

🔗 www.h2-dvgw.de

H₂-Umstellmanagement für Gasverteilnetze

Abschlussbericht

**Jens Hüttenrauch, Josephine Glandien, Maik Hoffmann, Christopher Knorr,
Philipp Pietsch, Jonas Sperlich**
DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH

Dr. Frank Burmeister, Nils Janßen
GWI Gas- und Wärme-Institut Essen e.V.

Wolfgang Köppel, Amin Khayatzadeh
DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut des KIT



H₂-Umstellmanagement für Gasverteilnetze

Abschlussbericht

August 2025

DVGW-Förderkennzeichen G 202312

Danksagung

Die Verfasser bedanken sich an dieser Stelle für die Projektförderung durch den DVGW im Rahmen des Innovationsprogramms Wasserstoff, Teilbereich: H₂-Infrastruktur, sowie bei allen weiteren Projektpartnern, die bei der Durchführung dieses Vorhabens Unterstützung geleistet haben.

Hierzu zählen die Unternehmensvertreter sowie Kolleginnen und Kollegen, die sich am Projekt aktiv beteiligt und Erfahrungen eingebracht haben und für inhaltliche Abstimmungen zur Verfügung standen.

Besonderer Dank gilt auch den Mitgliedern der Projektbegleitgruppe, die das Forschungsvorhaben während der gesamten Laufzeit engagiert begleitet und konstruktiv unterstützt haben.

Mitglieder der Projektbegleitgruppe waren:

- Badowsky, Denise; DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V.,
- Brandes, Angela; Avacon AG
- Ellert, Florian; Bayernwerk Netz GmbH
- Ewering, Dietmar; Westnetz GmbH
- Götze, Thomas; EWE NETZ GmbH
- Hott, Rainer; Energienetze Bayern GmbH & Co. KG
- Kalhammer, Philipp; schwaben netz gmbh
- Klement, Jürgen; Ingenieurbüro für Versorgungssicherheit
- König, Markus; Netze BW GmbH
- Lotze, Torsten; Avacon Netz AG
- Meixner, Verena; Netze BW GmbH
- Rommelfanger, Janosch; DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V.,
- Schuhmann, Kai-Uwe; DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V.,
- Stabenau, Carsten; Westnetz GmbH
- Stange, Holger; DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V.,
- Wagenpfeil, Christian; schwaben netz gmbh
- Wörner, Philipp; Bosch Thermotechnik GmbH
- Zigelli, Niklas, Thüga Aktiengesellschaft

Zusammenfassung

Die grundsätzliche Eignung der bestehenden Gasinfrastruktur für Wasserstoff wurde und wird in mehreren Projekten untersucht. Während der Fokus bisher vorwiegend auf Potenzialbetrachtungen und der materialseitigen und funktionellen Eignung (u.a. in den H₂-Kompendien) lag, treten zunehmend konkrete Fragen zur eigentlichen Planung und Umsetzung der Umstellung von Netzen und Anlagen auf Wasserstoff auf.

Ziel des Projekts „H₂Umstell“ ist die Entwicklung von effizienten und übergreifenden Umstellprozessen auf 100 % Wasserstoff in den Bereichen Gasverteilnetze, Hausinstallation und Gasanwendung. Dazu werden die Prozesse und Herausforderungen in den einzelnen, genannten Bereichen detailliert betrachtet, sowie die Erkenntnisse zu einem schlüssigen Gesamtprozess für die Umstellung von Erdgasnetzen auf Wasserstoff zusammengeführt. Des Weiteren werden die Themen Wasserstoffreinheit und Fachkräftebedarf im Kontext der Umstellung beleuchtet.

Die Herangehensweise zur Umstellung von Gasnetzen (inkl. Gasinstallation und -anwendung) auf Wasserstoff weist, aufgrund der inhaltlichen und zeitlichen Abhängigkeiten zwischen den Bereichen, eine gewisse Komplexität auf. Darüber hinaus sind zur Bewältigung des organisatorischen und technischen Aufwands, u.a. aufgrund der notwendigen Kleinteiligkeit der sträßenzugsweisen Umstellung hinsichtlich Detailplanung und Umsetzung, entsprechende Personalkapazitäten einzuplanen und bei Bedarf aufzubauen.

Die für die Umstellung erforderlichen Regelwerke sind im Wesentlichen bereits vorhanden, so dass eine Umstellung auf Wasserstoff grundsätzlich regelwerkskonform erfolgen kann. An verschiedenen Stellen sind jedoch Anpassungen sinnvoll, sowohl zur Optimierung des Prozesses als auch hinsichtlich z.B. umstellungsspezifischer Begrifflichkeiten und Definitionen.

Die Optimierungspotenziale betreffen unter anderem die vorbereitenden Analysen, insbesondere der Netzanalyse. Hier könnte zukünftig im Bereich der Verteilnetze kleiner gleich 5 bar die erforderliche Dokumentation verschlankt bzw. deren Prüfung reduziert werden. Eine detaillierte Bewertung der Wasserstofftauglichkeit der meisten Komponenten/Produkte ist in diesem Bereich nach aktuellem Wissensstand nicht erforderlich, da keine „Showstopper“ bezogen auf das reine Verteilnetz bekannt sind. Ein weiterer Punkt zur Optimierung und Beschleunigung der eigentlichen Umstellung betrifft die Notwendigkeit der indirekten Spülung (Erdgas – Stickstoff – Wasserstoff) von Leitungsabschnitten und Gasinstallation im Gegensatz zur direkten Spülung mit Wasserstoff. Letzteres führt zu einer Reduzierung des Aufwands für die Umstellung, muss jedoch, vor allem im Kontext der Sicherheit, für den Gesamtprozess der Umstellung von Leitungsabschnitten und Gasinstallation bewertet werden.

Die offenen Forschungsfragen und Optimierungspotenziale sowie der Umstellprozess an sich sollten im Rahmen von möglichst realitätsnahen Demonstrations- oder Pilotprojekten zur Umstellung von (Teil-)Netzen auf Wasserstoff untersucht werden.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Umstellung Gasverteilnetze	2
2.1	Vorbereitende Analysen und Umstellungskonzeption	2
2.1.1	Einspeiseanalyse	3
2.1.2	Kundenanalyse	3
2.1.3	Kapazitätsanalyse.....	4
2.1.4	Netzanalyse	4
2.1.5	Analyse der Wasserstofftauglichkeit von Gasnetzen und -anlagen	6
2.1.6	H ₂ -Zielnetzplanung und strömungstechnische Analyse der Netzsektionen	11
2.2	Umstellungskonzeption	13
2.3	Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen.....	15
2.3.1	Eignung und Anpassung der Komponenten im Verteilnetz.....	15
2.3.2	Vorbereitung von Ersatzgasversorgungsstandorten für die Umstellung von Erdgas auf Wasserstoff.....	20
2.4	Anzeigeverfahren bei der zuständigen Behörde.....	20
2.5	Durchführung der Netzumstellung.....	24
2.5.1	Hintergrund und Begriffsbestimmungen	24
2.5.2	Umstellung der Leitungen mit indirekter Spülung: Erdgas – Stickstoff – Wasserstoff.....	28
2.5.3	Umstellung der Leitungen mit direkter Spülung: Erdgas - Wasserstoff	32
2.5.4	Spülgeschwindigkeiten.....	35
2.5.5	Ausblasen und Abfackeln von Gas während der Umstellung	37
2.5.6	Umstellung der Leitungen des vorgelagerten Hochdruck-Verteilnetzes.....	38
2.5.7	Umstellung der Gasdruckregelanlagen	38
3	Umstellung Gashausinstallation und industrielle Leitungen	40
3.1	Aufbau der Wasserstoffinfrastruktur am GWI	40
3.2	Versuchskonzeptionierung und Durchführung.....	51
3.3	Erarbeitung eines Umstellprozess für die Hausinstallation	57
3.3.1	Referenzprojekte und technisches Regelwerk	57
3.3.2	Komponenten in der Installation (Auszüge aus G 655 (M):2025 + Ergänzungen)	60
3.4	Bewertung des aktiven und passiven Sicherheitskonzeptes	62
3.5	Umstellung von Werksnetzen nach DVGW-Arbeitsblatt G 614-1	62
3.6	Umstellung von industriellen Gasanwendungen, wie z. B. Thermoprozess-Anlagen	64
4	Umstellung häusliche/gewerbliche und industrielle Gasanwendungen	66
4.1	Versuchsreihen am GWI	66
4.2	Stand der Gasgerätetechnik	77
4.3	Wasserstofffähige Gasgeräte.....	79
4.4	Pilotprojekte Gasgeräte mit 100 % H ₂	81
4.5	Workshop mit Geräteherstellern.....	81
4.6	Umstellung von industriellen Gasanwendungen.....	82
5	Gesamtprozess der Umstellung.....	83

5.1	Workshop mit Gasnetzbetreibern	83
5.1.1	Vorgestellte Referenzprojekte	83
5.1.2	Kernaussagen des Workshops mit den Gasnetzbetreibern	87
5.2	Möglicher Umstellprozess auf 100 % Wasserstoff	89
5.2.1	Handlungsempfehlung für einen möglichen zur Umstellung auf Wasserstoff ...	89
5.2.2	Schulungskonzepte	91
5.2.3	Technisch zu klärende Punkte	93
5.3	Prozessablaufdiagramme zum Umstellprozess	94
6	H ₂ -Reinheit bzw. Verunreinigungen	99
6.1	Qualitätsanforderungen an Wasserstoff in Gasnetzen	99
6.2	Verunreinigungen im Netz	99
6.3	Maßnahmen zur Reinigung	101
6.3.1	Entfernung von Verunreinigungen aus dem Netz	101
6.3.2	Reinigungsmaßnahmen bei Wasserstoffnetzen	101
6.3.3	Reinigen von Rohrleitungen und Möglichkeiten zur Wiederherstellung der geforderten H ₂ -Reinheit	101
6.4	Fazit	102
7	Fachkräftebedarf und zeitliche Anforderungen	103
7.1	Fachkräfte in der Wasserstoffwertschöpfungskette	104
7.1.1	Infrastruktur und Gesamtsystemintegration	105
7.1.2	Anwendung und Nutzung	106
7.2	Fachkräfte in der Wasserstoffwirtschaft: Aktueller Bestand, Zukünftiger Bedarf und Wirtschaftliche Effekte	107
7.2.1	Umstellung des Fernleitungsnetzes von Erdgas auf Wasserstoff	109
7.2.2	Umstellung des Verteilnetzes von Erdgas auf Wasserstoff	111
7.2.3	Fachkräfteeinschätzung für den Umbau/Austausch von Geräten bei der Umstellung von Erdgas auf Wasserstoff im Haushalt	112
7.3	Auswirkungen der Massenproduktion von Umrechnungsgeräten wie Wasserstoffzählern und Kesseln auf den Fachkräftemangel	118
7.4	Schulungs- und Weiterbildungsmöglichkeiten, um den Bedarf an Fach- kräften im Bereich Wasserstoff zu decken	118
7.4.1	Wasserstofftechnologien im akademischen Bildungskontext	118
7.4.2	Wasserstofftechnologien im außerakademischen Bildungskontext	119
7.4.3	Qualifizierungsanforderungen aus Sicht der Experten	119
7.4.4	Allgemeine Empfehlungen an Bildungseinrichtungen (Hochschulen, Schulen und Weiterbildungseinrichtungen)	120
7.5	Lösungsansätze für den Fachkräftemangel in der grünen Wasserstoffwirt- schaft und bei der Umstellung von Erdgas auf Wasserstoff	121
7.6	Fazit	123
8	Handlungsempfehlungen	125
8.1	Optimierungspotenziale im Umstellprozess	125
8.2	Empfehlungen für Netzbetreiber	128
8.3	Empfehlungen für den DVGW	128
8.4	Empfehlungen für die Politik	129
9	Schlussfolgerungen und Ausblick	130

