle Anwendungsbereiche gesehen (Bundesregierung). Zwei weitere Anwendungen sind umso mehr von Interesse: als Reduktionsmittel bei der Stahlerzeugung und als Industrierohstoff bzw. -grundstoff, insbesondere als Ausgangsstoff zur Ammoniaksynthese und zur Herstellung von Düngemitteln.

Reduktionsmittel

Bei der Stahlerzeugung kann Wasserstoff anstelle von Kohlenstoff (Koks) als klimaneutrales Reduktionsmittel eingesetzt werden. Hier besteht noch einmal zusätzliches Potential für die CO_2 -Einsparung und die Dekarbonisierung. Eisenerz (z.B. Fe_2O_3) wird in Eisen und Sauerstoff zerlegt. Der

zugeführte Wasserstoff bindet den Sauerstoff. Es entsteht Wasser. Dafür sollen künftig Direktreduktionsanlagen errichtet werden, die die bisher verwendeten Hochöfen ersetzen. Bisher sind nur prototypische Anwendungen im Einsatz.

Industrierohstoff

Wasserstoff ist als Industrierohstoff insbesondere in der chemischen Industrie von Bedeutung. Der größte Anteil entfällt auf die Ammoniaksynthese und hier als Ausgangsstoff für die Düngemittelherstellung. Zunehmend gilt Wasserstoff auch als Ausgangsstoff zur Herstellung von synthetischen Kraftstoffen (Power to x). Allerdings ist hier der Wirkungsgrad bisher zu gering, um eine breite Nutzung voranzutreiben. Außerdem wird Wasserstoff in großem Umfang in Raffinerien eingesetzt – bisher „grau“, also aus fossilen Energieträgern gewonnen.

Bei der Ammoniaksynthese wird aus Wasserstoff und Stickstoff Ammoniak (NH_3) gewonnen.

Wasserstoff hat weitere vorteilhafte, chemische und physikalische Eigenschaften. Er ist z.B.

- farb- und geruchlos,
- nicht explosiv im Freien,
- nicht selbstentzündlich,
- nicht oxidierend und nicht brandfördernd,
- nicht giftig,
- nicht ätzend,
- nicht wassergefährdend,
- nicht radioaktiv,
- nicht krebserzeugend.

Im Umgang mit Wasserstoff ist auch für die Fachkräfte wichtig, dass die physikalischen und chemischen Eigenschaften des Wasserstoffs bei entsprechenden sicherheitstechnischen Maßnahmen kein höheres Gefahrenpotential als andere Energieträger verursachen. Ein spezielles Risiko besteht allerdings in der Entstehung von Knallgas und der damit verbundenen Explosionsgefahr.

4 Strukturen der Sektoren der Chemie und der mineralölverarbeitenden Industrie

Bei dieser Sektoranalyse werden die chemische Industrie und die mineralölverarbeitende Industrie gemeinsam betrachtet. Dies begründet sich durch folgende Aspekte: Zum einen sind die Prozessketten und Stoffflüsse der zwei Wirtschaftszweige eng miteinander verwoben. Beispielsweise beliefern die Raffinerien, in denen das Mineralöl verarbeitet wird, Naphtha (Rohbenzin) an die chemische Industrie. Naphtha ist ein wichtiger Ausgangsstoff für viele chemische Produkte, insbesondere für Kunststoffe. Zum anderen ist der Beruf Chemikant/Chemikantin für beide Wirtschaftszweige der „Kernberuf“, der für den Betrieb der Produktionsanlagen zuständig ist. Eine Trennung der beiden Branchen lässt sich eher durch eine Unterscheidung der Endprodukte herstellen und weniger durch die Art der Arbeitsprozesse, weshalb eine gemeinsame Betrachtung in diesem Rahmen sinnvoll ist.

Die chemische Industrie stellt Erzeugnisse her, die in sämtlichen Bereichen unseres Lebens eine wichtige Rolle spielen. Beispielsweise stellt sie Dünger für die Landwirtschaft her und Kunststoffe, die in unzähligen Anwendungsbereichen eingesetzt werden sowie auch Grundstoffe für Medikamente und vieles mehr. Die Betrachtung der chemischen Industrie im Rahmen dieser Studie ist aus mehreren Gründen von Bedeutung: Die chemische Industrie ist mit energiebedingtem 39,5 Mt CO₂ im Jahr 2019 (VCI 2021, S. 117) ein relevanter Emittent von CO₂ und außerdem mit 12,5 Mrd. Kubikmeter Wasserstoff bisher der größte Verbraucher in der deutschen Wirtschaft (Wehl 2022, S. 1). Zudem ist die wirtschaftliche Bedeutung der chemischen Industrie groß. So erwirtschafteten 2020 insgesamt 351.476 Beschäftigte eine Bruttowertschöpfung von 42,7 Mrd. €.

Strukturdaten 2020

Chemische Industrie WZ08-20

Bruttowertschöpfung¹: 42.7 Mrd. €

Beschäftigte¹: 351.476

Investitionen:

davon entfallen auf die
Grundstoffchemie WZ08-201

Bruttowertschöpfung¹: 25,5 Mrd. €

Beschäftigte¹: 184.764

Kokerei und Mineralölverarbeitung WZ08-19

Bruttowertschöpfung¹: 31.95 Mrd. €

Beschäftigte¹: 19.622

Quelle: (Statistisches Bundesamt
Deutschland 2022b)

Eine besondere Bedeutung für diese Studie hat die Grundstoffchemie, die 2020 mit 184.764 Beschäftigten eine Bruttowertschöpfung von 25,5 Mrd. € erwirtschaftete. Auf sie entfallen ca. 60 Prozent der Wertschöpfung und 53 Prozent der Beschäftigten (Bezugsjahr 2020). Wichtiger ist jedoch der Umstand, dass hier die Grundstoffe als Basis für die Folgechemie hergestellt werden (Gehrke und Weilage 2018). Dies geschieht zu großen Teilen auch mittels fossiler Rohstoffe wie Erdgas und Erdöl

bzw. grauem Wasserstoff. Grüner Wasserstoff ist die wichtigste Option für die Dekarbonisierung entsprechender Produktionsketten.

Die Aufspaltung von Erdöl und Erdgas zu Wasserstoff und anderen Chemikalien ist integriert in hochvernetzten Produktionsketten der chemischen Industrie. Die große Vernetzung der Produktionsprozesse an den Standorten ermöglicht eine optimale Ressourceneffizienz und Wirtschaftlichkeit der Produktion (Winkler 2016, S. 6).

Die Herstellung von Kraft- und Brennstoffen im Wirtschaftszweig der Mineralölverarbeitung, also in den Betrieben der Raffinerien, ist ein weiterer Teilbereich des hier zu untersuchenden Forschungsfelds. Mineralöl ist der klassische Rohstoff in den Raffineriebetrieben. Aus ihm werden beispielsweise Benzin, Diesel und Kerosin hergestellt. Die Ausgangsstoffe für die synthetischen Verwandten dieser Kraftstoffe sind Wasserstoff und Kohlenstoff aus nichtfossilen Quellen. Die Raffinerien liefern zudem, wie bereits erwähnt, den Steamcrackern der chemischen Industrie Naphtha. Anteilig entfallen ungefähr 80 Prozent auf energetisch genutzte Raffinerieprodukte und ca. 20 Prozent dienen als Rohstoffbasis für Produkte der chemisch-pharmazeutischen Industrie (en2x 2022). Insgesamt sind die Chemieparcs und Raffinerien bezüglich der Rohstoffe und Zwischenprodukte eng miteinander vernetzt (Goehermann 2016). Im Jahr 2020 wurde schätzungsweise in 53 Betrieben mit 19.622 Beschäftigten ein Umsatz von 79,4 Mrd. € und eine Bruttowertschöpfung von 32 Mrd. € erwirtschaftet (Statistisches Bundesamt Deutschland 2022b). Der Wirtschaftszweig der Kokerei² und Mineralölverarbeitung hatte einen CO₂-Ausstoß von 26,89 Mt (Statistisches Bundesamt Deutschland 2022c) und ist somit ein ähnlich großer Emittent von CO₂ wie die chemische Industrie. Da Mineralöl die Rohstoffbasis der Raffinerieindustrie ist, müssen sich in Folge von Dekarbonisierungsanstrengungen die Rohstoffbasis sowie die Produktionsprozesse ändern. Das Geschäft mit synthetischen Kraftstoffen ist hierbei eine bedeutsame Aktivität von Raffinerien in der Zukunft und wird große Investitionen erfordern (en2x 2022). Auf den entsprechenden technologischen Wandel in Bezug auf Wasserstoff als alternativer Rohstoff, wird in Kapitel 5.4 näher eingegangen.

² Der Wirtschaftszweig „Kokerei und Mineralölverarbeitung“ (WZ08-19) unterteilt sich in Kokereien (WZ08-19.1) und die Mineralölverarbeitung (WZ08-19.2). In den unterschiedlichen Tabellen der Statistiken des statistischen Bundesamts werden beide Wirtschaftsbereiche nicht vollständig und über alle Jahre hinweg getrennt erhoben. Gemäß Tabelle 42111-0001 lässt sich jedoch durch eine Betrachtung der Jahre 2015-2018 abschätzen, dass lediglich 5% der Beschäftigten und 1% des Umsatzes auf die Kokereien entfallen.

5 Prozesse und Produkte im Kontext der Dekarbonisierung von Wasserstoff

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 möglich, Benzin, Diesel und Kerosin synthetisch herzustellen. Aber auch Dimethylether bietet sich als neuer synthetischer Kraftstoff an und Ammoniak ist ebenfalls im Bereich des Schiffsverkehrs als Treibstoff im Gespräch (Hebling et al. 2019). Viele dieser Produkte können grundsätzlich Kohlenmonoxid oder Kohlendioxid binden, jedoch muss dabei bedacht werden, dass am Ende des Produktlebensweges, abgesehen von nicht verbrannten Kunststoffen, der gebundene Kohlenstoff als CO₂ den Weg in die Atmosphäre findet (VCI 2019, S. 30). Aufgrund dessen muss der Kohlenstoff für die Produktsynthese in diesen Fällen aus nichtfossilen Quellen stammen. Bei den Investitionen in neue chemische Reaktoren muss bedacht werden, dass diese oftmals eine Lebensdauer von über 50 Jahren aufweisen, sodass Investitionsentscheidungen heute eine deutlich langfristige Wirkung haben (Zelt 2021, S. 168).

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.

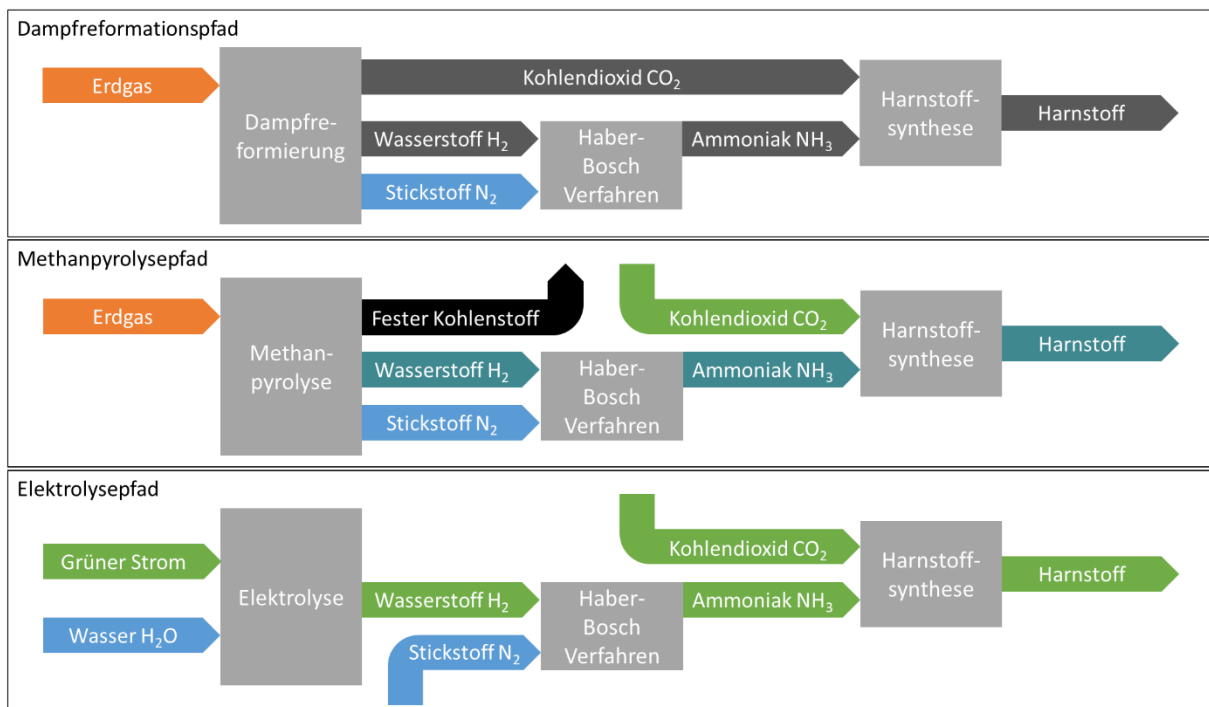
5.1 Ammoniak in der Düngerwertschöpfungskette

Ammoniak (NH₃) ist ein bedeutender Ausgangsstoff für die Herstellung von Harnstoff und somit von Kunstdüngern. Pro Jahr werden in Deutschland 3,3 Mt Ammoniak hergestellt (Agora Energiewende/Wuppertal Institut 2019, S. 179). Damit gehört die Ammoniakproduktion mengenmäßig zu den größten petrochemischen Prozessen (VCI 2019). Bei der Ammoniaksynthese wurden in Deutschland 2017 ca. 6 Mt CO₂ freigesetzt (Agora Energiewende/Wuppertal Institut 2019, S. 178), was ungefähr einem Anteil von 15 Prozent der gesamten CO₂-Emissionen der chemischen Industrie entspricht.

Ammoniak wird dabei mittels des **Haber-Bosch-Verfahrens** aus Wasserstoff und Stickstoff synthetisiert. Das Verfahren wurde Anfang des 20. Jahrhunderts von Fritz Haber und Carl Bosch entwickelt (CHIMIA 2010). Konventionell wird in Deutschland der hierfür benötigte Wasserstoff vornehmlich durch Dampfreformierung aus Erdgas gewonnen (VCI 2019, S. 32). Die Wasserstoffproduktion mit diesem Verfahren wurde erstmals 1933 patentiert (Schiller und Wietzel 1933). Das CO₂, welches bei der Dampfreformierung als Nebenprodukt entsteht, kann als Edukt für die

spätere **Harnstoffsynthese** verwendet werden. Der so in den Kunstdüngern gebundene Kohlenstoff wird bei dessen Anwendung auf den Äckern freigesetzt und gelangt in die Atmosphäre.

Abbildung 2: Verschiedene Pfade der Ammoniak- und Harnstoffsynthese, vereinfachte Darstellung (eigene Darstellung)



Der Einsatz von grünem Wasserstoff, der durch die Elektrolyse mit regenerativem Strom gewonnen wird, kann die oben beschriebenen prozessbedingten Kohlendioxid-Emissionen vermeiden. Für den nachfolgenden Schritt der Harnstoffsynthese muss jedoch eine alternative und nichtfossile Kohlenstoffquelle herangezogen werden (Hebling et al. 2019). Eine technologische Reife von TRL³ für die elektrolysebasierte Ammoniaksynthese wird 2031 erwartet (VCI 2019, S. 34). Die Bereitstellung von Wasserstoff über die Methanpyrolyse von Erdgas ist ebenfalls möglich, wird hier jedoch nicht behandelt.