10	Literatur	131
11	Abbildungsverzeichnis	136
12	Tabellenverzeichnis	138
	Anhang	139

1 Einleitung

Die grundsätzliche Eignung der bestehenden Gasinfrastruktur für Wasserstoff wurde und wird in mehreren Projekten untersucht. Während der Fokus bisher vorwiegend auf Potenzialbetrachtungen und der materialseitigen und funktionellen Eignung (u.a. in den H2-Kompendien) lag, treten zunehmend, sowohl in Industrie- als auch Forschungsprojekten, konkrete Fragen zur eigentlichen Planung und Umsetzung der Umstellung von Netzen und Anlagen auf Wasserstoff auf. Erste Betrachtungen zum Prozess der Umstellung eines Gasverteilnetzes von Erdgas auf Wasserstoff im Rahmen des DVGW-Projekts „Roadmap Gas 2050“ (G 201824) zeigten, dass noch nicht alle Fragen zum konkreten Ablauf der Umstellung beantwortet werden konnten.

Daher wurde dieses Projekt „H2Umstell“ entwickelt, um die Entwicklung von effizienten und übergreifenden Umstellprozessen auf 100 % Wasserstoff in den Bereichen Gasverteilnetze, Hausinstallation und Gasanwendung voranzutreiben. Der Schwerpunkt des Projekts liegt dabei sowohl auf der Betrachtung der Prozesse und Herausforderungen in den einzelnen, genannten Bereichen, als auch in der Zusammenführung der Erkenntnisse in einen schlüssigen Gesamtprozess für die Umstellung auf Wasserstoff (Abbildung 1.1). Die parallel stattfindende Weiterentwicklung von DVGW-Regelwerk und dem Gasnetzgebietstransformationsplan (GTP) sowie verschiedene Forschungsprojekte wurden dabei berücksichtigt. Darüber hinaus werden auch die Themen Wasserstoffreinheit und Fachkräftebedarf adressiert.

Der Fokus des Projekts liegt auf der Umstellung von Bestandsgasnetzen auf Wasserstoff. Die Beimischung von Wasserstoff sowie der sich an die Umstellung anschließende Betrieb der Netze und Anlagen mit Wasserstoff werden nicht explizit betrachtet und sind Gegenstand von teilweise parallellaufenden Forschungsprojekten.

AP 0 Koordination, Dokumentation und Kommunikation

AP 1 Gasverteilnetze

AP 2 Gashausinstallation und industrielle Leitungen

AP 3 Gasanwendungen

AP 4 Gesamtprozess der Umstellung: Vorbereitung, Nachbereitung, Umstellung

Abbildung 1.1: H2Umstell-Projektstruktur

Im Ergebnis liegt dann eine detaillierte Beschreibung der relevanten Phasen des Umstellprozesses (Gasverteilnetz, Hausinstallation und Gasanwendung) von Erdgas auf Wasserstoff vor. Damit unterstützen wir Netzbetreiber und Monteure / Installateure bei der Konzeptionierung und Umsetzung der Umstellung von Gasverteilnetzen auf Wasserstoff, unter Berücksichtigung von Netzen und Anlagen bis hin zu Gasanwendungen, sowie die Anpassung des DVGW-Regelwerks.

Durch die Ergebnisse dieses Projekts wird der Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur standardisiert, beschleunigt und effizient, was einen wichtigen Beitrag zur Erreichung der Klimaziele seitens der Gasbranche leistet.

2 Umstellung Gasverteilnetze

Die Umstellung der Gasnetze beinhaltet verschiedene vorbereitende Analysen (Kapitel 2.1), die Planung und Umsetzung von bedarfsgerechten, netzseitigen Anpassungsmaßnahmen (Kapitel 2.2 und 2.3), die Anzeige der Umstellung bei der zuständigen Behörde (Kapitel 2.4) und schließlich die Durchführung der Umstellung selbst (Kapitel 2.5). Bei allen Analysen, Planungen und Umsetzungen sollte neben dem Netz immer auch die Kundenseite (Kapitel 3 und 4) berücksichtigt werden.

2.1 Vorbereitende Analysen und Umstellungskonzeption

In Vorbereitung auf die technische Umsetzung einer teilnetzspezifischen Umstellung von Erdgas auf Wasserstoff sollten Verteilnetzbetreiber in Anlehnung an das DVGW-Merkblatt G 2100 (Leitfaden Gasnetzgebietstransformationsplan (kurz: GTP)) die folgenden vier Analysebereiche (vgl. Abbildung 2.1) durchlaufen und erarbeiten:

- Einspeiseanalyse
- Kapazitätsanalyse
- Kundenanalyse
- Netzanalyse

Die Ergebnisse dieser vier Analysebereiche fließen in die Umstellungskonzeption für das betreffende Netzgebiet ein, in welcher der Transformationsplan des Verteilnetzgebiets erarbeitet wird. Da sich die Analysebereiche (zum Teil untereinander) und die Umstellungskonzeption wechselseitig beeinflussen muss von einem iterativ ablaufenden Prozess ausgegangen werden.



Abbildung 2.1: Transformationsplan zur Umstellung eines Netzgebiets auf H₂ in Anlehnung an den Leitfaden zum Gasnetzgebietstransformationsplan (GTP) der DVGW-Initiative „H₂vorOrt“ [1]

Nachfolgend werden die zu erarbeitenden Inhalte der vier Analysebereiche übersichtlich vorgestellt. Für detaillierte Informationen wird auf das DVGW-Merkblatt G 2100 als Leitfaden für die GTP-Erstellung verwiesen. Der GTP stellt das zentrale und standardisierte Planungsinstrument für die Dekarbonisierung der Gasverteilnetze dar.

2.1.1 Einspeiseanalyse

Im Rahmen der Einspeiseanalyse wird zum einen Art und Ort (Zuordnung zu einer Umstellzone) von (gesicherten) dezentralen Einspeisungen klimaneutraler Gase in das bestehende Gasnetz betrachtet. Bei Insellösungen sollte dabei immer auch die Notwendigkeit einer saisonalen Zwischenspeicherung berücksichtigt werden, um ganzjährig die Versorgungssicherheit gewährleisten zu können. Des Weiteren sollten auch künftige Einspeisepotenziale von klimaneutralen Gasen im Netzgebiet berücksichtigt werden, z.B. unter Berücksichtigung von Einspeisebegehren oder Potenzialanalysen. Die sich daraus ergebenden Einspeisekapazitäten einschließlich des Einspeisebeginns lassen sich einzelnen Umstellphasen einer Umstellzone zuordnen und fließen in die strömungstechnische Analyse (→ Netzanalyse) sowie die → Kapazitätsanalyse ein.

2.1.2 Kundenanalyse

Gegenstand der Kundenanalyse besteht in der Untersuchung, ob und wann eine Umstellung auf Wasserstoff kundenseitig möglich ist. Dabei wird zunächst die Art und Struktur der im Netzgebiet angeschlossenen Gaskunden ermittelt. Des Weiteren sind aktuelle Gasbedarfe sowie künftige Wasserstoffbedarfe zu erfassen. Diese Vorgehensweise wird sinngemäß in dem sich zurzeit in Erarbeitung befindlichen DVGW-Merkblatt G 294 beschrieben sein.

- Ermittlung des Gas- und Wasserstoffbedarfs von sogenannten „Ankerkunden“, u.a. Industrie, Gewerbe, Kraftwerke (Kunden mit registrierender Leistungsmessung (RLM))
- Ermittlung des Gas- und Wasserstoffbedarfs von privaten Haushalten und Kleingewerbe unter Berücksichtigung der kommunalen Wärmeplanung (Standardlastprofil-Kunden (SLP))
- Ermittlung der Anschlussleistung und ggf. des Jahresgasbedarfs je Kunde
- Im Zuge der Bedarfsermittlungen sind auch Stilllegungen von Hausanschlüssen als mögliche Option zu berücksichtigen.

Die erwarteten zukünftigen Lastwerte fließen in die H₂-Zielnetzplanung und die strömungstechnische Analyse der umzustellenden Netzsektionen sowie in aggregierter Form in die Kapazitätsanalyse ein.

Neben der Ermittlung der zeitlichen Bedarfsmengen an Gas und Wasserstoff müssen die bestehenden Gasanwendungen bei den Kunden erfasst werden, insbesondere in Bezug auf die Wasserstofftauglichkeit (vgl. DVGW G 655, DVGW G 680). Hier ist zwischen Industrie und Haushaltskunden zu unterscheiden. Während die Gasanwendungen der Industrie eine individuelle Erfassung und Bewertung der Wasserstofftauglichkeit erfordern, soll die Bewertung der Wasserstofftauglichkeit von Gasgeräten der Haushaltskunden zukünftig mittels DVGW-Gasgerätedatenbank möglich sein (siehe „Umstellung Gasanwendungen“ in Kapitel 4). Auf Basis der Gasgeräteerhebung lassen sich notwendige Anpassungen oder Umrüstungen sowie Austauschbedarfe zur Herstellung von 100 % H₂-Readiness identifizieren (Voraussetzung für kundenseitige Umstellung auf Wasserstoff). Zudem sollte der Zeitaufwand für die Umstellung je Kunde in Abhängigkeit des Gasgerätes sowie des Hausanschlusses (siehe „Umstellung Gasanwendungen“ in Kapitel 4 und „Umstellung Hausanschluss“ in Kapitel 3) abgeschätzt werden.

Im Ergebnis der Kundenanalyse wird ersichtlich, inwiefern eine Umstellung auf Wasserstoff kundenseitig notwendig sowie möglich ist und welche Kunden sich gesichert, gänzlich aus dem Gasnetz zurückziehen werden. Hier ergibt sich als iterativer Prozess eine Schnittstelle zur kommunalen Wärmeplanung, in der die zukünftige Versorgungsstruktur einer Kommune räumlich aufgelöst beschrieben wird. Zudem lassen sich daraus H₂-Versorgungs- und Umsstellungsprioritäten ableiten, was in der Umstellkonzeption Berücksichtigung findet (vgl. Kapitel 2.2).

2.1.3 Kapazitätsanalyse

Im Rahmen der Kapazitätsanalyse soll auch eine erste Ermittlung bzw. Festlegung der Umstellzonen erfolgen. Das Vorgehen dafür, sowie für die dazu gehörende detaillierte ➔Umstellungskonzeption ist in Kapitel 2.2 beschrieben. Für alle Umstellzonen wird die benötigte Kapazität (notwendige Arbeit (kWh/a) und maximale Leistung (kW)) an den Netzkopplungspunkten (NKP) zu vorgelagerten Netzbetreibern ermittelt (Bottom-Up-Bewertung). Dabei fallen Kapazitätswerte sowohl für Erdgas als auch Wasserstoff an. Da sich durch das sukzessive Umstellen von Netzsektionen von Erdgas auf Wasserstoff die Kapazitätswerte an den NKP fortlaufend ändern, müssen diese Werte für jede Umstellphase einer Zone inklusive des zugehörigen Umstellzeitraumes angegeben werden. Voraussetzung hierfür besteht in der netzbetreiberübergreifenden Zusammenarbeit mit dem vorgelagerten Netzbetreiber, um die Wasserstoffverfügbarkeit an den NKP in Bezug auf Zeitpunkt sowie Kapazitäts- und Mengengrößenordnung abzustimmen (Top-Down-Validierung).

Die Kapazitätswerte setzen sich aus den in der Einspeiseanalyse ermittelten aggregierten Leistungen der Netzkunden (RLM und SLP-Kunden) und den auf gleiche Weise ermittelten Kapazitätswerten nachgelagerter Netzbetreiber an den entsprechenden NKP zusammen. Durch Einspeisevorhaben kann sich die benötigte Kapazität an NKP zu vorgelagerten Netzbetreibern gegebenenfalls verringern. Weiterhin können die Ergebnisse aus der strömungstechnischen Analyse (➔Netzanalyse) sowie Neubaumaßnahmen (➔Umstellungskonzeption) die Kapazitätswerte beeinflussen.

2.1.4 Netzanalyse

Die technische Netzanalyse umfasst die Prüfung und Bewertung der H₂-Readiness der bestehenden Rohrleitungsmaterialien, Netzkomponenten und gastechnischen Anlagen sowie eine netzhydraulische Analyse als Teil einer Zielnetzplanung.

Das DVGW-Regelwerk in Form der Merkblätter G 221, G 407, G 408 und G 409 gibt eine orientierende Hilfestellung für die vorbereitenden technischen Maßnahmen, welche für die Umstellung von bestehenden Erdgasnetzen auf Wasserstoff zu treffen sind. Neben der Aufnahme des Ist-Zustandes des umzustellenden Netzabschnittes muss der Soll-Zustand unter künftigem Wasserstoffbetrieb definiert werden. Der Ist-Zustand unter Erdgas beinhaltet aktuelle Auslegungs- bzw. Leistungsdaten, betriebliche Erfahrungen und Zustände. Der Soll-Zustand unter Wasserstoff umfasst Angaben zu Auslegungsdrücken, maximal und minimal zulässigen Betriebsdrücken, zulässigen Bereichen der Durchflüsse bzw. Leistungen, der Gasbeschaffenheit und der Gas- und Außentemperatur sowie Vorgaben zur Druckabsicherung des H₂-Netzes inklusive der Einstellung der Sicherheitsabsperreinrichtungen für Wasserstoff.

Im Rahmen des Vergleiches von Soll- und Ist-Zustand muss in erster Linie die Wasserstofftauglichkeit (H₂-Readiness, ➔Analyse der Wasserstofftauglichkeit von Gasnetzen und -anlagen) der umzustellenden Gasnetzabschnitte und Anlagen für die Durchleitung von

Wasserstoff geprüft, bewertet und nachgewiesen werden. Von entscheidender Rolle sind dabei die Beständigkeit der verbauten Werkstoffe von Komponenten, Baugruppen und Geräte sowie deren Funktion gegenüber Wasserstoff. Ebenso muss die Dichtheit von Rohrleitungen, Armaturen und Verbindungselementen gewährleistet sein. Diese Analyse gilt als Voraussetzung für die Identifikation von potenziellen Schwachstellen und gegebenenfalls erforderlicher Ertüchtigungsmaßnahmen zur Herstellung der H₂-Readiness.

Ergänzend dazu ermöglicht die netzhydraulische Analyse als Teil einer Zielnetzplanung die Bewertung der strömungstechnischen Auswirkungen bei der Umstellung auf Wasserstoff für das Gesamtnetz sowie für die schrittweise umzustellenden Netzsektionen (siehe auch Kapitel 2.2, ➔ Umstellungskonzeption). Daraus lassen sich konkrete Maßnahmen zur Sicherstellung der benötigten Kapazitäten und der Gewährleistung der Gas- bzw. Wasserstoffversorgung vor, während und nach dem Umstellprozess ableiten.

Bei der Umstellung von Erdgas (2. Gasfamilie) auf Wasserstoff (5. Gasfamilie) handelt es sich gemäß DVGW-Regelwerk (vgl. G 221 / G 407 / G 408 / G 409) um eine wesentliche (technische) Änderung¹, welche gemäß Energiewirtschaftsgesetz §113c Abs. 3 EnWG einer allgemeinen genehmigungsrechtlichen Vorgehensweise unterliegt (unabhängig von der Druckstufe²). Gemäß §113c Abs. 3 EnWG, ist der Verteilnetzbetreiber verpflichtet, das Umstellvorhaben mindestens acht Wochen vor dem geplanten Beginn der Umstellung unter Beifügung aller für die Beurteilung der Sicherheit erforderlichen Unterlagen anzuzeigen und zu beschreiben. Der Anzeige ist die gutachterliche Äußerung eines Sachverständigen beizufügen, aus der hervorgeht, dass die Wasserstofftauglichkeit und somit die technische Sicherheit an den Betrieb unter Wasserstoff gegeben ist (Anforderungen entsprechend § 49 Abs. 1 EnWG). Die Ergebnisse der Netzanalyse dienen demnach als Grundlage für die gutachterliche Stellungnahme des Sachverständigen, welche wiederum die Grundlage für die Anzeige des Umstellvorhabens bei den zuständigen Ämtern darstellt. Für nähere Informationen zum Anzeigeverfahren ist auf Kapitel 2.4 verwiesen.

Die §§ 28p und 28q EnWG regeln Pflichten für Verteilernetzbetreiber bei der Planung zur Umstellung auf Wasserstoff:

§ 28p EnWG verpflichtet Verteilernetzbetreiber, die ihr Gasverteilnetz ganz oder teilweise auf Wasserstoff umstellen wollen, Unterlagen zur **Prüfung der Bedarfsgerechtigkeit** bei der Bundesnetzagentur einzureichen. Bei Wasserstoffnetzinfrastruktur gilt in der Regel, dass ein Bedarf besteht, wenn sie eine Förderzusage nach den Kriterien der nationalen Wasserstoffstrategie der Bundesregierung erhalten hat (§ 28p Abs. 3 S. 1 EnWG). Das Gleiche gilt für Infrastruktur, die im Zusammenhang mit festgelegten Energiegewinnungsgebieten nach dem Windenergie-auf-See-Gesetz entsteht (§ 28p Abs. 3 S. 2 EnWG). Ein Bedarf wird in der Regel auch angenommen bei Wasserstoffnetzinfrastruktur, die:

1. große industrielle Abnehmer, Industriecluster, Wasserstoffkraftwerke oder entsprechend vorbereitete Kraftwerke mit Wasserstoff versorgt,
2. nicht Teil des genehmigten Wasserstoff-Kernnetzes ist, sich aber direkt daran anschließt und

¹ Ausnahme: Der betroffene Leitungsabschnitt bzw. die betroffene Anlage ist bereits für Wasserstoff (5. Gasfamilie) ausgelegt worden.

² Hier ist anzumerken, dass §113c Abs. 1 EnWG zwar nur für H₂-Leitungen größer 16 bar die Anwendung der GasHDrLtGv vorschreibt, §113c Abs. 3 EnWG jedoch die Anzeige der Umstellung für alle H₂-Leitungen, unabhängig von der Druckstufe, vorsieht.

3. bis spätestens 31. Dezember 2032 in Betrieb gehen soll (§ 28p Abs. 3 S. 3 EnWG).

Ziel der Prüfung der Bedarfsgerechtigkeit der Umstellung ist es festzustellen, ob es vor Ort ausreichend konkreter Bedarf für ein Wasserstoffnetz vorhanden ist (z. B. industrielle Nachfrage). Zu welchem Zeitpunkt der Verteilnetzbetreiber dies machen muss, ist in dem Paragraphen nicht geregelt. Festgelegt ist jedoch, dass die Bundesnetzagentur vier Monate Zeit hat, eine Entscheidung zu treffen. Wird innerhalb der Frist keine Entscheidung mitgeteilt, ist die Bedarfsgerechtigkeit als gegeben anzusehen.