Einen neuen Ansatz für die Synthese von Ammoniak verfolgt das 2017 gegründete japanische Unternehmen Tsubame BHB, das die dezentrale Produktion von Ammoniak vor Ort ermöglicht. Dabei setzt es nicht auf das Haber-Bosch-Verfahren zur Ammoniaksynthese, sondern auf einen eigenentwickelten Katalysator, mit dem der Syntheseprozess mit niedrigerer Temperatur und Druck

³ TRL steht für Technology-Readiness-Level und ist eine Skala, mit der die technologische Reife von technischen Systemen bestimmt werden kann. Sie reicht dabei von TRL 1, bei der grundlegende Prinzipien beobachtet und berichtet wurden, bis hin zu TRL 9, wobei sich das System unter betrieblichen Einsatzbedingungen, also im industriellen Maßstab und Kontext, bewährt hat.

abläuft. Dies ermöglicht wesentlich kleinere Anlagengrößen und somit die dezentrale Produktion vor Ort. Solche Anlagen könnten zudem auch das Speichern von Energie in Form von Ammoniak ermöglichen, um die schwankende Produktion von regenerativen Energien auszugleichen. Die erste Pilotanlage ist in Kawasaki (Japan) in Betrieb und kommerzielle Module mit einer Kapazität von 3 kt/a und 5 kt/a sind in der Entwicklung (Stephan 2021).

Insgesamt besitzen Projekte mit Anlagen zur Ammoniaksynthese mittels grünem Wasserstoff zurzeit hauptsächlich den Status von Pilot- oder Demonstrationsanlagen und sind nicht in Deutschland geplant oder verortet (vgl. Tabelle 1).

Tabelle 1: Beispiel für Projekte mit Ammoniaksynthese über grünen Wasserstoff

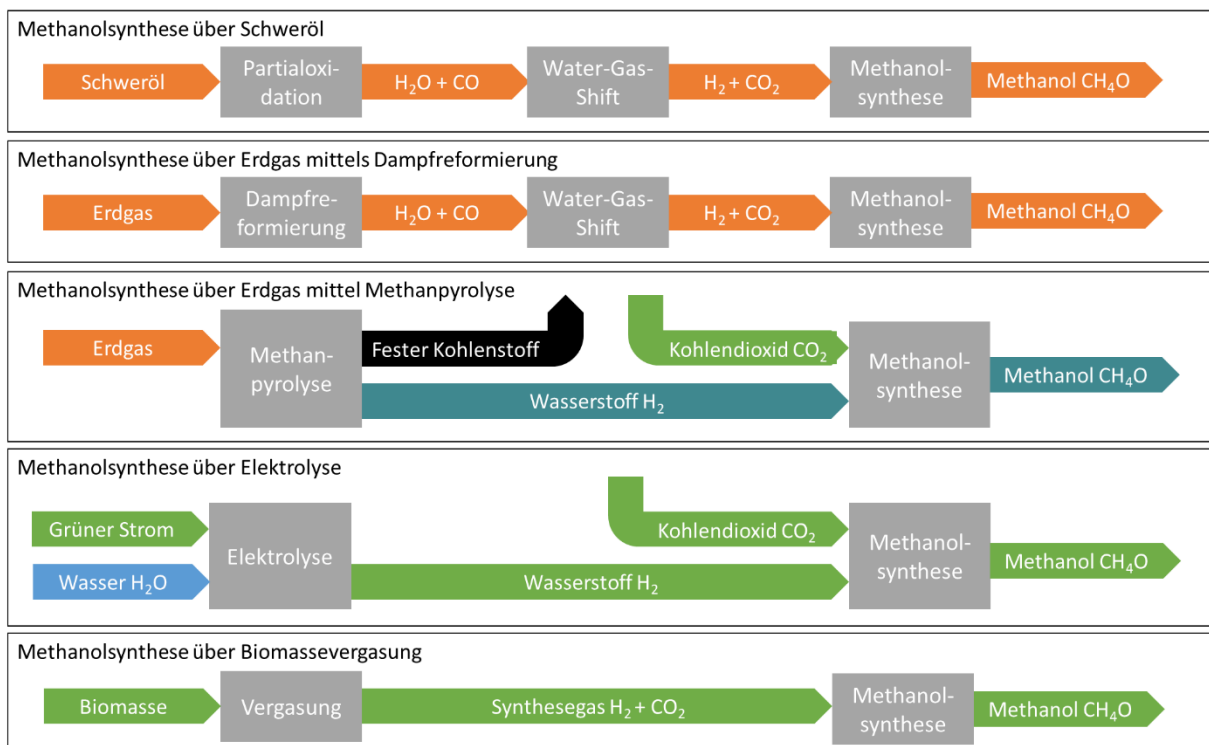
Projektname	Konsortium/ Beteiligte	Standort	Technologiereife/ Status	Link
	Tsubame BHB	Kawasaki, Japan	Pilotanlage, Betrieb seit 2019	Tsubame BHB Co., Ltd. (tsubame-bhb.co.jp)
	Yara	Porsgrunn, Norwegen	Pilotanlage, kommerzieller Betrieb ab 2023 geplant	What are Yara green fertilizers and how are they produced? Yara International
	Yara, Ørsted	Sluiskil, Niederlande	geplante Inbetriebnahme 2024/25	Ørsted and Yara seek to develop groundbreaking green ammonia project in the Netherlands Yara International
HyDeal España	ArcelorMittal, Enagás, Grupo Fertiberia, DH2 Energy	Avilés, Spanien	geplante Inbetriebnahme 2025	HyDeal España: green hydrogen & ammonia northern Spain – Ammonia Energy Association
SOC4NH3 Project	Haldor Topsoe, Universität Aarhus, Technische Universität Dänemark		Forschung	The SOC4NH3 Project. Production and Use of Ammonia by Solid Oxide Cells - IOPscience
Green Ammonia	OCP, Fraunhofer- Institut IGB und IMWS, Green Energy Park	Ben Guerir, Marokko	Demonstrationsanlage	Green Ammonia – Grüne Ammoniakproduktion in Marokko - Fraunhofer IGB

5.2 Die Methanol-Wertschöpfungskette

Methanol ist ein bedeutsamer chemischer Grundstoff, der ebenfalls als Energieträger genutzt werden kann (Hebling et al. 2019). Wichtige Chemikalien, die aus Methanol hergestellt werden, sind beispielsweise Formaldehyd (FA), Methylamine und Methylacrylat (Zelt 2021). Methanol aus

regenerativ erzeugtem Wasserstoff wird zudem als Ausgangsstoff für Kunststoffe sowie synthetische Kraftstoffe, insbesondere synthetisches Kerosin, diskutiert (MKS Wissenschaftliche Begleitforschung; Nationale Plattform Zukunft der Mobilität; Wagemann und Ausfelder 2017; Jens Hobohm et al. 2018). In Deutschland wurden 2021 ca. 1,4 Mt Methanol von 14 Unternehmen produziert (Statistisches Bundesamt Deutschland 2022a). Dabei werden in Deutschland 60 Prozent des Methanols in der Leuna-Methanolanlage aus Schweröl hergestellt und nur 40 Prozent aus Erdgas (VCI 2019, S. 37).

Abbildung 3: Verschiedene Pfade der Methanolsynthese, vereinfachte schematische Darstellung (eigene Darstellung)



Für die Herstellung von Methanol stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung (siehe Abbildung 3). Konventionelle Methoden der Methanolsynthese betreffen die Bereitstellung von Synthesegas durch die oben bereits genannte Verarbeitung von Schweröl durch das Verfahren der Partialoxidation sowie die Dampfreformierung von Erdgas. Alternative Verfahrenswege, die keine oder weniger Emissionen von fossilen CO_2 verursachen, sind die Methanpyrolyse von Erdgas, die Vergasung von Biomasse sowie die Elektrolyse von Wasser. Alle Verfahren haben gemeinsam, dass sie ein Synthesegas aus Wasserstoff und Kohlenmonoxid bzw. Kohlendioxid bereitstellen, aus dem das Methanol synthetisiert wird. Grundsätzlich sind die verbreiteten Methanolkatalysatoren geeignet, CO_2 zu verarbeiten (VCI 2019, S. 38). Der Syntheseschritt der Water-Gas-Shift-Reaktion dient hierbei der Verringerung des Kohlenmonoxidanteils im Synthesegas (Zelt 2021, S. 161). Bei der Vergasung von Biomasse entsteht direkt das Synthesegas. Bei der Methanpyrolyse und der Elektrolyse wird Wasserstoff erzeugt, der

zusammen mit nichtfossilem CO₂ die Rohstoffbasis für die Methanolsynthese bildet. Die CO₂-basierten Methanolrouten sind technologisch fortgeschritten. Es muss jedoch noch an der Gesamtumsetzung und an der Integration in größere Produktionsketten gearbeitet werden (Zelt 2021, S. 188). Entsprechende Pilotanlagen sind derzeit schon in Betrieb (z.B. in den Projekten Carbon2Chem, FReSMe) oder befinden sich in Planung (Chemieparks in Stade und Leuna). Das Unternehmen Thyssenkrupp bietet bereits schlüsselfertig Methanol-Anlagen an, inklusive vorgeschalteter Elektrolyseure für die Produktion von Wasserstoff.

Tabelle 2: Beispiel für Projekte mit Methanolsynthese über grünen Wasserstoff, ohne Verwendungskontext Projektname/ Standort	Konsortium/ Beteiligte	Technologiereife/ Status	Link
Carbon2Chem, Duisburg/Oberhausen	Clariant Produkte GmbH, Covestro Deutschland AG, Evonik Industries AG, Evonik Resource Efficiency GmbH, Fraunhofer Gesellschaft, Linde AG, Max-Planck-Gesellschaft, Nouryon Industrial Chemicals GmbH, Remondis SE & Co. KG, Rheinkalk GmbH, RWTH Aachen, Ruhr-Universität Bochum, Siemens AG, Siemens Gas and Power GmbH & Co. KG, Thyssen Vermögensverwaltung GmbH, thyssenkrupp AG	Pilotanlage	Verbundprojekt Carbon2Chem® - Fraunhofer UMSICHT
MefCO ₂ / FReSMe Luleå, Schweden	National Institute of Chemistry, array Industries, Politecnico, TATA Steel, TNO, i-deals, StenaRederi, Kisuma, SSAB, SWERIM	Pilotanlage	FReSMe
MeOH, Stade	Dow	Pilotanlage (geplant)	Dow Stade: Chemie soll klimaneutral werden future.hamburg
e- CO ₂ Met, Leuna	Fraunhofer-Institute IMWS & CBP, TotalEnergies, Sunfire	Pilotanlage (geplant)	TotalEnergies, Sunfire und Fraunhofer geben den Startschuss für grünes Methanol in Leuna

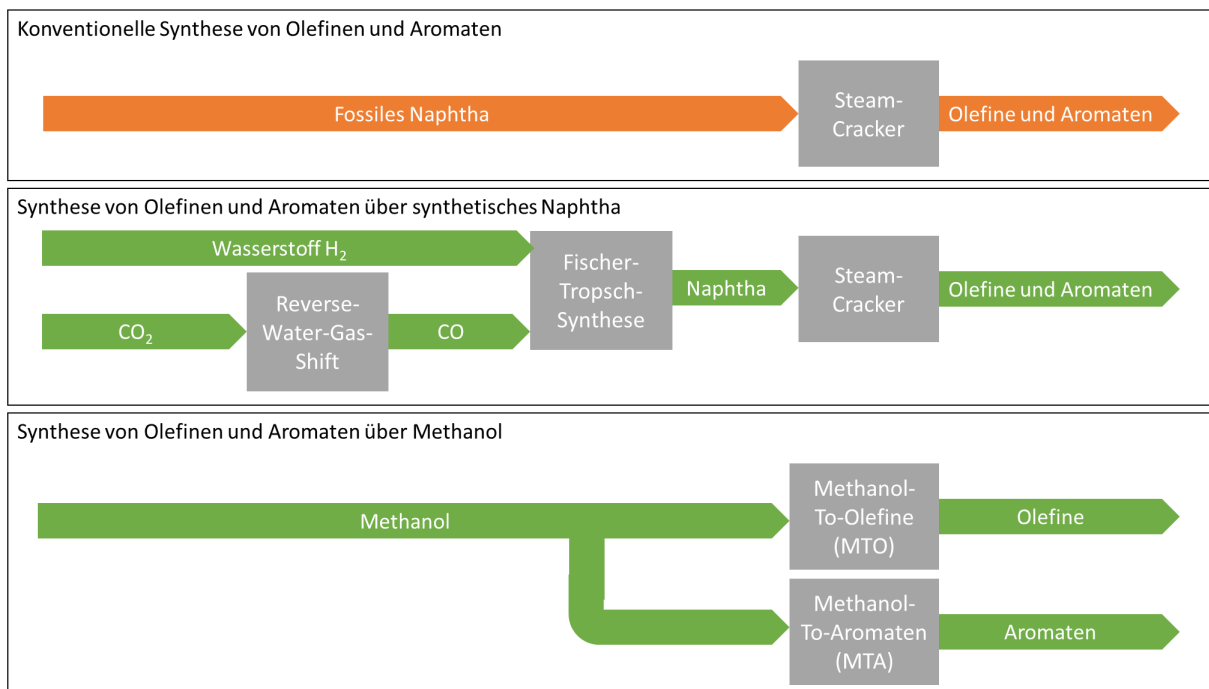
Me2Go	thyssenkrupp, Swiss Liquid Future	Pilotanlage/ Verkauf von Anlagen	Microsoft PowerPoint - 20180718_Methanol technologies tkIS-SLF.ppt [Kompatibilitätsmodus] (swiss-liquid-future.ch)
-------	-----------------------------------	--	--

5.3 Die Kunststoff-Wertschöpfungskette

Kunststoffe bilden eine der bedeutsamsten Produktgruppe der chemischen Industrie und finden Anwendung in sämtlichen Bereichen des Lebens. Sie dienen beispielweise als Verpackung von Lebensmitteln und anderen Produkten, werden in der Bauwirtschaft als Dämmstoffe verwendet und werden im Automobilbau und auch in vielen anderen Branchen als wichtiger Werkstoff benutzt.

Im Jahr 2021 wurden 15 Mt Kunststoff in Deutschland verarbeitet, wovon 31 Prozent auf den Bereich Verpackungen, 36 Prozent auf den Baubereich, 21 Prozent auf technische Teile sowie 11 Prozent auf Konsumprodukte entfielen (Branchenstatistik der Kunststoffverarbeitung in Deutschland 2022). Die mengenmäßig bedeutsamsten Grundstoffe für die Kunststoffproduktion sind aktuell die Olefine Ethylen und Propylen (Windsperger et al. 2018, S. 18). In Deutschland fielen im Jahr 2017 entlang der Kunststoffwertschöpfungskette schätzungsweise ca. 49 Mt CO₂ an. Durch die Verbrennung von Altplastik fallen jährlich ungefähr 35 Mt CO₂ an (Agora Energiewende/Wuppertal Institut 2019, S. 182). Werden die CO₂-Emissionen bei der Verbrennung von Altkunststoff betrachtet, erscheint die Umstellung auf grünen Wasserstoff und nichtfossilen Kohlenstoff als Rohstoffe für die Kunststoffproduktion sinnvoll.