§ 28q EnWG zielt auf die schnelle und effiziente Schaffung eines deutschlandweiten Wasserstoff-Kernnetzes ab (Absatz 1). In Absatz 2 und 3 ist der Antrag zum **Wasserstoff-Kernnetz** geregelt und die Frist (29.12.2023) ist bereits abgelaufen. In Absatz 4 sind Voraussetzungen festgelegt, die erfüllt sein müssen, um genehmigungsfähiger Teil des Wasserstoff-Kernnetzes zu werden. Absatz 5 regelt die Zusammenarbeits- und Kooperationspflicht zwischen Gasverteilnetzbetreibern, Wasserstoffnetzbetreibern und Betreibern sonstiger umstellbarer Infrastrukturen mit den Fernleitungsnetzbetreibern. In Absatz 6 wird darauf hingewiesen, dass die Bundesnetzagentur Änderungen am Antrag zum Wasserstoff-Kernnetz verlangen und bei Nichtumsetzung ein eigenes Bestimmungsverfahren durchführen kann. Fernleitungsnetzbetreiber müssen in Abstimmung mit relevanten Infrastrukturbetreibern für jedes Projekt zum Wasserstoff-Kernnetz ein oder mehrere geeignete und effiziente Unternehmen vorschlagen, das/die für die Durchführung des Projektes verantwortlich ist/sind (Absatz 7). Aus Absatz 8 Satz 5 bis 7 ergibt sich die Überprüfung der für das Wasserstoff-Kernnetz genehmigten Projekte in nachfolgenden Netzentwicklungsplanungsprozessen.³

Nachfolgend werden die Prozesse zur Analyse der Wasserstofftauglichkeit sowie der strömungstechnischen Analyse der Netzsektionen (Zielnetzplanung) näher beschrieben.

2.1.5 Analyse der Wasserstofftauglichkeit von Gasnetzen und -anlagen

Der Prozess zur Prüfung und Nachweiserbringung der Wasserstofftauglichkeit von Netz und Anlagen lässt sich in die folgenden Schritte und Phasen aufteilen (vgl. Abbildung 2.2).

³ BeckOK EnWG/Riege/Assmann, 14. Ed. 1.3.2025, EnWG § 28q Rn. 131-132.

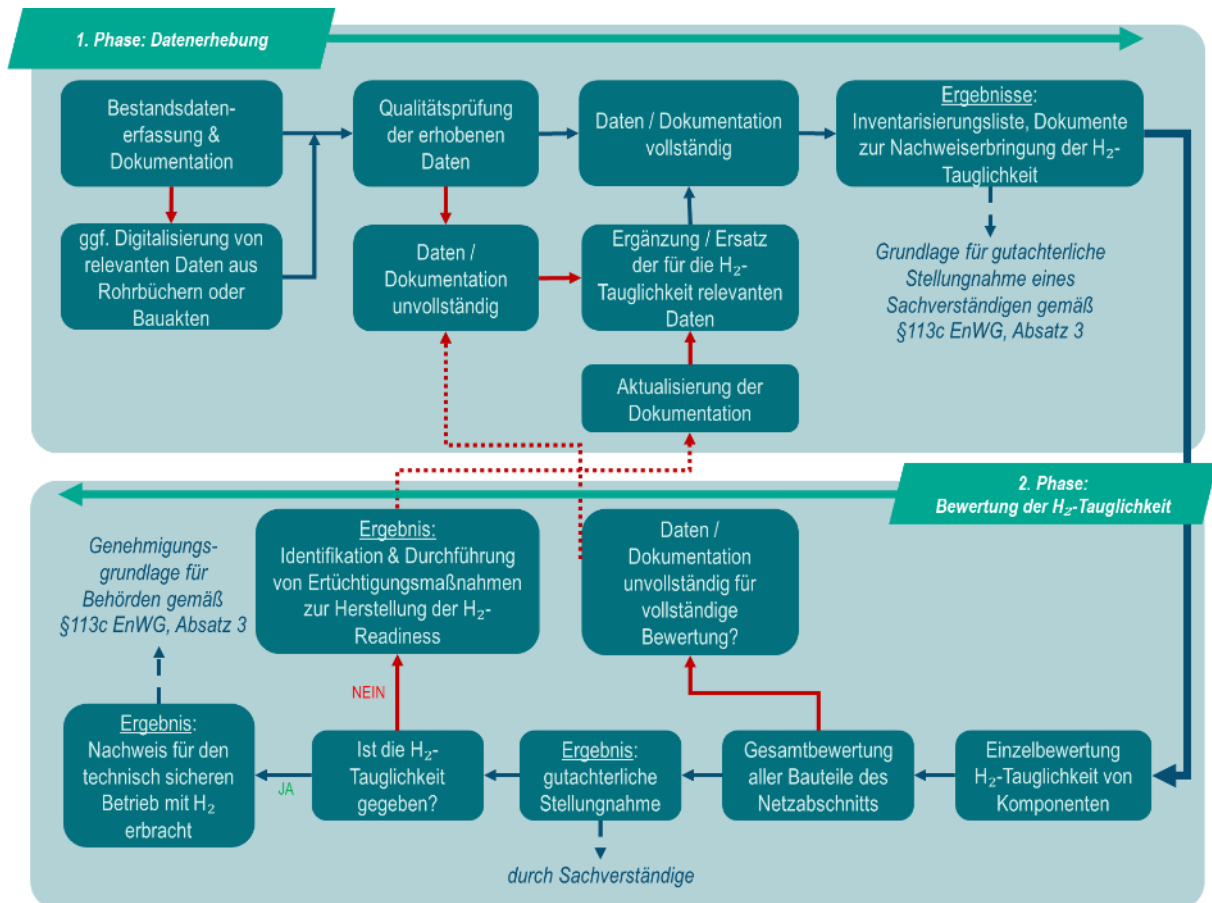


Abbildung 2.2: Prozessschema zur Prüfung und Nachweiserbringung der H₂-Tauglichkeit (eigene Darstellung)

Phase 1: Datenerhebung

Die Bewertung der Wasserstofftauglichkeit basiert auf der Erhebung zur Bestandsdokumentation des umzustellenden Gasnetzabschnitts. Ziel dieser Datenerhebung besteht zum einen in der Inventarisierung der verbauten Netzkomponenten sowie dem Zusammentragen der dazugehörigen Dokumentation.

Die Inventarisierungstabelle enthält sämtliche Gasnetzkomponenten der umzustellenden Netzabschnitte und speist sich mit Daten aus den digitalen Betriebsmittelinformationssystemen (BIS, GIS, Zählerverwaltung etc.) sowie den Daten aus Bauakten oder Rohrbüchern. Hierbei kann in einem vorgelagerten Schritt auch die Digitalisierung von noch analog vorliegenden Datenquellen erforderlich werden. Die Inventarisierungstabelle sollte mindestens folgende Informationen zu den verbauten Komponenten enthalten:

- Anzahl
- Baujahr
- Material/Werkstoff

- Auslegungs- bzw. Dimensionierungsparameter wie Nennweite und Nenndruck (ergänzend dazu die Wandstärke bei Stahlrohrleitungen⁴)
- Betriebsdruck
- Angaben zum Hersteller und der Hersteller-spezifischen Produktbezeichnung (optionale Informationen für späteren Abgleich mit Herstellererklärungen o.ä.)

Die Ergänzung weiterer Informationen erweist sich insbesondere für die spätere Verwendung der Inventarisierungstabelle zur Lokalisierung erforderlicher Ertüchtigungsmaßnahmen als hilfreich:

- Identifikationsparameter wie z.B. die Objekt-ID im GIS
- Verortungsparameter für die Zuordnung einer Komponente zu Umstellzonen und -bezirken:
 - Ort, Ortsteil, Postleitzahl, amtlicher Gemeindeschlüssel, Straße, Hausnummer
 - Leitungs-Nr., GDRMA-Nr., Schieberkreuz-Nr.

Die für die Umstellung auf Wasserstoff vorzulegenden Dokumente umfassen u.a.

- Konformitäts- und Herstellererklärungen der verbauten Produkte zum Nachweis von Funktionalität, Beschaffenheiten, Eignung oder Abnahme gegenüber Wasserstoff (optional als Hilfestellung für die Nachweiserbringung der Wasserstofftauglichkeit)
- Als Hilfestellung kann hierfür die DVGW-Datenbank verifHy herangezogen werden.
- Unterlagen über die Errichtung des umzustellenden Gasnetzes
 - Baudokumentation
 - Abnahmeprüfzeugnisse mit Zeichnungen und Materialstücklisten
 - Bescheinigungen über Werkstoffprüfungen bzw. Materialprüfzeugnisse
 - Angaben über Druckprüfungen
 - Berichte zur Dichtheitsprüfung, Rohrnetzüberwachung, Werkstoffuntersuchungen (z.B. Festigkeitsprüfungen)
 - Sicherheitsdatenblätter
 - ZfP-Dokumentation
 - Explosionsschutzdokumente
 - Sachverständigengutachten

⁴ u.a. relevante Parameter für eine ggf. erforderliche bruchmechanische Berechnung von Stahlrohrleitungen (vgl. G 407 und G 464)

- Unterlagen über die bisherige Betriebsweise und Instandhaltung des umzustellenden Gasnetzes
 - Unterlagen zur Gasbeschaffenheit
 - Angaben über äußere Einflüsse (z.B. Bergbaueinwirkungen, korrosive Böden, Bebauung)
 - Betriebsanweisungen und Änderungen der bisherigen Betriebsweise
 - Betriebs- und Instandhaltungserfahrungen mit Erdgas (kontinuierliche Rohrnetzüberprüfungen, Anwendungen TSM)
 - Prüfbescheinigungen über durchgeführte Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten und wiederkehrende Prüfungen
 - Auswertung der Störungs- und Schadensstatistik (Linien- und Punktobjekten): Bewertung von Art und Häufigkeit der Fehler
 - Gefährdungsbeurteilungen
 - Messbericht KKS

Es empfiehlt sich, dass der Netzbetreiber beim Prozess der Datenerhebung frühzeitig einen Sachverständigen einbindet, um so die konkreten Anforderungen an die Dokumentation und die Daten zur Nachweiserbringung der Wasserstofftauglichkeit des umzustellenden Netzabschnittes abzustimmen. Gemeinsam mit dem Sachverständigen sollte im Anschluss an die Datenerhebung eine Qualitätsprüfung auf Vollständigkeit der Daten und Dokumentation erfolgen.

Können aufgrund unvollständiger Dokumentation und Datenlage keine Informationen über die H₂-Readiness erhoben werden, sind in Anlehnung an die DVGW-Merkblätter G 221, G 407, G 408 und G 409 entsprechende Maßnahmen einzuleiten, um die bestehenden Datenlücken bestmöglich zu schließen und eine Bewertung bzw. den Nachweis zur Wasserstofftauglichkeit möglich zu machen.

- Maßnahmen bei fehlenden Informationen zu Netzbauteilen:
 - Baustellen an Gasleitungen nutzen, um Dokumentation zu vervollständigen (vgl. auch DVGW-Arbeitsblatt G 402)
 - Entnahme und Prüfung repräsentativer Stichproben (z.B. kritische Rohre und Komponenten)
 - Analogieschlüsse ziehen (Baujahr, produktscharfe Einkaufsdaten je Zeitabschnitt, Abfrage bei Wissensträgern).
 - Aufbau einer Ersatzdokumentation entsprechend DVGW-Regelwerk G 453 (> 5 bar, sinngemäß anzuwenden auch für < 5 bar) und der Netzdokumentation entsprechend GW 120
- Maßnahmen bei lückenhafter Integritätsbeurteilung zur Aufnahme des Ist-Zustands:
 - Durchführung von Inspektionen

- Oberirdische Überprüfung von erdverlegten Rohrleitungen
 - Verwendung von Überwachungssystemen (z.B. Stoßodorierung) zur frühzeitigen Erkennung von Undichtigkeiten
 - betrieblichen Erprobungen / Tests (u.a. Druckprüfungen, Prüfungen zur inneren und äußeren Dichtheit, Gasdurchlässigkeit, Funktion, Ansprechverhalten)
 - ingenieurmäßige Bewertungen unter Berücksichtigung von Betriebserfahrungen/Ableitungen hinsichtlich des Einsatzes von Wasserstoff in der Gasverteilung
- Erstellung bzw. Überarbeitung von Gefährdungsbeurteilungen (umfassen Zustand des Bauteils, verbaute Werkstoffe, Dichtungen, Dimensionierung, vollständige Dokumentation)
 - Erbringung des Nachweises der Wasserstofftauglichkeit über technische Regeln und/oder Normbezug (Eignung und Auslegung für Wasserstoff gegeben)

Phase 2: Bewertung der H₂-Tauglichkeit

Auf Basis der erhobenen Daten und Dokumentation erfolgt anschließend die Bewertung der Wasserstofftauglichkeit durch den Sachverständigen. Hierbei prüft dieser die Dokumentation zunächst auf Vollständigkeit und Aktualität. Kann der Sachverständige aufgrund unvollständiger Dokumentation und Datenlage keine vollständige Aussage zur Wasserstofftauglichkeit ableiten, sind durch den Netzbetreiber entsprechende Maßnahmen zur Vervollständigung der Daten und Dokumentation zu treffen (wie zuvor im Text beschrieben). Die Bewertung umfasst Einzelbewertungen zur Wasserstofftauglichkeit der verbauten Komponenten sowie die Gesamtbewertung aller Bauteile des umzustellenden Netzabschnitts unter Berücksichtigung betrieblicher und sicherheitstechnischer Aspekte. Im Ergebnis der Bewertung der Wasserstofftauglichkeit gibt der Sachverständige eine gutachterliche Stellungnahme zum Zustand der Wasserstofftauglichkeit des umzustellenden Gasnetzabschnittes ab.

Ist die Wasserstofftauglichkeit nicht vollständig gegeben, wird die Ertüchtigung und Anpassung von Teilen des umzustellenden Netzabschnitts erforderlich, um die H₂-Readiness gesamtheitlich herzustellen zu können (vgl. Kapitel 2.3). Nach Abschluss dieser Maßnahmen ist die Dokumentation entsprechend zu ergänzen bzw. zu aktualisieren.

Ist die Wasserstofftauglichkeit gemäß der gutachterlichen Stellungnahme des Sachverständigen vollständig gegeben, ist somit der Nachweis für einen technisch sicheren Betrieb mit Wasserstoff erbracht. Dieser Nachweis gilt gleichzeitig als Grundlage für die zuständige Behörde, um das Umstellvorhaben zu genehmigen (vgl. Kapitel 2.4).

Die Umstellung von Stahlrohrleitungen (im Transportnetz als auch Verteilnetz) erfordert aktuell die Durchführung einer bruchmechanischen Bewertung nach DVGW-Merkblatt G 464. Auf eine bruchmechanische Bewertung kann bisher nur verzichtet werden, wenn

- eine vorwiegend ruhende Beanspruchung vorliegt (≤ 1 äquivalenter Vollastwechsel / Jahr),
- der Werkstoff eine Mindeststreckgrenze ≤ 360 MPa aufweist und
- der Nutzungsgrad $f_0 \leq 0,5$ ist.

Das DVGW-Projekt „Begrenzung des Anwendungsbereiches für bruchmechanische Bewertung von Gasleitungen nach DVGW G 464“ (BAG 464) [2] untersuchte daraufhin die Notwendigkeit zur Durchführung einer bruchmechanischen Bewertung im Verteilnetz bis 16 bar und leitete folgende Erkenntnisse aus den Ergebnissen ab:

- Bei einem MOP bis 12 bar ist keine bruchmechanische Berechnung, unabhängig von der verwendeten Stahlgüte, erforderlich. Dies gilt ebenso bei einem MOP zwischen 12 und 16 bar und einer Nennweite $\leq$ DN 200.
- Demnach kann bei einem Großteil der Stahlrohrleitungen im Verteilnetz auf eine bruchmechanische Bewertung gemäß DVGW-Merkblatt G 464 verzichtet werden.

Diese neuen Erkenntnisse zur Notwendigkeit der Durchführung einer bruchmechanischen Bewertung von Stahlrohrleitungen bei Drücken bis 16 bar sollen zeitnah in die Überarbeitung der G 407 einfließen.

2.1.6 H₂-Zielnetzplanung und strömungstechnische Analyse der Netzsektionen

Im Rahmen einer Zielnetzplanung sind die strömungstechnische sowie netztopologische Durchführbarkeit der Netzumstellung auf Wasserstoff (sowie des anschließenden Betriebs mit Wasserstoff) unter Beachtung der stets gesicherten Erdgas- und Wasserstoffversorgung für jedes (Teil-)Netz zu analysieren.

Mit den Ergebnissen lassen sich notwendige Maßnahmen zur Gewährleistung der Kapazität von Leitungen und Anlagen im Zielnetz aufzeigen (z.B. Neubau/Erweiterung von Regelanlagen, Leitungsneubau, Ausweisung von zu nutzenden vorhandenen bzw. neu zu schaffenden Trennstellen; vgl. Kapitel 2.3). Das Zielnetz soll die Einhaltung von (selbst) festgelegten Mindestdrücken und ggf. Höchstfließgeschwindigkeiten im Netz für jeden Umstellschritt bzw. jeden kritischen Umstellschritt gemäß Umstellungskonzeption sicherstellen.



Abbildung 2.3: Prozessschema zur netzhydraulischen Analyse (Zielnetzplanung)

Voraussetzung für eine Zielnetzplanung ist ein Netzmodell, dass zunächst den Ist-Zustand des Netzes möglichst genau erfasst. Hierfür benötigt es mindestens folgende Daten:

- Rohleitungen
 - Lage & Länge
 - Innendurchmesser
 - Material/Rauheit

- Absperreinrichtungen
 - Lage
 - Schaltzustand
- Regelanlagen
 - Lage
 - Ausgangsdruck
 - Technische Kapazität
- SLP-Kunden
 - Lage/Adresse
 - Jahresverbrauch (Kundenwert)
- RLM-Kunden
 - Lage/Adresse des Verbrauchers
 - Gemessene Lastgänge (min. Stundenwerte)
- Gasbeschaffenheit (Erdgas)
 - Zusammensetzung
 - Brennwert
 - Dichte
 - Viskosität
- Wetterdaten
 - Gemessene Temperaturzeitreihe
 - Auslegungstemperatur

Zur Plausibilisierung des damit erstellten Netzmodells sind Vergleichsmessungen notwendig, mit denen die Simulationsergebnisse bestätigt werden können. Dafür können einerseits gemessene Durchflüsse durch Regelanlagen verwendet werden und zum anderen Langzeitmessungen des Drucks an verschiedenen Druckmesspunkten im Netz. Die Anzahl der Druckmesspunkte ist von der Aufgabenstellung sowie von der Größe und Vermaschung des Rohrnetzes abhängig [3].

Liegt ein plausibles Netzmodell für den Ist-Zustand vor, muss als nächstes der Zielzustand definiert werden. Hierbei muss festgelegt werden, welche Netzabschnitte später auf Wasserstoff umgestellt, welche Netzabschnitte stillgelegt und welche ggf. weiter mit Erdgas versorgt werden sollen. Entsprechend müssen die Gasbeschaffenheiten an den einspeisenden Netzkoppelpunkten im Netzmodell angepasst werden, oder neue H₂-Netzkoppelpunkte, die sich aus der Planung der vorgelagerten Netzbetreiber ergeben, ergänzt und obsolete

Erdgaseinspeisungen entfernt werden. Weiterhin müssen voraussichtliche Änderungen bei den Verbrauchern ins Netzmodell übernommen werden.

Simulationen mit den geänderten Randbedingungen zeigen dann auf, wo durch die Umstellung auf Wasserstoff und der damit einhergehenden Änderung der Netzstruktur festgelegte Mindestdrücke unterschritten werden könnten. Um die Versorgungssicherheit im Zielnetz nicht zu gefährden, müssen die Ursachen für solche Schwachstellen identifiziert werden. Hohe Strömungsgeschwindigkeiten können hier als Indikator dienen, wo Maßnahmen, wie z.B. eine Nennweitenerhöhung, notwendig wären. Weitere Maßnahmen können der Neubau von Leitungen, der Neu- oder Umbau von Regelanlagen oder Änderungen der Betriebsdrücke in Teilnetzen sein. Ebenso kann ermittelt werden, wo Assets wie Leitungen oder Regelanlagen ggf. nicht mehr benötigt und stillgelegt/zurückgebaut werden können, um Betriebskosten zu sparen.

Die Maßnahmenliste muss iterativ erstellt und immer wieder mit weiteren Simulationen überprüft werden, damit die festgelegten Kriterien für einen sicheren Netzbetrieb vom Zielnetz auch eingehalten werden.

Bei einer Zielnetzplanung mit dieser Methodik wird zunächst allgemein überprüft, ob ein Netz grundsätzlich für Wasserstoff tauglich ist. Für die Umstellung selbst muss dann ein eigenes Umstellkonzept (Kapitel 2.2) entwickelt werden.