Abbildung 4: Technologiepfade zur Herstellung von Olefinen und Aromaten (HVC), vereinfachte Darstellung



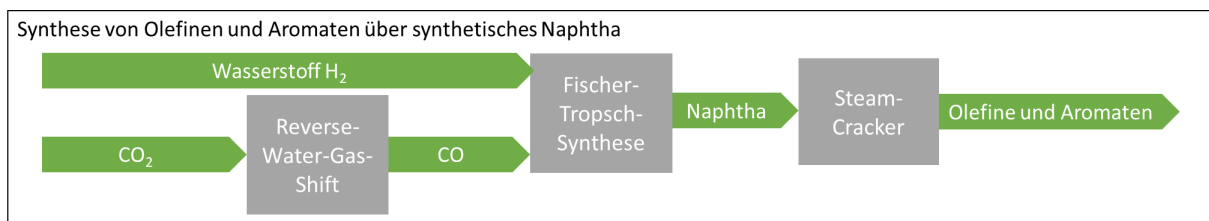
Der bisher übliche Rohstoff am Anfang der Kunststoffprozesskette ist fossiles Erdöl. Das Rohöl wird in den Raffinerien zu Kraftstoffen und anderen Produkten weiterverarbeitet. Eines dieser Produkte ist Naphtha (Rohbenzin), das mit einem Anteil von 76 Prozent (Lösch et al. 2018, S. 45) der bedeutendste Rohstoff für die deutsche Petrochemie und insbesondere für die Kunststoffproduktion ist. 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. Als Rohstoffe für den Steamcracker kommen neben Naphtha auch Erdgaskondensate oder andere Destillationsschnitte der Erdöldestillation in Frage (Behr et al. 2016, S. 189). Die Ausgangsprodukte des Steamcrackers werden auch als High Value Chemicals (HVC) bezeichnet. Die gewünschten HVC bei diesem Prozess umfassen die Olefine Ethylen, Propylen, Buten und Butadien sowie die Aromaten Benzol, Toluol und Xylol und andere Mischfraktionen (VCI 2019, S. 41). Mit den HVC können die verschiedensten Kunststoffe, wie beispielweise Polyethylen, Polypropylen, aber auch synthetischen Fasern, Harze und Waschmittel hergestellt werden (Bazzanella und Ausfelder 2017, S. 70).

Verfahren zur direkten Herstellung von Olefinen aus Wasserstoff und CO₂ existieren zurzeit nur in der Forschung. Beispielsweise konnte bei dem BMBF geförderten Projekt eEthylen, dass ohne den Zwischenschritt über die Methanolsynthese auskommt, eine technologische Reife der Prozesse von TRL3-4 erreicht werden (Bazzanella und Ausfelder 2017, S. 68; Bringezu et al. 2020, S. 22).

5.3.1 Fischer-Tropsch-Synthese

Mittels der Fischer-Tropsch-Synthese ist es möglich, aus Synthesegas, das aus Kohlenmonoxid und Wasserstoff besteht, synthetisches Naphtha herzustellen (VCI 2019, S. 43). Das so hergestellte Gemisch von Kohlenwasserstoffen kann prinzipiell wie das konventionelle Naphtha zu Kraftstoffen weiterverarbeitet werden (Bringezu et al. 2020, S. 21–22), worauf näher in Kapitel 5.4 eingegangen wird, oder auch zu Olefinen und Aromaten für die Kunststoffherstellung aufbereitet werden. 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).

Abbildung 5: Kunststoffproduktion über die Fischer-Tropsch-Synthese, vereinfachte Darstellung (eigene Darstellung)

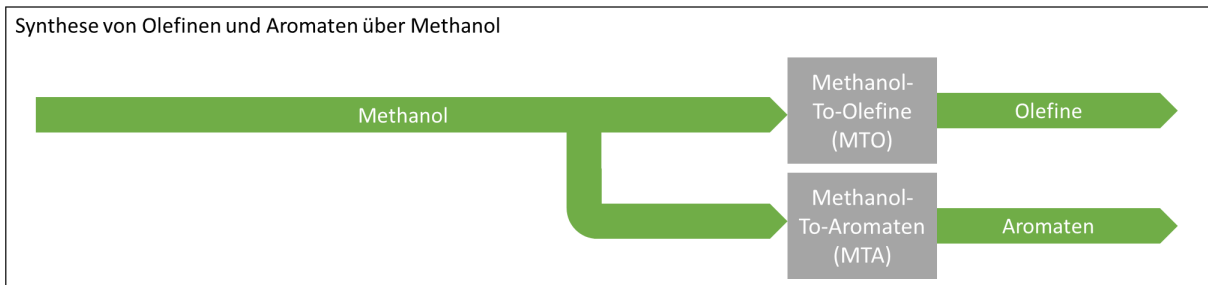


Für die Fischer-Tropsch-Synthese kann ein TRL 9 angenommen werden, für den Reverse-Water-Gas-Shift Prozess jedoch nur ein TRL 6, so dass dieser Synthesepfad insgesamt mit dem niedrigsten Niveau TRL 6 bewertet werden sollte (Schmidt et al. 2016, S. 31). Es ist zu erwarten, dass der Fischer-Tropsch-Synthese-Pfad mit grünem Wasserstoff und CO₂ ab 2030 ein TRL von 9 erreichen wird (VCI 2019, S. 49). Mineralölprodukte mit langen Wasserstoffketten wie Bitumen können jedoch nicht mittels der Fischer-Tropsch-Synthese hergestellt werden und sind daher weiterhin aus fossilem Rohöl herzustellen (Jens Hobohm et al. 2018, S. 67).

5.3.2 Methanol-to-Olefin-/Aromaten-Route (MTO/MTA)

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. Die rohstoffbedingten CO₂-Emissionen können hiermit vermieden werden, sofern „grünes“ Methanol (siehe Kapitel 5.2) für die Synthese Verwendung findet. In diesem Fall kann die thermische Verwertung des Altplastiks (nahezu) klimaneutral sein (Agora Energiewende/Wuppertal Institut 2019, S. 181). 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; Bazzanella und Ausfelder 2017).

Abbildung 6: Synthese von Olefinen und Aromaten über Methanol (eigene Darstellung)



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, S. 189), was ungefähr 64 Prozent des Gesamtstromverbrauchs von Deutschland im Jahr 2019 entspricht (AG Energiebilanzen e.V. 2020) und zudem müssten umfangreiche Kapazitäten der Methanolsynthese aufgebaut werden (VCI 2019, S. 43). Sofern nur regenerativ erzeugter Strom und nichtfossile Kohlenstoffquellen zum Einsatz kommen, können fast alle CO₂-Emissionen entlang des Produktlebenszyklus von Kunststoff vermieden werden (Agora Energiewende/Wuppertal Institut 2019, S. 189). In China existieren bereits mehrere Anlagen, in denen MTO kommerziell betrieben wird, wobei das Methanol derzeit noch aus fossilen Quellen, insbesondere Kohle, stammt. Für MTA hingegen existieren bisher nur Forschungsprojekte und Demonstrationsanlagen.

Tabelle 3: Beispiele für Projekte zur Synthese von Olefinen und Aromaten mittels Methanol

Projektname/ Standort	Konsortium/Beteiligte	Technologiereife/ Status	Link
Baotou, China	Shenhua, Air Liquide (früher Lurgi GmbH)	Kommerzieller Betrieb	Methanol to Olefins (MTO): From Fundamentals to Commercialization ACS Catalysis
Feluy, Belgien	Honeywell UOP, Total	Demonstrationsanlage	UOP/Total Petrochemicals: Methanol-to-olefins process successfully demonstrated - Chemical Engineering (chemengonline.com)
China	Institut für Kohlechemie der Chinesischen Akademie der Wissenschaften, Sedin Engineering Co., Ltd.	Demonstrationsanlage	(Chang et al. 2016)

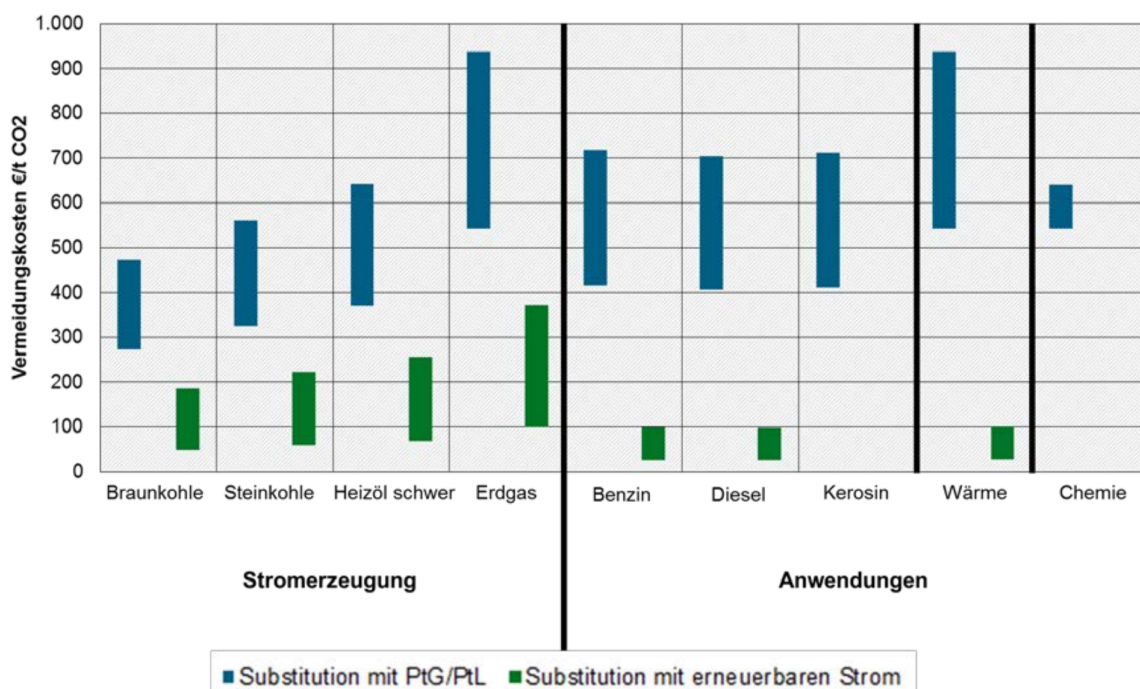
5.4 Wertschöpfungskette synthetische Kraftstoffe

Power-To-Liquid, Methanol-to-Gasoline, Methanol-to-Jet oder auch eFuels sind Schlagwörter, die auf den Diskurs rund um die Herstellung und Verwendung von synthetischen Kraftstoffen hindeuten. 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. Das große Manko hierbei ist jedoch, dass die Herstellung von synthetischen Kraftstoffen sehr energieaufwendig ist und dadurch die Gesamteffizienz im Vergleich zu batterieelektrischen Antrieben und auch Brennstoffzellen weitaus geringer ausfällt. Die CO₂-Vermeidungskosten pro Tonne sind bei eFuels mindestens viermal höher als bei alternativen Antrieben, die mit erneuerbarem Strom angetrieben werden (siehe Abbildung 7). Demnach ist es sinnvoll, auf batterieelektrische Antriebe bzw. Brennstoffzellenantriebe zu setzen und nur auf synthetische Kraftstoffe zurückzugreifen, wenn die beiden anderen Alternativen sinnvolle Anwendung finden können.

Abbildung 7: Spannweite für CO₂-Vermeidungskosten für den Einsatz von erneuerbarem Strom – Differenzbetrachtung in Bezug auf fossile Energieträger (Purr et al. 2019, S. 86)



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. Aus diesem Grund ist der Einsatz von synthetischem Kerosin im Flugverkehr am wichtigsten, um die Ziele der CO₂-Emissionsenkung im Verkehrssektor zu erreichen (Kasten 2019, S. 10). Im Koalitionsvertrag der Bundesregierung wurde deshalb beschlossen, dass

„Produktion und Einsatz von CO₂-neutralen strombasierten Flugkraftstoffen“ zu fördern sowie ambitionierte Quoten zur Beimischung von synthetischen Kraftstoffen im Luft- und Schiffsverkehr anzureizen sind, um den Markthochlauf zu begünstigen (Bundesregierung 2021a). In den beiden Verkehrssektoren sollen die konventionellen Kraftstoffe schrittweise durch die Beimischung von synthetischen Kraftstoffen ersetzt werden. Hierbei müssen keine zusätzlichen Infrastrukturinvestitionen für Speicherung und Transport der Kraftstoffe getätigt werden (Quitow et al. 2022, S. 32).

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 da. Sie wurde bereits im Rahmen der Kunststoffherstellung in Kapitel 5.3.1 besprochen. Das synthetische Naphtha kann durch Hydrocracking, Isomerisierung und Destillation zu einem Kraftstoff-Mix aufbereitet werden (Arnold et al. 2018). Die Zusammensetzung des Naphtha ist leicht steuerbar, technisch liegt jedoch der energetische Anteil von Kerosin zwischen 40 und 70 Prozent, das insbesondere in Bezug auf den Flugverkehr die höchste Priorität hat. Die Fischer-Tropsch-Synthese kann in bestehenden Erdöl-Raffinerien integriert werden und somit ist die Nutzung vorhandener 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 2021b, S. 12). Wie schon bei der Kunststoffherstellung in Kapitel 5.3.1 erörtert, kann eine TRL 9 ab dem Jahr 2030 erwartet werden. 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 et al. 2018, S. 70).

Ein anderer Startpunkt der Herstellung synthetischer Kraftstoffe ist die **Methanolsynthese**, die bereits in Kapitel 5.2 besprochen wurde. 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. Der Vorteil des Methanol-to-gasoline-Verfahrens gegenüber anderen Verfahren zur synthetischen Herstellung von Benzin ist, dass das Endprodukt frei von Verunreinigungen und bezüglich

der Oktaneigenschaften kompatibel zum fossilen Original ist (Zelt 2021, S. 217). Im Gegensatz zu der Fischer-Tropsch-Route ist die Methanolroute noch nicht für die Bereitstellung von Kerosin für den Flugverkehr zugelassen (Bundesregierung 2021b, S. 10; MKS Wissenschaftliche Begleitforschung, S. 19). Die technologische Reife 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). Die Unterschiede zwischen der Fischer-Tropsch-Route und der Methanol-Route bezüglich Energieeffizienz, Treibhausgas-Emissionen und den voraussichtlichen Investitionen sind nicht wesentlich (Schmidt et al. 2016, S. 19–20). Aktuelle Studien gehen zumeist davon aus, dass strombasierte Kraftstoffe nicht in relevanten Mengen in Deutschland produziert werden, da Flächenpotential und Erzeugungsbedingungen, wie Sonneneinstrahlung und Wind, in anderen Weltregionen günstiger sind (Nationale Plattform Zukunft der Mobilität, S. 14).

Tabelle 4: Beispiel für Projekte zur Herstellung von synthetischen Kraftstoffen über die Methanolroute

Projektname/ Standort	Konsortium/Beteiligte	Technologiereife/ Status	Link
Haru Oni Punta Arenas, Chile	HIF, Siemens Energy, Porsche Enel, eXXonMobil, ENAP, Empresas Gasco, Johnson Matthey	Pilotanlage, kommerzieller Betrieb geplant	https://www.haruoni.com/#/en
M2SAF	BASF, thyssenkrupp, OMV Deutschland, DLR, ASG	Projekt noch in Planung	https://www.thyssenkrupp-uhde.com/de/media/presse-mitteilungen/presse-detail/bmdv-gefordertes-entwicklungsprojekt-m2saf-zur-herstellung-nachhaltigen-flugkraftstoffes-aus-methanol-erfolgreich-gestartet-156192

6 Identifizierung einschlägiger Ausbildungsberufe in Teilprozessen

Auf Grundlage der in Kapitel 5 beschriebenen technologischen Veränderungen werden in diesem Kapitel die potentiellen Auswirkungen auf betroffene Arbeitsprozesse diskutiert. Grundsätzlich können entlang der wasserstoffbezogenen Wertschöpfungsketten in der Chemieindustrie und den Raffinerien eine Vielzahl von betroffenen Teilprozessen und Aufgabencluster identifiziert werden. Der Fokus liegt jedoch hier ausschließlich auf technischen Prozessen und Aufgaben, da insbesondere hier sicherheitsrelevante Tätigkeiten und Verantwortungsbereiche auf mittlerer Qualifikationsebene betroffen sind.