2.2 Umstellungskonzeption

Die Umstellungskonzeption wird iterativ auf Basis der Erkenntnisse aus den vier vorbereiteten Analysebereichen erstellt und spielt ggf. notwendige Änderungen und konzeptionell notwendige Randbedingungen an diese zurück. Dabei erfolgt eine Einteilung des Gasnetzes in Umstellzonen und -bezirke.

Umstellzonen sind strategische Einheiten und netzhydraulisch getrennte Untergliederungen des Netzes hinsichtlich der Umstellung auf Wasserstoff. Umstellzonen sollten eine solche Größe haben, dass sie innerhalb eines Jahres umstellbar sind [4].

Umstellbezirke sind operative Einheiten für den Umstellungsprozess innerhalb einer Umstellzone und werden von der Größe her so gewählt, dass sie innerhalb einer kurzen, definierten Zeitspanne umstellbar sind (in der Regel innerhalb einer Arbeitswoche, von Montag bis Freitag) gemäß DVGW-Arbeitsblatt G 680 „Erhebung, Umstellung und Anpassung von Gasgeräten“, um die Versorgungsunterbrechung für den Kunden zu minimieren.

Die Bildung der Umstellbezirke ist nach GTP-Leitfaden 2024 im Wesentlichen abhängig von [4]:

- Kundenstruktur und Kundengeräte:

Wie viele und welche Art von Industriekunden befinden sich im Umstellungsbezirk? Hierbei ist zu beachten, dass aufgrund individueller Prozesse und Anlagenstrukturen der Industriekunden die Dauer der Vorbereitung und Durchführung der Umstellung erheblich variieren kann.

Zudem stellt sich die Frage, welcher Anteil der häuslichen Gasgeräte bereits H₂-ready ist. Die noch nicht für den Betrieb mit Wasserstoff geeigneten Geräte müssen unter Zustimmung der Kunden entweder ausgetauscht oder umgerüstet werden. Für die

Außerbetriebnahme und Demontage des Altgeräts sowie die Installation und Inbetriebnahme eines neuen Geräts ist von etwa einem Arbeitstag (acht Stunden) auszugehen [1]. Die Umstellung eines H₂-ready-Gasgeräts mittels Umrüstkit erfordert dagegen lediglich ein bis zwei Stunden [5, 6]. Details zur Umstellung der Hausinstallation und Gasgeräte sind in den Kapiteln 3 und 4 zu finden.

- Verfügbarkeit/Anzahl der Dienstleister und Monteure für die Umstellung bei den Kunden

- Netztopologie:

In Bezug auf die Netztopologie muss überprüft werden, ob ein geplanter Umstellbezirk durch die vorhandenen Sektionsschieber vom übrigen Netz getrennt werden kann, oder ob zusätzliche Schieber und Ausblaseventile erforderlich sind. Eine Netzsimulation und die Durchführung von Testläufen der geänderten Netzfahrweisen könnte hilfreich sein (Anhang C der G 680).

- Versorgungssituation / netzhydraulische Gegebenheiten:

Nach der Abtrennung eines Bezirks muss die Versorgungssituation und Netzstabilität des restlichen Gasnetzes zu jedem Zeitpunkt gewährleistet bleiben. Bei der Bezirksbildung muss daher auch überprüft werden, ob neue Leitungen oder neue GDRM-Anlagen erforderlich sind. Der Zeitplan zur Umstellung muss mit dem vorgelagerten und nachgelagerten Netzbetreiber abgestimmt und im Umstellfahrplan fixiert werden. Es sollte eine Rücksprache mit benachbarten Netzbetreibern gehalten werden (vgl. Anhang C der G 680).

- Verfügbarkeit von Netztechnikern beim Netzbetreiber:

Je größer ein Bezirk ausgewiesen wird, desto mehr Netzanpassungsmaßnahmen (z.B. der Einbau von zusätzlichen Schiebern, Durchführen der Inertisierung / des Spülens) sind notwendig und desto mehr Netzmonteure/-techniker sind erforderlich.

- Jahreszeitliche Gegebenheiten:

Der Zeitraum für die Umstellung eines Bezirks muss realistisch gesetzt werden, um die Akzeptanz in der Bevölkerung für die Wärmewende nicht zu gefährden. Ein Bezirk, in welchem hauptsächlich Haushaltskunden an das Gasnetz angeschlossen sind, sollte daher vorrangig außerhalb der Heizperiode umgestellt werden. Bezirke mit einem starken Gewerbe- und Industrieanteil können im Gegensatz dazu auch während der Heizperiode umgestellt werden.

- Behördliche Belange und Genehmigungen, unter anderem für Tiefbauarbeiten

Anschließend erfolgt die Erstellung einer indikativen Umstellungsreihenfolge mit Umstellungszeitpunkten der strategisch ausgewählten Zonen und den darin auf operativer Ebene enthaltenen Bezirken und Kunden. Dazu gehört auch die Ausweisung von Abhängigkeiten und Flexibilität im Rahmen der Umstellung. Zu berücksichtigen sind dabei die übergeordneten Dekarbonisierungsziele der Bundesregierung gemäß Klimaschutzgesetz, unternehmensstrategische Klimaziele des Verteilnetzbetreibers oder der Kommune, bereits bestehende kommunale Wärmeplanungen sowie die verfügbaren Ressourcen für die Durchführung der Umstellung (zeitlich, personell, materiell).

Im Ergebnis lässt sich daraus ein zeitlich-räumlicher Umstellungsplan (Transformationsfahrplan) ableiten, inkl. einer investitionsfähigen Planung zur Herstellung der H₂-Readiness und der Umstellbarkeit des Netzes. Gemäß den Anforderungen aus §71 k GEG ist ein solcher Fahrplan⁵ gleichzeitig Voraussetzung, um im Rahmen der Kommunalen Wärmeplanung Wasserstoffnetzgebiete ausweisen zu können.

2.3 Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen

Dieses Kapitel beschreibt die Vorbereitung und Umsetzung der für die Umstellung erforderlichen netzseitigen Anpassungsmaßnahmen, die im Kapitel 2.1.6 benannt sind.

2.3.1 Eignung und Anpassung der Komponenten im Verteilnetz

Die Integration von Wasserstoff in bestehende Gasverteilnetze ist ein zentrales Thema bei der Umstellung auf eine klimaneutrale Energieversorgung. Wasserstoff hat das Potenzial, fossile Brennstoffe zu ersetzen, allerdings bringt seine Einführung in Gasverteilnetze technische und sicherheitstechnische Herausforderungen mit sich [7].

2.3.1.1 Material der Rohrleitung

Das deutsche Gasverteilnetz erstreckt sich über eine Gesamtlänge von ca. 560.000 km. Den größten Anteil machen Kunststoffrohrleitungen mit etwa 69 % des Netzes aus. Stahlrohre sind mit etwa 28 % vertreten. Die restlichen 3 % bestehen aus Duktulgussrohren (1,3 %), Graugussrohren (0,2 %) und Leitungen unbekannten Materials (1,3 %) [8, 9].

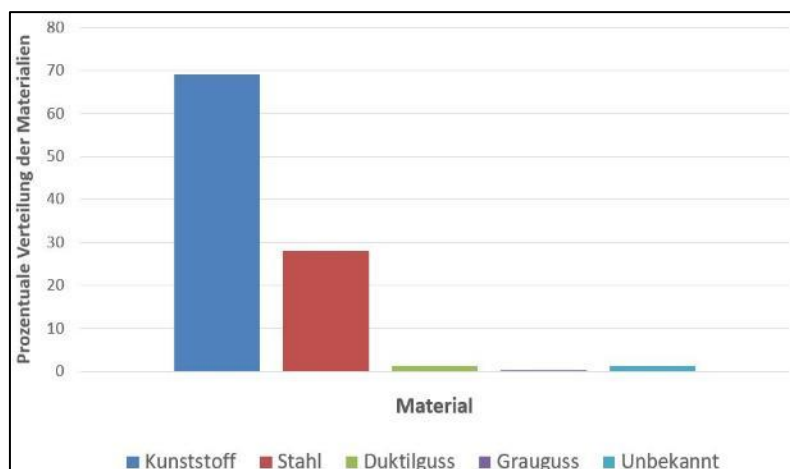


Abbildung 2.4: Prozentuale Verteilung der Materialien im deutschen Gasverteilnetz (eigene Darstellung)

Für diese Betrachtung wird die Wasserstofftauglichkeit von Rohrleitungen ausschließlich durch die Widerstandsfähigkeit der verwendeten Rohrmaterialien gegenüber Wasserstoff in den im Gasverteilnetz üblichen Druck- und Temperaturbereichen bestimmt. Bezogen auf die Wasserstoffbeständigkeit gelten Kunststoffe (insbesondere PE und PVC) sowie Stahl als wasserstoffgeeignet (H₂-ready) [10].

Aus Auswertungen des Leitungsbestands im deutschen Gasverteilnetz ergibt sich, dass etwa 97 % der Netzleitungslänge als wasserstofftauglich eingestuft werden kann. Für 2,6 % der Leitungen, insbesondere aus duktilem Gusseisen (1,3 %) und unbekanntem Material (1,3 %), wird die H₂-Readiness derzeit noch überprüft. Das DVGW-Forschungsprojekt „H₂-Toleranz

⁵ Dieser verbindliche Fahrplan muss von der BNetzA genehmigt werden.

von Duktiguss“ (Förderkennzeichen: G 202332) untersucht umfassend die Eignung von Duktigussleitungen für Wasserstoff. Zudem zeigen Tests des spanischen Verteilnetzbetreibers nedgia in Barcelona, dass Wasserstoff keinen negativen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften von Duktiguss wie Härte, Biegeverhalten, Duktilität oder Bruchfestigkeit hat. Auf Grundlage dieser Informationen werden Duktigussleitungen in der Modellierung der Transformationskosten des deutschen Gasverteilnetzes als wasserstofftauglich betrachtet. Für Rohrleitungen mit unbekanntem Material wird angenommen, dass es sich um Leitungen im Verteilnetz aus Kunststoff, Stahl oder Duktiguss handelt und daher ebenfalls für den Transport von Wasserstoff geeignet sind [10]. Dies ist legitim, da Grauguss, das nicht wasserstofftauglich ist, nur im Verteilnetz mit moderaten Bedingungen zu finden ist und nur mit ca. 0,2 % enthalten ist [10].

Für die Leitungen mit unklarer Wasserstofftauglichkeit braucht es eine einheitliche Bewertungsvorgabe. Da nicht alle ausgebaut werden sollen, muss die Branche auf Basis betrieblicher Erfahrungen festlegen, wie mit diesen Leitungen künftig umgegangen wird.

Tabelle 2.1 bietet einen Überblick über die angenommene Wasserstofftauglichkeit der verschiedenen Rohrleitungsmaterialien und vergleicht diese mit den teils vorsichtig gewählten Annahmen aus dem DVGW-Projekt „Roadmap Gas 2050“ [11].

Tabelle 2.1: Modellierungsannahmen zur Wasserstofftauglichkeit der Rohrleitungsmaterialien im Vergleich zum DVGW-Projekt „Roadmap Gas 2050“ [11].

Rohrleitungsmaterial	Modellierungsannahme Wasserstofftauglichkeit Stand 2024	Modellierungsannahme Wasserstofftauglichkeit Stand 2021
Kunststoff	H ₂ -ready	H ₂ -ready
Stahl	H ₂ -ready	H ₂ -ready
Duktile Guss	H ₂ -ready	Nicht H ₂ -ready
unbekannt	H ₂ -ready	Nicht H ₂ -ready
Grauguss	Nicht H ₂ -ready	Nicht H ₂ -ready

2.3.1.2 Komponenten (Nicht-Rohrleitungs-Assets)

Bestimmte Komponenten in Gastransport- und -verteilnetzen sind bereits für 100 % Wasserstoff geeignet und erfordern keine Anpassung oder Erneuerung. Dazu gehören das Druckregelgerät, der Hausdruckregler sowie die Hauseinführungskombination und Hauptabsperreinrichtung (Kugelhahn) [1]. Bestimmte Komponenten im Gasnetz und in Haushaltsgeräten müssen jedoch ersetzt oder angepasst werden, bevor der Wechsel von Erdgas auf Wasserstoff erfolgen kann. Die wichtigsten davon werden hier kurz erläutert.

- **Mengenumwerter:** Zustands-Mengenumwerter berechnen Gasvolumenströme auf Normbedingungen, wobei Modelle wie GERG2004/08, AGA8 und SGERG-88 eingesetzt werden. Aufgrund von Genauigkeitsanforderungen ($\leq 0,1-0,25\%$) sind Wasserstoffanteile auf max. 10 Mol-% (AGA8, SGERG-88) bzw. ca. 40 Mol-% (GERG2004/08) begrenzt [11, 12].
- **Filter:** Die Funktion eines Filters zur mechanischen Abscheidung von Begleitstoffen aus dem Gasstrom bleibt unabhängig von der Gasart erhalten. Steigt jedoch die Wasserstoffkonzentration im Gasgemisch bei gleichbleibender energetischer Transportkapazität – was eine erhöhte Strömungsgeschwindigkeit zur Folge hat – nimmt die

spezifische Flächenbelastung des Filters zu. Ein Wasserstoffanteil von 25 Vol.-% führt beispielsweise zu einer etwa 30 % höheren Flächenbelastung. Die Materialbeständigkeit bleibt, ähnlich wie bei Stahlwerkstoffen, auch bei einem Wasserstoffanteil von bis zu 100 Vol.-% gewährleistet, sodass die statische Belastung des Filtergehäuses als unkritisch gilt. Allerdings kann je nach ursprünglicher Auslegung des Filters ein Austausch bei höheren Wasserstoffkonzentrationen notwendig sein. Besonders bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten ist die Haltbarkeit der Filtermaterialien entscheidend, da erhöhte Durchflussraten zu höheren Druckverlusten, einer geringeren Staubabscheideeffizienz und möglichen Materialschäden führen können. Daher sind speziell für Wasserstoff ausgelegte Filter unverzichtbar. Auf Grundlage der Erfahrungen aus der Zeit der Stadtgasnutzung, in der das Gasgemisch mindestens 40 Vol.-% Wasserstoff enthielt (1. Gasfamilie, Gruppe A, DVGW G260:2000), wird die Eignung des Filters für Wasserstoff bis zu einem Anteil von 40 Vol.-% festgelegt [11]. Es ist jedoch zu beachten, dass für den Betrieb mit der 5. Gasfamilie eine individuelle Überprüfung der Filterauslegung erforderlich ist.

- **Vorwärmer:** Die erforderliche Vorwärmeleistung für Gas nimmt mit steigendem Wasserstoffanteil im Gasgemisch ab, vorausgesetzt, die energetische Transportkapazität bleibt konstant. Dies liegt am umgekehrten Joule-Thomson-Effekt im Vergleich zu Erdgas. Laut Berechnungen mit der Software „GasCalc“ wird der Joule-Thomson-Koeffizient ab einem Wasserstoffanteil von etwa 85 Vol.-% bei den Betriebsbedingungen einer Verdichterstation kleiner oder gleich Null. Dies bedeutet, dass bei weiter steigendem Wasserstoffanteil eine Erwärmung des Gasgemisches während der Entspannung zu erwarten ist. Basierend auf Erfahrungen aus der Stadtgas-Ära, in der das Gasgemisch mindestens 40 Vol.-% Wasserstoff enthielt (1. Gasfamilie, Gruppe A, DVGW G260:2000), wird die Wasserstoffeignung des Vorwärmers im optimalen Fall auf 40 Vol.-% festgelegt [11, 12]. Das bedeutet, dass die aktuelle Vorwärmertechnik, die für Erdgas genutzt wird, eine Mischung aus Erdgas und bis zu 40 Vol.-% Wasserstoff erwärmen kann. Für den Betrieb mit der 5. Gasfamilie ist aufgrund des spezifischen Joule-Thompson-Effekts von Wasserstoff keine Vorwärmung erforderlich.
- **Sicherheitsventile (SAV und SBV):** Mehrere Hersteller, darunter Fiorentini, Honeywell, Itron und gAvilar, bestätigen, dass Sicherheitsventile für den Einsatz mit Wasserstoff geeignet und widerstandsfähig sind. Im DVGW-Forschungsprojekt „Entwicklung von modularen Konzepten zur Erzeugung, Speicherung und Einspeisung von Wasserstoff und Methan ins Erdgasnetz“ wurde davon ausgegangen, dass die Komponenten von Regelanlagen, die in Europa vertrieben werden, für Gase mit einem Wasserstoffanteil von bis zu mindestens 60 Vol.-% zugelassen und geeignet sind. Aus den Herstellerangaben sowie den Ergebnissen des genannten Forschungsprojekts lässt sich im optimalen Fall ableiten, dass die Sicherheitsabsperrentile (SAV) und Sicherheitsberstventile (SBV) bis zu einem Wasserstoffanteil von 60 Vol.-% geeignet sind [11, 12]. Bei Wasserstoffanwendungen erfordert die Konstruktion von Sicherheitsventilen besondere Aufmerksamkeit auf spezifische Merkmale:
 - **Materialverträglichkeit:** Wasserstoff neigt zur Versprödung von Metallen, weshalb Sicherheitsventile aus Materialien gefertigt werden müssen, die resistent gegen die durch Wasserstoff verursachte Rissbildung sind. Zur Vermeidung dieser Probleme werden häufig Edelstahl und bestimmte Legierungen, wie etwa solche auf Nickelbasis, eingesetzt [13].

- **Dichtungen und Leckagevermeidung:** Aufgrund der geringen Dichte von Wasserstoff ist bei den Dichtungen besondere Sorgfalt erforderlich. Daher muss bei der Auswahl der Dichtungsmaterialien und bei den Tests zur Überprüfung der Dichtheit von Sicherheitsventilen, die mit Wasserstoff betrieben werden sollen, besonders präzise gearbeitet werden [13].
- **Gasströmungswächter:** Seit 2002 sind in Deutschland Gasströmungswächter für Netzanschlussleitungen (25 mbar–5 bar) vorgeschrieben. Es gibt zwei Bauformen: mit und ohne Überströmöffnung. Bei Modellen ohne Öffnung muss der Teller per Gegen- druck geöffnet werden. Die meisten verbauten Geräte besitzen eine Überströmöffnung, durch die im Auslegungspunkt max. 30 l/h Luft strömen dürfen [14].
- Bei Wasserstoff erhöhen sich Auslegungs-, Ansprech- und Überströmvolumenstrom um den Faktor 2,8 – der Überströmstrom steigt z. B. von 40 l/h (Methan) auf 114 l/h. Ein Austausch der Gasströmungswächter ist jedoch nicht erforderlich – Pilotprojekte bestätigen ihre Eignung für grüne Gase [9, 14, 15].
- **Prozessgaschromatographen (PGC):** PGC sind in der Regel nicht in der Lage, Was- serstoff im Gasgemisch zu analysieren und verfügen oft nur über eine begrenzte Eignung für Wasserstoff, die bei 0,2 Vol.-% liegt. Laut Herstellerangaben kann durch eine amtlich geprüfte Umrüstung einzelner bestehender Geräte die Messung von bis zu 20 Vol.-% Wasserstoff im Gasgemisch ermöglicht werden [11, 12].
- Für den Betrieb mit höheren Wasserstoffanteilen ist der Einsatz neuer, wasserstoff- kompatibelster PGC oder andere eichfähige Messtechnik erforderlich, die eine präzise Reinheitsanalyse ermöglichen. Dies erfordert eine optimierte Kalibrierung, den Einsatz geeigneter Trägergase, hochpräzise Sensorik sowie softwareseitige Modifikationen, um eine maximale Messgenauigkeit und Eichfähigkeit sicherzustellen [16].
- **Gaszähler:** Die Gaszähler im Verteilungsnetz müssen voraussichtlich in großem Um- fang nachgerüstet oder ersetzt werden. Der Grund: Um bei Wasserstoff den gleichen Energiegehalt wie bei Erdgas bereitzustellen, muss ein etwa dreifach höherer Volu- menstrom gemessen werden.
- Zudem ist bekannt, dass insbesondere Balgengaszähler mit großen Elastomer- oder Polymerkomponenten bei wasserstoffhaltigen Gasgemischen den tatsächlichen Durchfluss oft zu niedrig anzeigen. Dadurch kann es zu ungenauen Verbrauchsmes- sungen kommen [17]. Gaszähler für Erdgas sind laut PTB TR G1914 bis 5 Vol.-% Was- serstoff freigegeben. Bis 10 Vol.-% ist eine Herstellerfreigabe nötig, darüber hinaus auch eine PTB-Unbedenklichkeitsbescheinigung. Drehkolben-, Turbinenrad- und Ult- raschallzähler gelten laut Herstellern ab 10 Vol.-% H₂ als geeignet [18]. Balgengaszäh- ler tragen je nach Ausführung unterschiedliche Bezeichnungen, die auf ihre Eignung für bestimmte Anwendungen hinweisen. Während G4-Balgengaszähler typischerweise für den Einsatz mit Erdgas in Haushalten verwendet werden, bietet ein G6-Balgengas- zähler aufgrund seiner höheren Kapazität und der Fähigkeit, größere Gasvolumen- ströme zu messen, auch Potenzial für den Einsatz in Wasserstoffanwendungen. Es gibt einige Hersteller, die Gaszähler produzieren, die sowohl für Erdgas als auch für Wasserstoff geeignet sind.