Der Kern der Wertschöpfung liegt in dem Betreiben der Anlagen zur Produktion chemischer Güter. Die Grundvoraussetzung für den Produktionsbetrieb stellt jedoch das Planen und Entwickeln, das Errichten sowie das Inbetriebnehmen der Anlagen dar. Zudem müssen die Anlagen regelmäßig überprüft und überwacht werden, um einen sicheren Betrieb zu gewährleisten. Nicht zuletzt ermöglichen Wartung und Instandhaltung den Erhalt der Produktivität der chemischen Produktionsketten. Dementsprechend werden hier 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. Anlage instand halten

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

Am Beispiel der Ammoniaksynthese (siehe Kapitel 5.1) und der vorgelagerten Dampfreformierung von Erdgas zur Wasserstoffgewinnung, der Methanolsynthese (siehe Kapitel 5.2), 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 grünem Wasserstoff wird beträchtliche Investitionen in Forschung und Entwicklung von Produkten und Produktionsverfahren sowie den Bau neuer Produktionsanlagen erfordern. Die Arbeitsprozesse der Fachkräfte werden sich hierbei nicht grundlegend ändern, da sich die in Kapitel 5 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.

In diesem Sinne werden in den nachfolgenden Abschnitten den oben beschriebenen Handlungsfeldern Ausbildungsberufe zugeordnet, die aufgrund ihres Profils für die jeweiligen Arbeitsaufgaben in Frage

kommen. Exemplarisch werden dazu in den Abschnitten Auszüge aus den Ausbildungsordnungen benannt, um die Eignung zu demonstrieren.

Die folgenden Kapitel basieren auf den Analysen des Sektors Energieerzeugung von Zinke (2022), die auf die Chemieindustrie übertragen und angepasst worden sind.

6.1 Anlagen planen und entwickeln

Für das Planen und Entwickeln von wasserstoffverarbeitenden Anlagen der Chemie- und Raffinerieindustrie kommen folgende Ausbildungsberufe für Fachkräfte auf mittlerer Ebene in Betracht (Tabelle 5).

Tabelle 5: Typische, in Frage kommende Ausbildungsberufe für den Teilprozess Anlagen planen und entwickeln

Teilprozess	Aufgabencluster	Typische, in Frage kommende Ausbildungsberufe
Anlagen planen und entwickeln	Planen und Projektieren	Technischer Systemplaner/Technische Systemplanerin - FR Elektrotechnische Systeme (Industrie und Handel) Technischer Systemplaner/Technische Systemplanerin - FR Stahl- und Metallbautechnik (Industrie und Handel) Technischer Systemplaner/Technische Systemplanerin - FR Versorgungs- und Ausrüstungstechnik (Industrie und Handel) Technischer Produktdesigner/Technische Produktdesignerin - FR Maschinen- und Anlagenkonstruktion (Industrie und Handel)
	Programmieren	Fachinformatiker/Fachinformatikerin - FR Digitale Vernetzung (Industrie und Handel) Fachinformatiker/Fachinformatikerin - FR Daten- und Prozessanalyse (Industrie und Handel)

Die Ausbildungsordnungen der einschlägigen Berufe sind ausreichend technikoffen formuliert, so dass basierend auf der allgemeinen beruflichen Handlungsfähigkeit der Fachkräfte erwartet werden kann, dass gestellte Aufgaben grundsätzlich bewältigt werden.

6.2 Anlagen errichten

Bei den wasserstoffverarbeitenden Anlagen handelt es sich um Stahl- und Rohrkonstruktionen zur Sicherung des Stoffflusses und Verortung der chemischen Reaktionen, verbunden mit elektrotechnischen Systemen zur Energieübertragung, entsprechenden Steuerungs- und Regelungseinrichtungen, sowie Sensorik und Aktorik zur Überwachung, gekoppelt mit Hard- und

Software zum Informationsfluss. Baugruppen und Bauteile werden teils durch Zulieferer und Komponentenhersteller vorgefertigt.

Für den Anlagenbau, der für die Chemie Anlagen errichtet, werden breit aufgestellte Querschnittsberufe benötigt, die in vielen Wirtschaftsbereichen, sowohl im Handwerk als auch in der Industrie, ausgebildet und eingesetzt werden. Sie sind besonders technikoffen bezogen auf die zu vermittelnden Fähigkeiten, Kenntnisse und Fertigkeiten. Zusätzlich ist bezogen auf das Errichten der Anlagen und die Zuordnung der geeigneten Ausbildungsberufe eine Unterteilung nach Fertigung, Montage und Programmierung möglich (Tabelle 6).

Tabelle 6: Typische, in Frage kommende Ausbildungsberufe im Kontext des Errichtens der Anlagen

Teilprozess	Aufgabencluster	Typische, in Frage kommende Berufe
Anlagen errichten	Fertigung	<p>Anlagenmechaniker/Anlagenmechanikerin (Industrie und Handel)</p> <p>Anlagenmechaniker für Sanitär-, Heizungs- und Klimatechnik/Anlagenmechanikerin für Sanitär-, Heizungs- und Klimatechnik (HW, IH)</p> <p>Behälter- und Apparatebauer/Behälter- und Apparatebauerin (HW)</p> <p>Industriemechaniker/Industriemechanikerin (Industrie und Handel)</p> <p>Zerspanungsmechaniker/Zerspanungsmechanikerin (Industrie und Handel)</p> <p>Mechatroniker/Mechatronikerin (Industrie und Handel)</p> <p>Elektroanlagenmonteur/Elektroanlagenmonteurin (Industrie und Handel)</p> <p>Elektroniker für Automatisierungstechnik/Elektronikerin für Automatisierungstechnik (Industrie und Handel)</p> <p>Elektroniker für Betriebstechnik/Elektronikerin für Betriebstechnik (Industrie und Handel)</p> <p>Elektroniker für Gebäude- und Infrastruktursysteme/Elektronikerin für Gebäude- und Infrastruktursysteme (Industrie und Handel)</p> <p>Fachinformatiker/Fachinformatikerin - FR Digitale Vernetzung (Industrie und Handel)</p> <p>Fachinformatiker/Fachinformatikerin - FR Systemintegration (Industrie und Handel)</p> <p>Fachinformatiker/Fachinformatikerin - FR Anwendungsentwicklung (Industrie und Handel)</p>
	Montage	<p>Anlagenmechaniker/Anlagenmechanikerin (IH)</p> <p>Anlagenmechaniker für Sanitär-, Heizungs- und Klimatechnik/Anlagenmechanikerin für Sanitär-, Heizungs- und Klimatechnik (HW, IH)</p> <p>Anlagenmechaniker/Anlagenmechanikerin (Industrie und Handel) Mechatroniker/Mechatronikerin (Industrie und Handel)</p> <p>Elektroanlagenmonteur/Elektroanlagenmonteurin (Industrie und Handel)</p> <p>Elektroniker für Automatisierungstechnik/Elektronikerin für Automatisierungstechnik (Industrie und Handel)</p> <p>Elektroniker für Betriebstechnik/Elektronikerin für Betriebstechnik (Industrie und Handel)</p> <p>Elektroniker/Elektronikerin - Fachrichtung Energie- und Gebäudetechnik (Hw)</p>

		Fachinformatiker/Fachinformatikerin - FR Digitale Vernetzung (Industrie und Handel) Fachinformatiker/Fachinformatikerin - FR Systemintegration (Industrie und Handel)
	Programmieren, Parametrieren	Elektroniker für Automatisierungstechnik/Elektronikerin für Automatisierungstechnik (Industrie und Handel) Elektroniker für Betriebstechnik/Elektronikerin für Betriebstechnik (Industrie und Handel) Elektroniker für Gebäudesystemintegration/Elektronikerin für Gebäudesystemintegration (Hw) Fachinformatiker/Fachinformatikerin - FR Digitale Vernetzung (Industrie und Handel) Fachinformatiker/Fachinformatikerin - FR Systemintegration (Industrie und Handel) Mechatroniker/Mechatronikerin (Industrie und Handel)

Das Errichten von wasserstoffverarbeitenden Anlagen der Chemie- und Raffinerieindustrie unterscheidet sich nicht grundsätzlich vom Bau anderer Anlagen, an denen mittlere Fachkräfte mit diesen Ausbildungsabschlüssen wirken.

Während des Errichtens sind die Anlagen noch nicht in Betrieb. Wasserstoff und damit Druck sowie Explosionsgefahr sind noch nicht im System.

Die in den jeweiligen Berufsprofilen und Rahmenlehrplänen ausgewiesenen Handlungsfelder sowie Fertigkeiten, Kenntnisse und Fähigkeiten decken den Qualifikationsbedarf für die zu erfüllenden Arbeitsaufgaben grundsätzlich ab. Mögliche Defizite können durch Lernen bei der Arbeit und ggf. durch Anpassungsfortbildung ausgeglichen werden.

Besonderheiten ergeben sich aus den Eigenschaften und Anforderungen der jeweiligen Stoffe (Fluide, Liquide, Granulate oder Gase), die in diesen Anlagen später hergestellt, transportiert und gespeichert werden. Diese Einschätzung betrifft auch Wasserstoff. Sie stellen besondere Anforderungen an die Werkstoffe, Qualität der Komponenten und Systeme.

Die zu bewältigenden Arbeitsaufgaben stützen sich auf technische Vorgaben von Dritten. Die Ausbildungsordnungen der einschlägigen Berufe sind gleichzeitig technikoffen formuliert, so dass basierend auf der allgemeinen beruflichen Handlungsfähigkeit der Fachkräfte erwartet werden kann, dass gestellte Aufgaben grundsätzlich bewältigt werden.

Abgeleitete Annahmen

1. Der Bau von wasserstoffverarbeitenden Anlagen der Chemie- und Raffinerieindustrie unterscheidet sich nicht grundsätzlich vom Bau anderen Anlagen, so dass in den jeweiligen Berufsprofilen und Qualifikationsbedarfen keine Änderungen erwartet werden.
2. Besonderheiten ergeben sich aus
 - a) den Eigenschaften und Anforderungen der jeweiligen Stoffe (Fluide, Liquide oder Gase), die in diesen Anlagen später hergestellt, transportiert und gespeichert werden,
 - b) den zu beherrschenden physikalischen Größen (Temperatur, Druck, Explosionsgefahr), die allerdings erst nach Inbetriebnahme wirken.

6.3 Anlagen überprüfen und in Betrieb nehmen

Soweit es sich um Fachkräfte auf mittlerer Ebene handelt, kommen für das Überprüfen und Inbetriebnehmen insbesondere folgende „einschlägige“ Ausbildungsberufe in Frage (Tabelle 7).

Tabelle 7: Typische, in Frage kommende Ausbildungsberufe im Kontext der technischen Überprüfung und Inbetriebnahme

Teilprozess	Aufgabencluster	Typische, in Frage kommende Berufe
Anlagen überprüfen und in Betrieb nehmen		Anlagenmechaniker/Anlagenmechanikerin (Industrie und Handel) Anlagenmechaniker für Sanitär-, Heizungs- und Klimatechnik/Anlagenmechanikerin für Sanitär-, Heizungs- und Klimatechnik (HW, IH) Industriemechaniker/Industriemechanikerin (Industrie und Handel) Mechatroniker/Mechatronikerin (Industrie und Handel) Produktionstechnologe/Produktionstechnologin (IH) Elektroanlagenmonteur/Elektroanlagenmonteurin (Industrie und Handel) Elektroniker für Automatisierungstechnik/Elektronikerin für Automatisierungstechnik (Industrie und Handel) Elektroniker für Betriebstechnik/Elektronikerin für Betriebstechnik (Industrie und Handel) Elektroniker für Gebäude- und Infrastruktursysteme/Elektronikerin für Gebäude- und Infrastruktursysteme (Industrie und Handel) Fachinformatiker/Fachinformatikerin - FR Digitale Vernetzung (Industrie und Handel) Fachinformatiker/Fachinformatikerin - FR Systemintegration (Industrie und Handel) Fachinformatiker/Fachinformatikerin - FR Anwendungsentwicklung (Industrie und Handel)

	Programmieren, Parametrieren und in Betrieb nehmen	Elektroniker für Automatisierungstechnik/Elektronikerin für Automatisierungstechnik (Industrie und Handel) Elektroniker für Betriebstechnik/Elektronikerin für Betriebstechnik (Industrie und Handel) Elektroniker für Gebäudesystemintegration/Elektronikerin für Gebäudesystemintegration (Hw) Fachinformatiker/Fachinformatikerin - FR Digitale Vernetzung (Industrie und Handel) Fachinformatiker/Fachinformatikerin - FR Systemintegration (Industrie und Handel) Mechatroniker/Mechatronikerin (Industrie und Handel)
--	---	--

Anhand der nachfolgenden Auszüge aus Ausbildungsrahmenplänen wird exemplarisch für drei Berufe verdeutlicht, weshalb die Annahme getroffen werden kann, dass Inhaber einzelner Ausbildungsberufe für Teilaufgaben geeignet und die notwendigen Qualifikationen dafür in den Ausbildungsordnungen durch technikoffene Formulierungen verankert sind (Tabelle 8, Tabelle 9, Tabelle 10).

Tabelle 8: Auszug aus dem Ausbildungsrahmenplan für den Beruf Produktionstechnologe/Produktionstechnologin (vgl. (BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz) 16.06.2008; BMWi Juni 2018)

Lfd. Nr.	Teil des Ausbildungsberufsbildes	Fertigkeiten, Kenntnisse und Fähigkeiten, die unter Einbeziehung selbstständigen Planens, Durchführens und Kontrollierens zu vermitteln sind
3.1	Ermitteln, Testen und Einstellen von Prozessparametern (§ 3 Abs. 2 Abschnitt A Nr. 3.1)	a) Produkte im Hinblick auf Produktionsprozesse analysieren b) Produktionsverfahren, Prozessschritte, Produktionsanlagen, Werkzeuge, Spannmittel, Vorrichtungen, Arbeitsstoffe und Fertigungsparameter auswählen c) Testreihen fahren, Prozessparameter anpassen, Ergebnisse dokumentieren sowie zur Erstellung und Optimierung von Prozessvorschriften nutzen d) Prüfverfahren und -mittel auswählen, Messungen und Prüfungen planen, Anweisungen zur Probennahme sowie Prüfpläne erstellen

Tabelle 9: Auszug aus dem Ausbildungsrahmenplan für den Beruf Mechatroniker/in (vgl. (BMWi Juni 2018))

Lfd. Nr.	Teil des Ausbildungsberufsbildes	Fertigkeiten, Kenntnisse und Fähigkeiten, die unter Einbeziehung selbstständigen Planens, Durchführens und Kontrollierens zu vermitteln sind
20	Inbetriebnehmen und Bedienen mechatronischer Systeme (§ 3 Absatz 2 Nummer 20)	a) Schutz gegen direktes Berühren prüfen b) Wirksamkeit von Schutzmaßnahmen, insbesondere Fehlerstromschutzeinrichtungen, prüfen, Isolations-, Erdungs- und Schleifenwiderstände messen c) mechanische und elektrische Sicherheitsvorrichtungen, insbesondere NOT-AUS-Schalter, sowie Meldesysteme auf ihre Wirksamkeit prüfen d) Hilfs- und Steuerstromkreise einschließlich zugehöriger Signal- und Befehlsgeber für Mess-, Steuer- und Überwachungseinrichtungen prüfen und in Betrieb nehmen e) Hauptstromkreise prüfen und schrittweise in Betrieb nehmen, Betriebswerte messen, Sollwerte einstellen f) Fluidikeinrichtungen in Betrieb nehmen g) Beweglichkeit, Dichtheit, Laufruhe, Umdrehungsfrequenz, Druck, Temperatur und Verfahrswege prüfen und einstellen h) Befestigung, Energieversorgung, Schmierung, Kühlung und Entsorgung prüfen und sicherstellen i) Programme und Daten laden und sichern, Programmablauf prüfen und anpassen j) Signalübertragungssysteme, insbesondere Feldbusse, prüfen und in Betrieb nehmen k) mechatronische Systeme in Betrieb nehmen, Funktionsprüfung durchführen l) Schutzmaßnahmen zur elektromagnetischen Verträglichkeit prüfen m) Systemparameter bei der Inbetriebnahme ermitteln, mit vorgegebenen Werten vergleichen und einstellen n) Maschinen und Systeme bedienen, Probelauf bei Nenn- und Grenzwerten durchführen

Tabelle 10: Auszug aus dem Ausbildungsrahmenplan für den Beruf Industriemechaniker/in (vgl. (BMW 28.06.2018c)

Lfd. Nr.	Teil des Ausbildungsberufsbildes	Fertigkeiten, Kenntnisse und Fähigkeiten, die unter Einbeziehung selbstständigen Planens, Durchführens und Kontrollierens zu vermitteln sind
14	Sicherstellen der Betriebsfähigkeit von technischen Systemen (§ 11 Abs. 1 Nr. 14)	a) Störungen an Maschinen und Systemen unter Beachtung der Schnittstellen feststellen und Fehler eingrenzen b) Störungs- und Fehlerursachen feststellen, die Möglichkeiten ihrer Beseitigung beurteilen und die Instandsetzung oder Verbesserung durchführen oder veranlassen c) Anlagen und Systeme inspizieren, Betriebsbereitschaft sicherstellen d) Funktionsfähigkeit von Maschinen und Systemen durch Steuern, Regeln und Überwachen der Arbeitsbewegungen und deren Hilfsfunktionen sicherstellen oder verbessern e) Schutz- und Sicherheitseinrichtungen anwenden und deren Funktion prüfen

Die Beispiele demonstrieren, dass in den Ausbildungsordnungen technischer Berufe die entsprechend notwendigen Fertigkeiten, Kenntnisse und Fähigkeiten beschrieben sind, die in der Ausbildung bezogen auf betriebliche Bedarfe zur Inbetriebnahme von Anlagen – vollständig oder auf Teilaspekte begrenzt – umgesetzt werden.

Die berufsfachlichen Anforderungen sind damit, im Sinne einer Vor-Voraussetzung, erfüllt.

Daraus abgeleitete Annahmen bzw. Schlussfolgerungen sind:

1. Für das Überprüfen und Inbetriebnehmen von Wasserstoffherstellungsanlagen stehen eine Reihe von Ausbildungsberufen zur Verfügung, die die Vor-Voraussetzungen für das Überprüfen und Inbetriebnehmen der Wasserstoffherstellungsanlagen erfüllen.
2. Die „einschlägigen“ Ausbildungsordnungen sind genügend aktuell und bedürfen keiner Änderung.

6.4 Anlagen betreiben

Die in Kapitel 5 besprochenen Produktionsprozesse sind in der Regel automatisierte und kontinuierlich ablaufende chemische Prozesse. Sie werden von einem Leitstand aus gefahren und überwacht. Insbesondere in Hinblick auf die weitere Bereitstellung von Wasserstoff durch die Elektrolyse kann es vorkommen, dass Syntheseschritte näher an die Anlagen der Stromerzeugung und Elektrolyse rücken. Hierbei kann es sich auch um kleine dezentrale Anlagen handeln, die ohne ständiges Personal vor Ort auskommen. Der Personalaufwand ist voraussichtlich hier eher gering. Ein Beispiel hierfür sind die

Anlagen der japanischen Firma Tsubame BHB (siehe Kapitel 5.1), die durch ihre geringe Größe geeignet sein werden, die Ammoniaksynthese und Folgeschritte am Rand von Wind- oder Solarparks zu betreiben. Ausbildungsberufe, die dafür besonders geeignet sind, werden nachfolgend aufgeführt (Tabelle 11).

Tabelle 11: Ausbildungsberufe im Kontext Wasserstoffherzeugung

Teilprozess	Aufgabencluster	Berufe
Anlagen betreiben	Technische Prozessüberwachung, Prozesssteuerung und -regelung	Chemikant/Chemikantin (Industrie und Handel) Produktionsfachkraft Chemie (Industrie und Handel)

Die Fachkräfte müssen beim Betreiben der Anlage entlang der Prozesskette Abläufe überwachen, steuern und dokumentieren.

Grundsätzlich notwendige Fertigkeiten, Kenntnisse und Fähigkeiten sind als Ankerbegriffe in den Ausbildungsordnungen für den Ausbildungsberuf Chemikant/in (Tabelle 12) und Produktionsfachkraft Chemie enthalten, was folgende Auszüge exemplarisch aufzeigen.

Tabelle 12: Auszug aus dem Ausbildungsrahmenplan für den Beruf Chemikant/in (vgl. (BMWi 10.06.2009)

Lfd. Nr.	Teil des Ausbildungsberufsbildes	Fertigkeiten, Kenntnisse und Fähigkeiten, die unter Einbeziehung selbstständigen Planens, Durchführens und Kontrollierens zu vermitteln sind
I 3.2 ⁴	Anlagensicherheit (§ 4 Absatz 2 Abschnitt I Nummer 3.2)	a) Exzonen, Zündschutzarten und Temperaturklassen beachten b) Einrichtungen zur Anlagensicherheit unterscheiden und beachten c) bei Störungen betriebsspezifische Maßnahmen einleiten
I.10	Betreiben von Produktionsanlagen (§ 4 Absatz 2 Abschnitt I Nummer 10)	a) Produktionsprozesse einschließlich der Ver- und Entsorgung und unter Berücksichtigung von Umweltschutzmaßnahmen beschreiben b) Anlagen oder Teilanlagen anfahren und abfahren und im Rahmen der Betriebsanweisung fahren
II.1	Produktionsverfahren (§ 4 Absatz 2 Abschnitt II Nummer 1)	a) bei der Planung von Produktionsprozessen mitwirken b) anorganische, organische, polymere oder bio- und gentechnische Produkte unter Berücksichtigung des Reaktionsverhaltens sowie gesetzlicher und betrieblicher Vorgaben herstellen

⁴ Gleichlautend auch für den Beruf [Produktionsfachkraft Chemie \(Industrie und Handel\)](#).

		c) Inprozess-Kontrolle durchführen d) Produkte prüfen
II.2	Verarbeitungstechnik (§ 4 Absatz 2 Abschnitt II Nummer 2)	a) bei der Planung von Verarbeitungsprozessen mitwirken b) Anlagen und Teilanlagen zur Verarbeitung von Stoffen in Betrieb nehmen und nach Betriebsanweisung fahren c) vorbeugende Wartung durchführen; bei Störungen Maßnahmen ergreifen d) Verarbeitungsprozesse dokumentieren und Qualitätskontrollen durchführen

Tabelle 13: Auszug aus dem Ausbildungsrahmenplan für den Beruf Produktionsfachkraft Chemie (vgl. (BMWA 23.03.2005)

Lfd. Nr.	Teil des Ausbildungsberufsbildes	Fertigkeiten, Kenntnisse und Fähigkeiten, die unter Einbeziehung selbstständigen Planens, Durchführens und Kontrollierens zu vermitteln sind
10	Bedienen von Anlagen (§ 5 Nr. 10)	a) Einsatz- und Hilfsstoffe übernehmen und bereitstellen, Wareneingangskontrollen durchführen b) Betriebsbereitschaft von Anlagen sicherstellen c) Anlagen oder Teilanlagen an- und abfahren d) Anlagen oder Teilanlagen gemäß Betriebsanweisung bedienen und überwachen

Abgeleitete Annahmen:

1. Das Betreiben von Wasserstoff führenden Anlagen ist grundsätzlich mit vorhandenen Ausbildungsberufen gesichert.
2. Qualifikationen für Arbeitsaufgaben die Wasserstoff betreffen, sind bereits heute im ausreichenden Maß vorhanden.
3. Notwendigkeiten für die Anpassungen der Ausbildungsordnungen werden hier nicht erkannt.

6.5 Anlagen überwachen

Unabhängig von der Anlagengröße ist das Aufrechterhalten der Sicherheit und die Absicherung der Anlagen zur Wasserstofferzeugung, -speicherung und zum Wasserstofftransport vor äußeren Störungen und Gefährdungen zunächst eine Teilaufgabe aller an den Anlagen zur Wasserstofferzeugung arbeitenden Fachkräften.

Weiterführende Maßnahmen (Gefahrenabwehr und Gefahrenvorbeugung) unterliegen speziell qualifizierten Fachkräften. Einerseits betrifft das die reale Gefährdung durch äußere Angriffe, andererseits die virtuelle Gefährdung, z.B. durch Cyberangriffe.

Drei Ausbildungsberufe sind hier von besonderer Bedeutung (Tabelle 14).

Tabelle 14: Ausbildungsberufe im Kontext der Überwachung der Anlagen

Teilprozess	Aufgabencluster	Berufe
Anlagen überwachen	Überwachen der Sicherheit der Anlagen im Rahmen des Regelbetriebs, Störungen und Havarien vermeiden, bei Störfällen handeln; IT-Sicherheit und Cyberabwehr; Gefahren abwehren und vorbeugen (vorbeugender Brandschutz); Sicherheit überwachen	Fachinformatiker/Fachinformatikerin - FR Digitale Vernetzung (Industrie und Handel) Fachkraft für Schutz und Sicherheit (IH) Werkfeuerwehrmann/Werkfeuerwehrfrau (Industrie und Handel)

Bezogen auf deren Handeln im Umgang mit Anlagen zur Wasserstofferzeugung geben die Ausbildungsordnungen nur einen generellen Rahmen. Regelungen zu Spezialisierungen und Fortbildungen konnten hier nur sehr begrenzt identifiziert werden.

Für Werkfeuerwehrlaute liegt ein Leitfaden im Umgang mit Wasserstoff vor (vgl. (AGBF 2008). Der im Jahr 2020 neugeordnete Ausbildungsberuf Fachinformatiker/in, beinhaltet insbesondere in der Fachrichtung Digitale Vernetzung das „Sicherstellen der Systemverfügbarkeit“ (Tabelle 15).

Tabelle 15: Auszug aus dem Ausbildungsrahmenplan für den Beruf Fachinformatiker/in Fachrichtung Digitale Vernetzung (vgl. (BMWi 28.02.2020)

Lfd. Nr.	Teil des Ausbildungsberufsbildes	Fertigkeiten, Kenntnisse und Fähigkeiten, die unter Einbeziehung selbstständigen Planens, Durchführens und Kontrollierens zu vermitteln sind
3	Betreiben von vernetzten Systemen und Sicherstellung der Systemverfügbarkeit (§ 4 Absatz 6 Nummer 3)	a) Systemauslastung überwachen und Systemstatus dokumentieren b) Systemdaten erfassen und im Hinblick auf Vorgabeparameter auswerten und Systemstörungen feststellen und beheben c) Daten auswerten, um Wartungsintervalle und Prozessabläufe zu optimieren d) System-, Diagnose- und Prozessdaten auswerten, Schwachstellen identifizieren und Maßnahmen ableiten e) Angriffsszenarien in cyber-physischen Systemen unterscheiden und antizipieren f) Anomalien in vernetzten Systemen feststellen und Schutzmaßnahmen einleiten

		g) bereichsspezifische Sicherheitslösungen implementieren h) Systemaktualisierungen vornehmen und Optimierungen vorschlagen
--	--	--

Abgeleitete Annahmen:

1. Das Überwachen von wasserstoffführenden Anlagen ist bereits mit den vorhandenen Berufsprofilen gesichert.
2. Qualifikationen für Arbeitsaufgaben, die Wasserstoff betreffen, sind bereits heute im ausreichenden Maß vorhanden.

6.6 Anlagen instand halten

Für weitere Arbeitsaufgaben (regelmäßige Revision, Wartung, Instandhaltung und Ändern von Anlagen) bzw. Teile davon können Ausgebildete in den Berufen zum Einsatz kommen, die in der folgenden Tabelle aufgeführt sind.

Tabelle 16: Ausbildungsberufe im Kontext der Instandhaltung

Teilprozess	Aufgabencluster	Berufe
Anlagen instand halten	Regelmäßige Revisionen durchführen, Parameter überprüfen, Störungen und Havarien beheben, Anlagen ändern und erweitern	Chemikant/Chemikantin (Industrie und Handel) Industriemechaniker/Industriemechanikerin (Industrie und Handel) Anlagenmechaniker/Anlagenmechanikerin (Industrie und Handel) Mechatroniker/Mechatronikerin (Industrie und Handel) Elektroanlagenmonteur/Elektroanlagenmonteurin (Industrie und Handel) Elektroniker für Automatisierungstechnik/Elektronikerin für Automatisierungstechnik (Industrie und Handel) Elektroniker für Betriebstechnik/Elektronikerin für Betriebstechnik (Industrie und Handel) Fachinformatiker/Fachinformatikerin - FR Digitale Vernetzung (Industrie und Handel)

Beispielgebend für technikoffen formulierte Inhalte in den Ausbildungsordnungen der Berufe zur Instandhaltung sind nachfolgend aufgeführte Auszüge aus den drei Ausbildungsordnungen der Berufe Anlagenmechaniker/in (Tabelle 17), Chemikant/in (Tabelle 18) und Mechatroniker/in (Tabelle 19).

Tabelle 17: Auszug aus dem Ausbildungsrahmenplan für den Beruf Anlagenmechaniker/in (vgl. (BMWi 28.06.2018b)

Lfd. Nr.	Teil des Ausbildungsberufsbildes	Fertigkeiten, Kenntnisse und Fähigkeiten, die unter Einbeziehung selbstständigen Planens, Durchführens und Kontrollierens zu vermitteln sind
16	Instandhaltung; Feststellen, Eingrenzen und Beheben von Fehlern und Störungen (§ 7 Absatz 1 Nummer 16)	<ul style="list-style-type: none"> a) Anlagen oder Anlagenteile inspizieren, Fehler, Beschädigungen und Störungen feststellen und eingrenzen b) Vorbereitungsmaßnahmen zur Instandhaltung von Anlagenteilen unter Berücksichtigung verfahrens- und sicherheitstechnischer Vorschriften durchführen c) Bauteile auf Verschleiß und Beschädigungen sichtprüfen d) Anlagenteile oder Versorgungseinrichtungen unter Beachtung sicherheits- und verfahrenstechnischer Vorschriften außer Betrieb setzen e) Anlagen oder Anlagenteile warten f) Anlagen oder Anlagenteile instand setzen g) Inspektionsbefunde und Instandhaltungsmaßnahmen dokumentieren

Tabelle 18: Auszug aus dem Ausbildungsrahmenplan für den Beruf Chemikant/in, die Instandhaltung betreffend (vgl. (BMWi 10.06.2009)

Lfd. Nr.	Teil des Ausbildungsberufsbildes	Fertigkeiten, Kenntnisse und Fähigkeiten, die unter Einbeziehung selbstständigen Planens, Durchführens und Kontrollierens zu vermitteln sind
1.12	Instandhaltung von Produktionseinrichtungen (§ 4 Absatz 2 Abschnitt I Nummer 12)	<ul style="list-style-type: none"> a) Produktionseinrichtungen zur Reparatur und Wartung unter Beachtung sicherheitstechnischer Vorschriften und verfahrenstechnischer Bedingungen in und außer Betrieb nehmen b) Baugruppen und Bauteile unter Beachtung bauteilspezifischer Montagebedingungen austauschen c) Baugruppen und Bauteile sichern und transportieren d) vorbeugende Instandhaltung von Produktionseinrichtungen durchführen und dokumentieren

Tabelle 19: Auszug aus dem Ausbildungsrahmenplan für den Beruf Mechatroniker/in (vgl. (BMWi 28.06.2018a)

Lfd. Nr.	Teil des Ausbildungsberufsbildes	Fertigkeiten, Kenntnisse und Fähigkeiten, die unter Einbeziehung selbstständigen Planens, Durchführens und Kontrollierens zu vermitteln sind
21	Instandhalten mechatronischer Systeme	<ul style="list-style-type: none"> a) mechatronische Systeme inspizieren, Funktionen von Sicherheitseinrichtungen prüfen sowie Prüfungen protokollieren

	(§ 3 Absatz 2 Nummer 21)	<ul style="list-style-type: none"> b) mechatronische Systeme nach Wartungs- und Instandhaltungsplänen warten, Verschleißteile im Rahmen der vorbeugenden Instandhaltung austauschen c) Geräte und Baugruppen unter Beachtung ihrer Funktion ausbauen und Teile hinsichtlich Lage und Funktionszuordnung kennzeichnen d) Störungen durch Nacharbeiten und Austausch von Teilen und Baugruppen beseitigen e) Softwarefehler beheben f) Systemparameter mit vorgegebenen Werten vergleichen und einstellen g) mechatronische Systeme unter Beachtung der betrieblichen Abläufe instand setzen h) mechatronische Systeme an geänderte Betriebsbedingungen anpassen i) Diagnose- und Wartungssysteme nutzen
--	--------------------------	--

Die drei Beispiele verdeutlichen, dass abhängig vom Ausbildungsberuf die Perspektive auf den Instandhaltungsprozess eine andere ist. Gleichwohl ist in allen Fällen die umfassende Grundbefähigung zu entsprechenden Aufgabenstellungen gegeben.

Abgeleitete Annahmen:

1. Das Instandhalten von wasserstoffführenden Anlagen ist grundsätzlich mit vorhandenen Berufsprofilen gesichert.
2. Qualifikationen für Arbeitsaufgaben die Wasserstoff betreffen, sind bereits heute im ausreichenden Maß vorhanden.
3. Besonderheiten ergeben sich aus
 - a) den Eigenschaften und Anforderungen der jeweiligen Stoffe (Fluide, Liquide, oder Gase), die in diesen Anlagen hergestellt, transportiert und gespeichert werden,
 - b) den zu beherrschenden physikalischen Größen (Temperatur, Druck).

7 Geltende Rechtsgrundlagen zur Arbeit an Anlagen zur Erzeugung, Speicherung und dem Transport von Wasserstoff und Konsequenzen für die Qualifikation der eingesetzten Fachkräfte

7.1 Anlagencharakteristik als Ausgangspunkt

Wasserstoffführende Anlagen sind überwachungsbedürftige Anlagen ([Betriebssicherheitsverordnung \(BetrSichV\)](#), (Deutscher Bundestag 01.06.2015), Anhang 2 Abschnitte 3 und 4). Es handelt sich sowohl um Druckanlagen als auch um Anlagen mit Explosionsgefährdungen.

Für das Arbeiten an wasserstoffführenden Anlagen sowie für den Betrieb der Anlagen muss das Unternehmen für die Beschäftigten im Rahmen einer Gefährdungsbeurteilung geeignete Schutzmaßnahmen unter Berücksichtigung der speziellen Eigenschaften von Wasserstoff festlegen. Diese Gefährdungsbeurteilung liefert ihm als Arbeitgeber erste, wichtige Informationen zu möglichen Qualifikationsanforderungen an die eingesetzten Fachkräfte.

7.1.1 Explosionsgefährdungen

Für Anlagen, die Explosionsgefährdungen implizieren, sind regelmäßige Prüfungen notwendig. Dies betrifft Prüfungen von Arbeitsmitteln sowie Prüfungen der Maßnahmen in explosionsgefährdeten Bereichen nach § 2 Absatz 14 der Gefahrstoffverordnung (Bundestag 01.12.2010). Anlagen in explosionsgefährdeten Bereichen sind vor Inbetriebnahme, nach prüfpflichtigen Änderungen und nach Instandsetzungen sowie mindestens alle sechs Jahre wiederkehrend durch zur Prüfung befähigte Personen zu überprüfen (Deutscher Bundestag 01.06.2015).

Die Prüfungen sind mit dem Ziel durchzuführen, den Schutz vor Gefährdungen durch Explosionen und Brände mindestens bis zur nächsten Prüfung sicherzustellen. Bei den Prüfungen sind auch die Eignung und die Funktionsfähigkeit der technischen Schutzmaßnahmen festzustellen, die nach dieser Verordnung und der Gefahrstoffverordnung getroffen wurden. Bei den Prüfungen nach diesem Abschnitt sollen gleichwertige Ergebnisse von Prüfungen nach anderen Rechtsvorschriften des Bundes und der Länder berücksichtigt werden (vgl. (Deutscher Bundestag 01.06.2015)).

7.1.2 Druckanlagen

Wasserstoffverarbeitende Produktionsanlagen entsprechen gemäß der Betriebssicherheitsverordnung Druckanlagen (Deutscher Bundestag 01.06.2015). Sie gehören demnach zu überwachungsbedürftigen Anlagen. Druckanlagen und Anlagenteile müssen vor der erstmaligen Inbetriebnahme und nach prüfpflichtigen Änderungen sowie für wiederkehrende Prüfungen einer Prüfung unterzogen werden (vgl. (Deutscher Bundestag 01.06.2015)).

Für die technische Überprüfung von Druckanlagen liegt die Verantwortung beim Arbeitgeber, sofern es sich nicht um Energieanlagen handelt (vgl. (Deutscher Bundestag 01.06.2015)). Sie erfolgt bei Inbetriebnahme, bei Wiederinbetriebnahme nach prüfpflichtigen Änderungen (vgl. (Deutscher Bundestag 01.06.2015)) sowie als wiederkehrende Prüfung nach festgelegten Fristen entsprechend geltender Vorgaben durch zur Überprüfung befähigte Personen oder eine zugelassene Überwachungsstelle (Deutscher Bundestag 01.06.2015).

7.2 Übersicht geltender Gesetze und Regeln

Ausgangspunkt der Analyse ist die Frage, welche wichtigsten Rechtsgrundlagen das Arbeiten an entsprechenden Anlagen zur Herstellung, Verwendung, Verarbeitung, Speicherung und dem Transport von Wasserstoff regeln, wie verbindlich sie sind und worauf sie anwendbar sind (Tabelle 20).

Tabelle 20: Übersicht geltender Gesetze und Regeln

Sammelbegriff	Charakter	Inhalt
Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV) (Deutscher Bundestag 01.06.2015)	Bundesrecht	Regeln zur Sicherheit und den Schutz der Gesundheit von Beschäftigten bei der Verwendung von Arbeitsmitteln, die insbesondere erreicht werden durch <ul style="list-style-type: none"> • die Auswahl geeigneter Arbeitsmittel und deren sichere Verwendung, • die für den vorgesehenen Verwendungszweck geeignete Gestaltung von Arbeits- und Fertigungsverfahren sowie • die Qualifikation und Unterweisung der Beschäftigten. <p>(5) Fachkundig ist, wer zur Ausübung einer in dieser Verordnung bestimmten Aufgabe über die erforderlichen Fachkenntnisse verfügt. Die Anforderungen an die Fachkunde sind abhängig von der jeweiligen Art der Aufgabe. Zu den Anforderungen zählen eine entsprechende Berufsausbildung, Berufserfahrung oder eine zeitnah ausgeübte entsprechende berufliche Tätigkeit. Die Fachkenntnisse sind durch Teilnahme an Schulungen auf aktuellem Stand zu halten.</p> <p>(6) Zur Prüfung befähigte Person ist eine Person, die durch ihre Berufsausbildung, ihre Berufserfahrung und ihre zeitnahe berufliche Tätigkeit über die erforderlichen Kenntnisse zur Prüfung von Arbeitsmitteln verfügt; soweit hinsichtlich der Prüfung von Arbeitsmitteln in den Anhängen 2 und 3 weitergehende Anforderungen festgelegt sind, sind diese zu erfüllen.</p> <p>Rolle und Funktion zugelassener Überwachungsstellen (ZÜS) (vgl. Anlage 1, Abschnitt 1)</p>
TRBS , (Bundesministerium für Arbeit und Soziales März 2018), Technische Regeln für Betriebssicherheit und Gefährdungsbeurteilung	Bundesrecht; Bundesministerium für Arbeit und Soziales	Regeln zur Sicherheit und den Schutz der Gesundheit von Beschäftigten bei der Verwendung von Arbeitsmitteln sowie den Schutz anderer Personen im Gefahrenbereich überwachungsbedürftiger Anlagen
TRBS 1201 (Bundesministerium für Arbeit und Soziales 23.05.2019)	Bundesrecht; Bundesministerium für Arbeit und Soziales	konkretisiert im Rahmen ihres Anwendungsbereichs die Anforderungen der Betriebssicherheitsverordnung, u.a. und im Besonderen die Verfahrensweise zur Bestimmung der mit der Prüfung zu beauftragenden Person oder zugelassenen Überwachungsstelle (ZÜS)

Sammelbegriff	Charakter	Inhalt
TRBS 1203 (Bundesministerium für Arbeit und Soziales März 2019)	Bundesrecht; Bundesministerium für Arbeit und Soziales	Anforderungen an die Befähigung einer zur Prüfung befähigten Person entsprechend § 2 Absatz 6 BetrSichV.
DGUV Vorschriften (Berufsgenossenschaft Holz und Metall (BGHM) 2022)	Autonomes Recht, Berufsgenossenschaften und Unfallkassen (Unfallversicherungsträger, UVT), rechtsverbindlich nach SGB VII	Schutzziele für Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit sowie branchen- oder verfahrensspezifische Forderungen an die Sicherheit und den Gesundheitsschutz Unterscheiden DGUV-Regeln und Vorschriften
Unfallverhütungsvorschriften	Berufsgenossenschaften	Maßnahmen zur Verhütung von Arbeitsunfällen, Berufskrankheiten und arbeitsbedingten Gesundheitsgefahren oder für eine wirksame Erste Hilfe
Gefahrstoffverordnung (Bundestag 01.12.2010)	Bundesrecht	Menschen und die Umwelt vor stoffbedingten Schädigungen zu schützen durch <ul style="list-style-type: none"> • Regelungen zur Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung gefährlicher Stoffe und Gemische, • Maßnahmen zum Schutz der Beschäftigten und anderer Personen bei Tätigkeiten mit Gefahrstoffen und • Beschränkungen für das Herstellen und Verwenden bestimmter gefährlicher Stoffe, Gemische und Erzeugnisse.
Gesetz über überwachungsbedürftige Anlagen (Deutscher Bundestag 16.07.2021)	Bundesrecht/ Länderrecht	Bei Betrieb überwachungsbedürftiger Anlagen die Sicherheit und den Gesundheitsschutz der Beschäftigten und anderer Personen gewährleisten, die sich im Gefahrenbereich einer solchen Anlage befinden Überwachungsstellen werden durch Zulassungsbehörden der Länder zugelassen (ZÜS). Anforderungen an die mit Prüfungen von überwachungsbedürftigen Anlagen beauftragten Personen

Von diesen Rechtsgrundlagen ausgehend, ergibt sich, dass für das Arbeiten an Wasserstofferzeugungsanlagen einschlägige Gesetze und Normen zu berücksichtigen sind, die über eine in der Regel abgeschlossene, einschlägige Berufsausbildung hinaus weitere notwendige Anforderungen an die Qualifikation der Fachkräfte und deren Einsatz festlegen. Erneut können dabei Anforderungsmerkmale an die Fachkräfte nach Teilprozessen unterschieden werden, wie das Überprüfen und Inbetriebnehmen, das Betreiben, das Überwachen und das Instandhalten der Anlagen.

7.3 Typische Funktionen von Fachkräften bei Arbeiten an Anlagen zur Herstellung, Verwendung, Verarbeitung, Speicherung und dem Transport von Wasserstoff

Fachkräfte übernehmen beim Arbeiten an Anlagen zur Herstellung, Verwendung, Verarbeitung, Speicherung und dem Transport von Wasserstoff entsprechend den Rechtsnormen allgemein fünf unterschiedliche Funktionen:

Sie arbeiten als

1. fachkundige Personen,
2. fachkundig, unterwiesene und beauftragte Personen,
3. Sicherheitsfachkräfte,
4. zur Prüfung befähigte Personen,
5. zugelassene Überwachungsstellen (ZÜS) und die mit Prüfungen vonüberwachungsbedürftigen Anlagen beauftragte Personen.

Auf Grundlage der Betriebssicherheitsverordnung kann dies auf Teilprozesse fokussiert werden (Tabelle 21).

Tabelle 21: Teilprozesse und Funktionsaufgaben

Funktionen/ Teilprozess	fachkundige Personen	fachkundig, unterwiesene und beauftragte Personen	Sicherheits- fachkräfte	zur Prüfung befähigte Personen	zugelassene Über- wachungsstellen (ZÜS) und die mit Prüfungen von überwachungsbe- dürftigen Anlagen beauftragten Personen
Planen und Entwickeln					
Errichten			x		
(technisches) Überprüfen und Inbetriebnehmen			(x)	x	x
Betreiben	x		x		
Überwachen (Sicherheit gewährleisten, Störungen vermeiden, Havarien bewältigen)			x		
Instandhalten		x	x		

7.4 Anforderungen an die Qualifikation der Fachkräfte nach Funktion

7.4.1 Fachkundige Personen

Für das Betreiben von wasserstoffverarbeitenden Produktionsanlagen sind fachkundige Personen einzusetzen. Die Verantwortung dafür liegt beim Arbeitgeber.

„Fachkundig ist, wer zur Ausübung einer in dieser Verordnung bestimmten Aufgabe über die erforderlichen Fachkenntnisse verfügt. Die Anforderungen an die Fachkunde sind abhängig von der jeweiligen Art der Aufgabe. Zu den Anforderungen zählen eine entsprechende Berufsausbildung, Berufserfahrung oder eine zeitnah ausgeübte entsprechende berufliche Tätigkeit. Die Fachkenntnisse sind durch Teilnahme an Schulungen auf aktuellem Stand zu halten“ (Gemäß § 2 Abs. 5 [Betriebssicherheitsverordnung \(BetrSichV\)](#), (Deutscher Bundestag 01.06.2015).

7.4.2 Fachkundige, beauftragte und unterwiesene Personen

Instandhaltungsmaßnahmen dürfen laut Betriebssicherheitsverordnung nur von fachkundigen, beauftragten und unterwiesenen Beschäftigten oder von sonstigen für die Durchführung der Instandhaltungsarbeiten geeigneten Auftragnehmern mit vergleichbarer Qualifikation durchgeführt werden.

Die zusätzlichen Attribute „beauftragte und unterwiesene“ Person geben Hinweis darauf, dass Instandhaltungsmaßnahmen auf Grundlage einer Gefährdungsbeurteilung durchgeführt werden. Der Arbeitgeber ist dafür in besonderer Weise verantwortlich, deshalb muss er fachkundige Personen für diese Aufgaben unterweisen und beauftragen (vgl. [Betriebssicherheitsverordnung \(BetrSichV\)](#), §10 Absatz 2 (Deutscher Bundestag 01.06.2015).

7.4.3 Zur Prüfung befähigte Personen

Eine „zur Prüfung befähigte Person ist eine Person, die durch ihre Berufsausbildung, ihre Berufserfahrung und ihre zeitnahe berufliche Tätigkeit über die erforderlichen Kenntnisse zur Prüfung von Arbeitsmitteln verfügt“ ([Betriebssicherheitsverordnung \(BetrSichV\)](#), §2 Abs., (Deutscher Bundestag 01.06.2015).

Speziell für das Prüfen von Druckanlagen und explosionsgefährdeten Anlagen werden im Betriebssicherheitsgesetz konkretere Anforderungen festgelegt.

7.4.3.1 Zur Prüfung von Explosionsgefährdungen befähigte Personen

Eine zur Prüfung von Explosionsgefährdungen befähigte Person muss darüber hinaus

- a) über eine einschlägige technische Berufsausbildung oder eine andere für die vorgesehenen Prüfungsaufgaben ausreichende technische Qualifikation verfügen,

- b) über eine mindestens einjährige Erfahrung mit der Herstellung, dem Zusammenbau, dem Betrieb oder der Instandhaltung der zu prüfenden Anlagen oder Anlagenkomponenten im Sinne dieses Abschnitts verfügen und
- c) ihre Kenntnisse über Explosionsgefährdungen durch Teilnahme an Schulungen oder Unterweisungen auf aktuellem Stand halten ([Betriebssicherheitsverordnung \(BetrSichV\)](#), [Anlage 2 Abschnitt 3 \(Deutscher Bundestag 01.06.2015\)](#)).

Der Gesetzgeber schreibt in bestimmten Fällen vor, dass zur Prüfung von Explosionsgefährdungen befähigte Personen für die Durchführung von entsprechenden Prüfungen über eine behördliche Anerkennung verfügen müssen. Die Anerkennung ist zu erteilen, wenn die zur Prüfung befähigten Personen über die für die Prüfaufgabe erforderliche Qualifikation und Zuverlässigkeit sowie die notwendigen Prüfeinrichtungen verfügen.

Eine zur Prüfung befähigte Person muss

- a) eine der folgenden Qualifikationen besitzen:
 - ein einschlägiges Studium,
 - eine einschlägige Berufsausbildung,
 - eine vergleichbare technische Qualifikation oder
 - eine andere technische Qualifikation mit langjähriger Erfahrung auf dem Gebiet der Sicherheitstechnik;
- b) umfassende Kenntnisse des Explosionsschutzes einschließlich des zugehörigen Regelwerkes besitzen;
- c) eine einschlägige Berufserfahrung aus einer zeitnahen Tätigkeit nachweisen können;
- d) ihre Kenntnisse zum Explosionsschutz auf aktuellem Stand halten und
- e) sich regelmäßig durch Teilnahme an einem einschlägigen Erfahrungsaustausch auf dem Gebiet des Explosionsschutzes fortbilden (vgl. [Betriebssicherheitsverordnung \(BetrSichV\)](#), [Anlage 2 Abschnitt 3 \(Deutscher Bundestag 01.06.2015\)](#)).

7.4.3.2 Zur Prüfung von Druckanlagen befähigte Person

Eine zur Prüfung von Druckanlagen befähigte Person muss, bezogen auf die jeweilige Prüfaufgabe, folgenden Anforderungen genügen:

- a) sie verfügt über eine einschlägige technische Berufsausbildung oder eine für die vorgesehenen Prüfungsaufgaben ausreichende technische Qualifikation,
- b) sie besitzt ausreichende Kenntnisse des zugehörigen Regelwerkes,
- c) sie verfügt über eine mindestens einjährige Erfahrung mit der Herstellung, dem Zusammenbau, dem Betrieb oder der Instandhaltung der zu prüfenden Druckanlagen oder Anlagenteile im Sinne dieses Abschnitts und
- d) sie hält ihre Kenntnisse über Druckgefährdungen durch Teilnahme an Schulungen oder Unterweisungen, insbesondere zu folgenden Themen, auf aktuellem Stand:
 - a. Konstruktions- und Herstellungsverfahren,
 - b. Ausrüstung und Absicherungskonzepte,
 - c. Montage, Installation (Aufstellung) und Betrieb beziehungsweise Verwendung, bestimmungsgemäßer Betrieb,
 - d. Gefährdungsbeurteilung,
 - e. Prüfungen, Prüffristen, Prüfverfahren einschließlich der Bewertung der Ergebnisse und

- f. in der Praxis vorkommende, relevante Einflüsse und Schadensbilder. vgl. [Betriebssicherheitsverordnung \(BetrSichV\), Abschnitt 4 \(Deutscher Bundestag 01.06.2015\)](#).

Abhängig von der Anlagencharakteristik ist die Prüfständigkeit geregelt. Die Prüfung hat entweder intern durch befähigte Personen oder extern durch beauftragte, zugelassene Überwachungsstellen (ZÜS) zu erfolgen.

7.5 Zugelassene Überwachungsstellen für überwachungsbedürftige Anlagen

Zugelassene Überwachungsstellen kommen in bestimmten Fällen an Stelle der zur Überprüfung befähigten Personen zum Einsatz. Zusätzliche Vorschriften für überwachungsbedürftige Anlagen werden in der [Betriebssicherheitsverordnung \(BetrSichV\), Abschnitt 3](#) geregelt:

„(3) Die Prüfungen nach Absatz 1 sind von einer zugelassenen Überwachungsstelle (ZÜS) nach Anhang 2 Abschnitt 1 durchzuführen. Sofern dies in Anhang 2 Abschnitt 2, 3 oder 4 vorgesehen ist, können die Prüfungen nach Satz 1 auch von einer zur Prüfung befähigten Person durchgeführt werden. Darüber hinaus können alle Prüfungen nach prüfpflichtigen Änderungen, die nicht die Bauart oder die Betriebsweise einer überwachungsbedürftigen Anlage beeinflussen, von einer zur Prüfung befähigten Person durchgeführt werden. Bei überwachungsbedürftigen Anlagen, die für einen ortsveränderlichen Einsatz vorgesehen sind und nach der ersten Inbetriebnahme an einem neuen Standort aufgestellt werden, können die Prüfungen nach Absatz 1 durch eine zur Prüfung befähigte Person durchgeführt werden. Satz 4 gilt nicht für Dampfkesselanlagen nach § 18 Absatz 1 Satz 1 Nummer 1.“

Das Gesetz über überwachungsbedürftige Anlagen ([ÜAnlG](#)) legt in § 17 Anforderungen an die mit Prüfungen von überwachungsbedürftigen Anlagen beauftragten Personen fest:

„Die zugelassene Überwachungsstelle muss gewährleisten, dass die mit Prüfungen von überwachungsbedürftigen Anlagen beauftragten Personen

1. durch ihre Berufsausbildung, ihre Berufserfahrung und ihre Weiterbildung jederzeit über die für die Prüfungen erforderlichen Kenntnisse verfügen,
2. jederzeit über ausreichende Kenntnisse der Bauart und der Betriebsweise, der Prüfverfahren sowie des Standes der Technik der zu prüfenden überwachungsbedürftigen Anlagen verfügen,
3. jederzeit über ausreichende Kenntnisse der für die jeweiligen überwachungsbedürftigen Anlagen geltenden Rechtsvorschriften und Regeln verfügen,
4. jederzeit in der Lage sind, die vorgeschriebenen Prüfdokumente über die durchgeführten Prüfungen zu erstellen,
5. jederzeit berufliche Integrität besitzen,
6. jederzeit fachlich unabhängig sind und
7. in ihre jeweiligen Aufgaben eingearbeitet wurden“ (Deutscher Bundestag 16.07.2021).

Damit gilt auch für diese Personengruppe, dass sie über eine „einschlägige technische Berufsausbildung“ verfügen soll, auf der aufbauend eine spezielle Anpassungsfortbildung erfolgt. Die bestehenden Ausbildungsordnungen decken den „Anfangs“-Bedarf ab. Die Inhalte, die im Rahmen einer möglichen Qualifizierung zu vermitteln sind, können auf Grundlage der oben genannten Anforderungen bezogen auf die konkrete Arbeitsaufgabe ausdifferenziert werden.

7.6 Zwischenbilanz

Je nach Arbeitsaufgabe, Gefährdungsart und Teilprozess geben die Rechtsgrundlagen Hinweise auf die besondere Qualifikation der Fachkräfte und titulieren jeweils deren Funktion. Qualifikationsanforderungen, bezogen auf fachliche, juristische, organisationale und persönliche Kompetenzen, werden als grobe Rahmenvorgaben benannt. Die Aufgabe und Verantwortung des jeweiligen Arbeitgebers ist es, dies auf die konkrete Situation anzuwenden und dafür zu sorgen, dass die Fachkräfte, die mit bestimmten Arbeiten betraut sind, über die notwendigen Qualifikationen verfügen. Weitere Anhaltspunkte für den Qualifikationsbedarf liefert dem Arbeitgeber die durch ihn durchzuführende Gefährdungsbeurteilung.

In den einschlägigen Ausbildungsordnungen der zugehörigen Berufe sind für diese Anpassungen und Vertiefungen die notwendigen Voraussetzungen ausreichend beinhaltet. Es gibt keine Rechtsgrundlagen, die eine Schulung, ein Zertifikat oder eine Prüfung für das Arbeiten an Wasserstoffherzeugungsanlagen verlangen.

8 Schulungs- und Weiterbildungsangebote als Indikatoren für Qualifikationsbedarfe

Schulungen und Qualifizierungsangebote für Fachkräfte, die entsprechend ihrer Funktion als fachkundige Personen, fachkundig, unterwiesene und beauftragte Personen, Sicherheitsfachkräfte, zur Prüfung befähigte Personen sowie innerhalb von zugelassenen Überwachungsstellen (ZÜS) als mit Prüfungen von überwachungsbedürftigen Anlagen beauftragte Personen eingesetzt werden sollen, sind mindestens in der Chemieindustrie erprobt. Hier wird konventionell erzeugter Wasserstoff bereits seit Jahrzehnten genutzt. Aus diesem Grund sind Schulungs- und Weiterbildungsangebote kein Indikator für sich verändernde Qualifikationsanforderungen.

9 Schlussfolgerungen zur Einschätzung der Notwendigkeit möglicher ordnungsrelevanter Qualifikationsbedarfe und

In der Chemie- und Raffinerieindustrie wird Wasserstoff seit Jahrzehnten verarbeitet. Die in Kapitel 5 skizzierten technologischen Änderungen werden große Investitions- und Entwicklungsanstrengungen erfordern, jedoch spielen sich die technologischen Änderungen im Spektrum der üblichen Arbeit an chemischen Anlagen von Fachkräften auf mittlerer Qualifikationsebene ab. Dementsprechend sind hier entsprechende Kompetenzen in den relevanten Handlungsfeldern Anlagen planen und entwickeln, Anlagen errichten, Anlagen überprüfen und in Betrieb nehmen, Anlagen betreiben, Anlagen überwachen sowie Anlage instand halten vorhanden und die bestehenden Ausbildungsberufe decken den wasserstoffbezogenen Qualifikationsbedarf hinreichend ab. Somit wird in Hinblick auf das hier erörterte Forschungsfeld kein Neuordnungsbedarf gesehen und es ist davon auszugehen, dass in dem Sektor entsprechende Qualifikationen und Qualifikationsstrategien im ausreichenden Maß vorhanden sind. Vielmehr könnte die Chemie- und Raffinerieindustrie Hinweise für die Umsetzung von wasserstoffbezogenen Qualifikationen für andere Sektoren liefern. Aus diesem Grund sind keine weiterführenden Untersuchungen für den Chemie- und Raffineriesektor vorgesehen.

10 Literaturverzeichnis

AG Energiebilanzen e.V. (2020): Anwendungsbilanzen zur Energiebilanz Deutschland - Endenergieverbrauch nach Energieträgern und Anwendungszwecken.

AGBF (2008): Wasserstoff und dessen Gefahren. Ein Leitfaden für Feuerwehren. Hg. v. Arbeitsgemeinschaft der Leiter der Berufsfeuerwehren. Online verfügbar unter https://www.fwvbw.de/fileadmin/Downloads/Einsatz_Wasserstoffleitfaden.pdf, zuletzt geprüft am 06.09.2022.

Agora Energiewende/Wuppertal Institut (2019): Klimaneutrale Industrie: Schlüsseltechnologien und Politikoptionen für Stahl, Chemie und Zement. Berlin. Online verfügbar unter https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2018/Dekarbonisierung_Industrie/164_A-EW_Klimaneutrale-Industrie_Studie_WEB.pdf, zuletzt geprüft am 27.10.2021.

Arnold, Karin; Kobiela, Georg; Pastowski, Andreas (2018): 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. Online

verfügbar unter https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/7061/file/7061_Powerto-liquids.pdf, zuletzt geprüft am 21.11.2022.

Bazzanella, Alexis; Ausfelder, Florian (2017): Low carbon energy and feedstock for the European chemical industry. Frankfurt am Main: DECHEMA, Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V (Technology study). Online verfügbar unter https://dechema.de/dechema_media/Downloads/Positionspapiere/Technology_study_Low_carbon_energy_and_feedstock_for_the_European_chemical_industry.pdf, zuletzt geprüft am 27.09.2021.

Behr, Arno; Agar, David W.; Jörissen, Jakob; Vorholt, Andreas J. (2016): Einführung in die Technische Chemie. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum (Lehrbuch). Online verfügbar unter <http://www.springer.com/>.

Berufsgenossenschaft Holz und Metall (BGHM) (Hg.) (2022): DGUV Vorschriften. Online verfügbar unter <https://www.bghm.de/arbeitschuetzer/gesetze-und-vorschriften/dguv-vorschriften/>.

BMWA (23.03.2005): Verordnung über die Berufsausbildung zur Produktionsfachkraft Chemie*). In: Bundesgesetzblatt Jahrgang 2005 Teil I Nr. 19. Online verfügbar unter https://www.bibb.de/dienst/berufesuche/de/index_berufesuche.php/regulation/produktfachkraft_chemie.pdf, zuletzt geprüft am 07.09.2022.

BMWi (10.06.2009): Verordnung über die Berufsausbildung zum Chemikanten/zur Chemikantin*). In: Bundesgesetzblatt Jahrgang 2009 Teil I Nr. 33. Online verfügbar unter https://www.bibb.de/dienst/berufesuche/de/index_berufesuche.php/regulation/Chemikant2009.pdf.

BMWi (Juni 2018): Bekanntmachung der Neufassung der Mechatroniker-Ausbildungsverordnung, vom 28.06.2018. Fundstelle: Bundesgesetzblatt Jahrgang 2018 Teil I Nr. 23. Online verfügbar unter https://www.bibb.de/dienst/berufesuche/de/index_berufesuche.php/regulation/neufassung_mechatroniker_2018.pdf.

BMWi (28.06.2018a): Bekanntmachung der Neufassung der Mechatroniker-Ausbildungsverordnung. In: Bundesgesetzblatt Jahrgang 2018 Teil I Nr. 23. Online verfügbar unter https://www.bibb.de/dienst/berufesuche/de/index_berufesuche.php/regulation/neufassung_mechatroniker_2018.pdf, zuletzt geprüft am 06.09.2022.

BMWi (28.06.2018b): Bekanntmachung der Neufassung der Verordnung über die Berufsausbildung in den industriellen Metallberufen. In: Bundesgesetzblatt Jahrgang 2018 Teil I Nr. 23. Online verfügbar unter

https://www.bibb.de/dienst/berufesuche/de/index_berufesuche.php/regulation/neufassung_metall_berufe_2018.pdf, zuletzt geprüft am 06.09.2022.

BMWi (28.06.2018c): Bekanntmachung der Neufassung der Verordnung über die Berufsausbildung in den industriellen Metallberufen. In: Bundesgesetzblatt Jahrgang 2018 Teil I Nr. 23. Online verfügbar unter

https://www.bibb.de/dienst/berufesuche/de/index_berufesuche.php/regulation/neufassung_metall_berufe_2018.pdf.

BMWi (28.02.2020): Verordnung über die Berufsausbildung zum Fachinformatiker und zur Fachinformatikerin (Fachinformatikerausbildungsverordnung – FIAusbV)*. In: Bundesgesetzblatt Jahrgang 2020 Teil I Nr. 9. Online verfügbar unter [https://www.kmk.org/themen/berufliche-schulen/duale-berufsausbildung/downloadbereich-](https://www.kmk.org/themen/berufliche-schulen/duale-berufsausbildung/downloadbereich-rahmenlehrplaene.html?type=150&tx_feddownloads_pi1%5Bdownload%5D=45009&tx_feddownloads_pi1%5Baction%5D=forceDownload&tx_feddownloads_pi1%5Bcontroller%5D=Downloads&cHash=5a9d0c89c3f5b1ae049ff2fb2ecd4b89)

[rahmenlehrplaene.html?type=150&tx_feddownloads_pi1%5Bdownload%5D=45009&tx_feddownloads_pi1%5Baction%5D=forceDownload&tx_feddownloads_pi1%5Bcontroller%5D=Downloads&cHash=5a9d0c89c3f5b1ae049ff2fb2ecd4b89](https://www.kmk.org/themen/berufliche-schulen/duale-berufsausbildung/downloadbereich-rahmenlehrplaene.html?type=150&tx_feddownloads_pi1%5Bdownload%5D=45009&tx_feddownloads_pi1%5Baction%5D=forceDownload&tx_feddownloads_pi1%5Bcontroller%5D=Downloads&cHash=5a9d0c89c3f5b1ae049ff2fb2ecd4b89).

BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz) (16.06.2008): Verordnung über die Berufsausbildung zum Produktionstechnologen/zur Produktionstechnologin*). Fundstelle: Bundesgesetzblatt Jahrgang 2008 Teil I Nr. 25.

Branchenstatistik der Kunststoffverarbeitung in Deutschland (2022): Mengen und Umsatz der Kunststoffverarbeitenden Industrie nach Sektoren 2019/2020/2021. Online verfügbar unter <https://www.gkv.de/de/statistik/>, zuletzt aktualisiert am 25.11.2022, zuletzt geprüft am 25.11.2022.

Bringezu, Stefan; Kaiser, Simon; Turnau, Sebastian (2020): Zukünftige Nutzung von CO₂ als Rohstoffbasis der deutschen Chemie- und Kunststoffindustrie. Unter Mitarbeit von Universität Kassel und Center for Environmental Systems Research (CESR). Online verfügbar unter <https://kobra.uni-kassel.de/bitstream/handle/123456789/11483/ZukuenftigeNutzungVonCO2AlsRohstoffbasis.pdf;jsessionid=E6B8258B0E6DF51125A108E30BD1B38B?sequence=4>, zuletzt geprüft am 16.09.2022.

Bundesministerium für Arbeit und Soziales (März 2018): Technische Regeln für Betriebssicherheit - Struktur und Anwendung der Technischen Regeln für Betriebssicherheit. TRBS 1001. Fundstelle: GMBI

2018 S. 398 [Nr. 22]. Online verfügbar unter <https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/TRBS/TRBS-1001.html>.

Bundesministerium für Arbeit und Soziales (März 2019): Technische Regeln für Betriebssicherheit - Zur Prüfung befähigte Personen. TRBS 1203, vom GMBI 2022 S. 16 [Nr. 1] (v. 14.01.2022). Fundstelle: GMBI 2019 S. 262 [Nr. 13–16] (v. 23.05.2019). Online verfügbar unter https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/TRBS/pdf/TRBS-1203.pdf?__blob=publicationFile&v=1.

Bundesministerium für Arbeit und Soziales (23.05.2019): Technische Regeln für Betriebssicherheit - Prüfungen und Kontrollen von Arbeitsmitteln und überwachungsbedürftigen Anlagen. TRBS 1201. Fundstelle: GMBI 2019 S. 229 [Nr. 13–16].

Bundesregierung (2021a): Mehr Fortschritt wagen - Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit. Koalitionsvertrag 2021 – 2025 zwischen der Sozialdemokratischen Partei Deutschlands (SPD), BÜNDNIS 90 / DIE GRÜNEN und den Freien Demokraten (FDP), zuletzt geprüft am 25.11.2021.

Bundesregierung, Die: Die Nationale Wasserstoffstrategie (NWS). German Federal Ministry of Economic Affairs. Online verfügbar unter https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?__blob=publicationFile&v=20.

Bundesregierung, Die (2021b): PtL-Roadmap, S. 1–29. Online verfügbar unter https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/LF/ptl-roadmap.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 23.05.2022.

Bundestag (01.12.2010): Verordnung zum Schutz vor Gefahrstoffen. Gefahrstoffverordnung - GefStoffV, vom 21.07.2021. Fundstelle: BGBl. I S. 3115. Online verfügbar unter https://www.gesetze-im-internet.de/gefstoffv_2010/GefStoffV.pdf.

Chang, Shiyang; Zhuo, Jiankun; Meng, Shuo; Qin, Shiyue; Yao, Qiang (2016): Clean Coal Technologies in China: Current Status and Future Perspectives. In: *Engineering* 2 (4), S. 447–459. DOI: 10.1016/J.ENG.2016.04.015.

CHIMIA (2010): Viehmist und Vogelkot war gestern. In: *Chimia* 64 (6), S. 428. DOI: 10.2533/chimia.2010.428.

dena (2018): dena-Leitstudie Integrierte Energiewende - Impulse für die Gestaltung des Energiesystems bis 2050 Ergebnisbericht und Handlungsempfehlungen.

Deutscher Bundestag (01.06.2015): Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Verwendung von Arbeitsmitteln. (Betriebssicherheitsverordnung - BetrSichV), vom 27.07.2021 (BGBl. I S. 3146). Fundstelle: BGBl. I S. 3146.

Deutscher Bundestag (16.07.2021): Gesetz über überwachungsbedürftige Anlagen. ÜAnlG. Fundstelle: BGBl. I S. 3146, 3162. Online verfügbar unter https://www.gesetze-im-internet.de/_anlg/BJNR316200021.html.

en2x (2022): Raffinerien und Produktion. Online verfügbar unter <https://en2x.de/positionen/raffinerien-und-produktion/>, zuletzt aktualisiert am 06.12.2022, zuletzt geprüft am 12.12.2022.

Gehrke, Birgit; Weilage, Insa (2018): Branchenanalyse Chemieindustrie. Der Chemiestandort Deutschland im Spannungsfeld globaler Verschiebungen von Nachfragestrukturen und Wertschöpfungsketten. Unter Mitarbeit von Vivien-Sophie Gulden und Kai Ingwersen. Düsseldorf: Hans-Böckler-Stiftung (Study der Hans-Böckler-Stiftung, Nr. 395), zuletzt geprüft am 03.08.2022.

Gerbert, Philipp; Herholt, Patrick; Burchardt, Jens; Schönberger, Stefan; Rechenmacher, Florian; Kirchner, Almut et al. (2018): Klimapfade für Deutschland. BDI. Online verfügbar unter <https://bdi.eu/publikation/news/klimapfade-fuer-deutschland/>, zuletzt geprüft am 24.01.2023.

Gochermann, Josef (2016): Energiewende in der Industrie. In: Josef Gochermann (Hg.): Expedition Energiewende. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 115–145. Online verfügbar unter https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiewende-in-der-industrie-ap2a-branchensteckbrief-chemie.pdf?__blob=publicationFile&v=4, zuletzt geprüft am 03.08.2022.

Grimm, Veronika; Janser, Markus; Stops, Michael (2021): Kompetenzen für die Wasserstofftechnologie sind schon jetzt gefragt. IAB-Kurzbericht 11/2021. Nürnberg. Online verfügbar unter <https://doku.iab.de/kurzber/2021/kb2021-11.pdf>, zuletzt geprüft am 20.09.2022.

Hebling, Christopher; Ragwitz, Mario; Fleiter, Tobias; Groos, Ulf; Härle, Dominik; Held, Anne et al. (2019): Eine Wasserstoff-Roadmap für Deutschland. In: *Fraunhofer Institut für System-und Innovationsforschung ISI*, zuletzt geprüft am 11.05.2021.

Jens Hobohm; Alex Auf der Maur; Hans Dambeck; Andreas Kemmler, Sylvie Koziel, Sven Kreidelmeyer, Aleander Piégsa, Paul Wendring, Benedikt Meyer; Andreas Apfelbahcer; Martin Dotzauer; Konstantin Zech (2018): Status und Perspektiven flüssiger Energieträger in der Energiewende. Eine Studie der Prognos AG, des Fraunhofer-Instituts für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT und des Deutschen Biomasseforschungszentrums DBFZ.

Kasten, Peter (2019): Stakeholder-Positionen-e-fuels. Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Stakeholder-Positionen-e-fuels.pdf>, zuletzt geprüft am 23.05.2022.

Kretschmer, Ansgar (2021): Wasserstoffbedarf der Chemieindustrie. In: *CHEMIE TECHNIK*, 26.04.2021. Online verfügbar unter <https://www.chemietechnik.de/energie-utilities/wasserstoff-einfacher-gehts-nicht-225.html>, zuletzt geprüft am 24.11.2022.

Krichewsky-Wegener, Lena; Abel, Sebastian; Bovenschulte, Marc (2020): Skills Development for Hydrogen Economies – Damit aus einer Wasserstoffstrategie eine Wasserstoff-(weiter)bildungsstrategie wird. Working Paper of the Institute for Innovation and Technology. Berlin (55). Online verfügbar unter https://www.iit-berlin.de/wp-content/uploads/2021/01/2020_11_iit-perspektive_Hydrogen-Economies.pdf, zuletzt geprüft am 25.01.2022.

Lösch, Oliver; Gollmer, Christian; Jochem, Eberhard; Reitze, Felix; Schön, Michaela, Toro Chacón, Felipe Andrés (2018): Arbeitspapier 3 – Minderung der industriellen Treibhausgasemissionen Deutschlands durch materialbezogene Handlungsansätze in ausgewählten Branchen – ein Problemaufriss, zuletzt geprüft am 16.09.2022.

MKS Wissenschaftliche Begleitforschung: Biokerosin und EE-Kerosin für die Luftfahrt der Zukunft - von der Theorie zu Pilotvorhaben. Online verfügbar unter <http://www.lerchenberg-info.de/tipps/studie-biokerosin-ee-kerosin.pdf>, zuletzt geprüft am 18.11.2022.

Nationale Plattform Zukunft der Mobilität: Energiewirtschaftliche Auswirkungen der Sektorkopplung – Energiebedarfe. Hg. v. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. acatech.

Nationale Plattform Zukunft der Mobilität: WERKSTATTBERICHT ALTERNATIVE KRAFTSTOFFE KLIMAWIRKUNGEN UND WEGE ZUM EINSATZ ALTERNATIVER KRAFTSTOFFE. ARBEITSGRUPPE 1 KLIMASCHUTZ IM VERKEHR.

Purr, Katja; Günther, Jens; Lehmann, Harry; Nuss, Philip (2019): Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität – RESCUE: Langfassung. In: *Umweltbundesamt*.

Quitow, Rainer; Jahn, Joschka; Marian, Adela; Blind, Knut; Cremonese, Lorenzo; Mbungu, Grace et al. (2022): Monitoring der globalen Wasserstoffwirtschaft. Konzeptentwurf und Datenquellen. In: *IASS Discussion Paper*. Online verfügbar unter https://publications.iass-potsdam.de/rest/items/item_6001525_1/component/file_6001526/content, zuletzt geprüft am 02.02.2022.

Schiller, Georg; Wietzel, Gustav (1933): US2083795A Production of hydrogen am 17.04.1933. Veröffentlichungsnr: US2083795A.

Schmidt, Patrick; Weindorf, Werner, Roth, Arne; Batteiger, Valentin; Riegel Florian (2016): Power-to-Liquids: Potentials and Perspectives. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/377/publikationen/161005_uba_hintgrund_ptl_barrierefrei.pdf, zuletzt geprüft am 26.11.2022.

Spöttl, Georg (2005): Sektoranalysen. In: Felix Rauner (Hg.): *Handbuch Berufsbildungsforschung*. Bielefeld, S. 112–118.

Spöttl, Georg; Windelband, Lars (2006): Berufswissenschaftlicher Ansatz zur Früherkennung von Qualifikationsbedarf 39 (3), S. 72–91.

Statistisches Bundesamt Deutschland (2022a): GENESIS-Online: Ergebnis 42131-0003. Online verfügbar unter <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online>, zuletzt aktualisiert am 13.12.2022, zuletzt geprüft am 13.12.2022.

Statistisches Bundesamt Deutschland (2022b): GENESIS-Online: Ergebnis 42251-0001. Online verfügbar unter <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online>, zuletzt aktualisiert am 13.12.2022, zuletzt geprüft am 13.12.2022.

Statistisches Bundesamt Deutschland (2022c): GENESIS-Online: Ergebnis 85111-0001. Online verfügbar unter <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online>, zuletzt aktualisiert am 13.12.2022, zuletzt geprüft am 13.12.2022.

Steeg, St; Helmrich, R.; Maier, T.; Schroer, Ph.; Mönning, A.; Wolter, M. et al. (2022): Die Wasserstoffwirtschaft in Deutschland: Folgen für Arbeitsmarkt und Bildungssystem. Eine erste

Bestandsaufnahme. Hg. v. Bundesinstitut für Berufsbildung (BIBB). Bonn. Online verfügbar unter <https://lit.bibb.de/vufind/Record/DS-779809>, zuletzt geprüft am 25.01.2022.

Stephan, Dominik (2021): Small in Japan: So geht die Ammoniaksynthese im kleinen Maßstab. In: *PROCESS*, 08.11.2021. Online verfügbar unter <https://www.process.vogel.de/small-in-japan-so-geht-die-ammoniaksynthese-im-kleinen-masstab-a-1072861/>, zuletzt geprüft am 13.12.2022.

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

VCI (2021): Chemiewirtschaft In Zahlen. In: *Nachr. Chem. Tech.* 8 (19-20), S. 296. DOI: 10.1002/nadc.19600081904.

Wagemann, Kurt; Ausfelder, Florian (2017): E-Fuels - mehr als eine Option. Frankfurt am Main: DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V (White paper, 2017). Online verfügbar unter https://dechema.de/dechema_media/Downloads/Positionspapiere/WhitePaper_E_Fuels-p-20002780.pdf, zuletzt geprüft am 12.05.2022.

Wehl, Christina von der (2022): VCI -POSITION KOMPAKT Wasserstoffstrategie. Verband der Chemischen Industrie e.V., zuletzt geprüft am 21.06.2022.

Windsperger, Andreas; Schick, Michael; Windsprenger, Bernhard (2018): Perspektiven der Decarbonisierung für die chemische Industrie in Österreich. Online verfügbar unter https://www.fcio.at/media/11061/decharb_ber_bericht-fcio_end_end.pdf, zuletzt geprüft am 27.09.2021.

Winkler, Christine (2016): Basischemie 2030 - Aktualisierte Analyse zur Zukunft der Basischemie, zuletzt geprüft am 12.07.2022.

Zelt, Ole (2021): Multikriterielle Bewertung von Bereitstellungstechnologien synthetischer Kraftstoffe. Online verfügbar unter https://wupperinst.org/fa/redaktion/downloads/projects/MENA-Fuels_Teilbericht3_D2-1_Technologiebewertung.pdf, zuletzt geprüft am 03.12.2021.

Zinke, Gert (2022): Sektoranalyse: Erzeugung, Speicherung und Transport von Wasserstoff. Eine Untersuchung im Rahmen des Projektes "H2Pro: Wasserstoff - ein Zukunftsthema der beruflichen Bildung im Kontext der Energiewende". Hg. v. Bundesinstitut für Berufsbildung (BIBB) (BIBB Discussion

Paper). Online verfügbar unter https://datapool-bibb.bibb.de/pdfs/Zinke_Sektoranalyse_Wasserstoff.pdf, zuletzt geprüft am 24.01.2023.