In deutschen Haushalten und Gewerbebetrieben gibt es eine Vielzahl an Geräten, die mit Erdgas betrieben werden. Dazu gehören Gashausanschlüssen, Warmwasserheizer, Gasheizungsanlage, Raumheizer, Herde und Öfen. Bei einer Umstellung von Erdgas auf Wasserstoff müssen diese entweder angepasst oder ausgetauscht werden.

2.3.1.3 Neubau von Leitungen

Der Neubau von Wasserstoffleitungen steht regelmäßig im Spannungsfeld zwischen technischer Machbarkeit, rechtlichen Vorgaben und Akzeptanz im Raum. Die genannten Raumwiderstände müssen frühzeitig im Planungsprozess erkannt, bewertet und durch geeignete technische, organisatorische und rechtliche Maßnahmen bewältigt werden. Ein professionelles Trassenmanagement, begleitet von Raumwiderstandskartierungen, frühzeitigen Behördenkontakten und Transparenz gegenüber der Öffentlichkeit, ist heute unerlässlich für ein erfolgreiches Genehmigungs- und Bauverfahren. Diese erfordern spezielle Prüfungen, technische Lösungen wie grabenlose Verlegung und enge Abstimmungen mit Behörden. Auch Eigentumsfragen können den Trassenverlauf beeinflussen. Gesetzlich geregelt ist dies im EnWG (§§ 43l, 113a, 113c) [19].

2.3.1.4 Zugrundeliegende Regelwerke

Für den **Austausch nicht H₂-fähiger Komponenten** und den **Neubau von Leitungen** im Gasverteilnetz mit einem Betriebsdruck von bis zu 16 bar sollten Sie die folgenden spezifischen DVGW-Regelwerke und Merkblätter berücksichtigen:

- **DVGW-Merkblatt G 407:** Dieses Merkblatt bietet Hinweise zur systematischen Bewertung und Umstellung bestehender Gasleitungen aus Stahlrohren bis 16 bar Betriebsdruck für die Verteilung von wasserstoffhaltigen, methanreichen Gasen und Wasserstoff. Es unterstützt Netzbetreiber bei der Identifikation von Komponenten, die für den Betrieb mit Wasserstoff geeignet sind oder ausgetauscht werden müssen [20].
- **DVGW-Merkblatt G 408:** Dieses Merkblatt ergänzt G 407 und fokussiert auf die Umstellung von Gasleitungen aus Kunststoffrohren bis 16 bar Betriebsdruck. Es behandelt spezifische Aspekte der Materialverträglichkeit und gibt Empfehlungen für den Austausch oder die Anpassung von nicht H₂-fähigen Komponenten [21].
- **DVGW-Merkblatt G 405:** Dieses Merkblatt befasst sich mit den technischen Anforderungen, Verfahren und Prüfgrundlagen für die Umstellung bestehender Gasarmaturen auf den Betrieb mit Wasserstoff. Es wurde entwickelt, um Netzbetreiber bei der sicheren und systematischen Transformation ihrer Erdgasinfrastruktur zu unterstützen. Im Mittelpunkt stehen **Armaturen**, die ursprünglich für Erdgas (meist mit Betriebsdrücken > 16 bar, aber sinngemäß auch für ≤ 16 bar) konzipiert wurden und deren Tauglichkeit für den Wasserstoffeinsatz bewertet werden muss. Das Merkblatt beschreibt dabei sowohl konkrete Zustandsprüfungen – wie die Prüfung der Dichtheit, der mechanischen Gängigkeit sowie der Materialverträglichkeit – als auch Anforderungen an die Dokumentation und Nachweisführung [22].

2.3.2 Vorbereitung von Ersatzgasversorgungsstandorten für die Umstellung von Erdgas auf Wasserstoff

Die Vorbereitung von Standorten für die Ersatzgasversorgung ist ein entscheidender Schritt bei der Umstellung von Erdgas auf Wasserstoff. Diese Standorte gewährleisten die kontinuierliche Energieversorgung während der Anpassungsphasen des Netzes.

Wichtige Aspekte bei der Standortvorbereitung [23]:

- **Netzwerkanalyse und Standortauswahl:** Eine umfassende Analyse der bestehenden Netzstruktur ist erforderlich, um strategisch günstige Standorte für die Ersatzgasversorgung zu identifizieren. Dabei sollten Faktoren wie Nähe zu Verbrauchsschwerpunkten, logistische Zugänglichkeit und Sicherheitsanforderungen berücksichtigt werden.
- **Technische Anpassungen:** Die ausgewählten Standorte müssen mit geeigneten Technologien ausgestattet werden, die sowohl den Betrieb mit Erdgas als auch mit Wasserstoff ermöglichen. Dies umfasst die Installation kompatibler Komponenten und die Berücksichtigung von Wasserstoff-spezifischen Eigenschaften.
- **Sicherheits- und Genehmigungsverfahren:** Es ist essenziell, alle relevanten Sicherheitsstandards einzuhalten und die notwendigen Genehmigungen für den Betrieb der Ersatzgasversorgungsanlagen einzuholen.

Durch die sorgfältige Planung und Umsetzung dieser Schritte kann eine zuverlässige Ersatzgasversorgung während der Transformation des Gasnetzes sichergestellt werden.

2.4 Anzeigeverfahren bei der zuständigen Behörde

Zur Verfahrenserleichterung bei Vorhaben zur Umstellung von Gasleitungen auf den Transport von Wasserstoff greift die Zulassungsfiktion des § 43I Abs. 4 EnWG zur Beschleunigung des Auf- und Ausbaus von Wasserstoffnetzen. Nach Satz 1 bleiben bestehende behördliche Zulassungen für Gasversorgungsleitungen, nun für den Wasserstofftransport, gültig; es sind somit weder ein Planfeststellungsverfahren noch ein Plangenehmigungsverfahren erforderlich (Zulassungsfiktion). Absatz 5 weist darauf hin, dass dies auch für behördliche Zulassungen und Anzeigevorbehalte für Gas-, Wasserstoff- und Produktenleitungen auf Grundlage eines anderen Gesetzes gilt (§ 43I Abs. 5 EnWG).

Die weiteren Ausführungen sind im genehmigungsrechtlichen Leitfaden⁶ [PORTAL GREEN II](#) detaillierter beschrieben.

Der folgende Entscheidungsbaum zeigt auf, in welchen Fällen der Umstellung von Erdgasleitungen auf den Wasserstofftransport, welche Anzeige- bzw. Genehmigungsverfahren durchzuführen sind.

⁶ Der genehmigungsrechtliche Leitfaden liegt nach aktuellem Stand im Entwurf vor und soll Mitte November 2025 veröffentlicht werden.

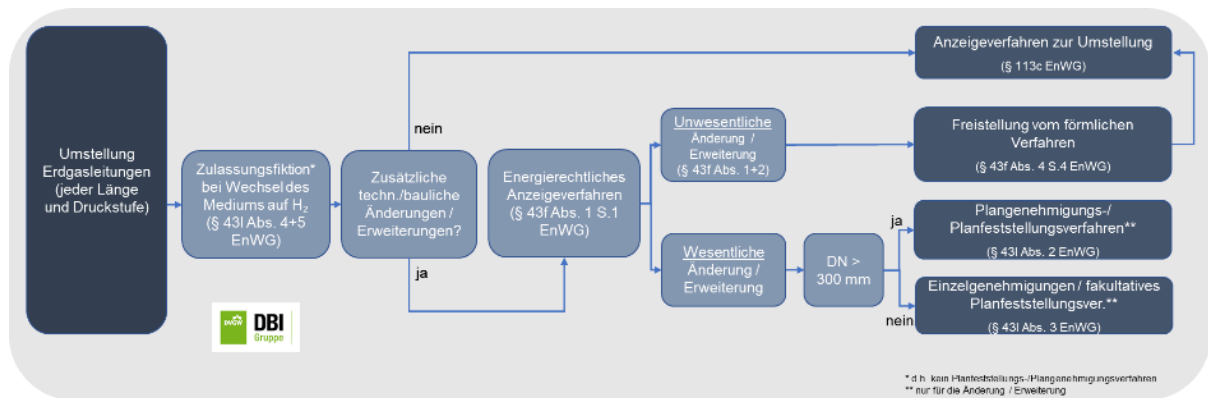


Abbildung 2.5: Anzeige- und Genehmigungsverfahren bei der Umstellung von Gasleitungen auf den Wasserstofftransport (eigene Darstellung DBI)

Bei einem Umstellvorhaben ist somit zuerst die Frage zu klären, welche technischen Maßnahmen zur Umstellung der Gasversorgungsleitung erforderlich sind und ob dafür bauliche oder technische Änderungen oder Erweiterungen⁷ der Gasversorgungsleitung und Anlagen notwendig sind (dritter Kasten). Ist dies nicht der Fall, so ist ausschließlich ein Anzeigeverfahren zur Umstellung nach § 113c Abs. 3 EnWG durchzuführen. In der Regel ist die Energieaufsichtsbehörde zuständig. Das Anzeigeverfahren zur Umstellung nach § 113c Abs. 3 EnWG ist bei jedem Vorhaben zur Umstellung von Leitungen von Erdgas auf Wasserstoff durchzuführen und gilt für alle Leitungen (Transport, Verteilung und Leitung bis zur Armatur vor Gasgerät; unabhängig von Länge, Durchmesser und Druckstufe).⁸

Sind bauliche oder technische Änderungen oder Erweiterungen geplant, dann müssen diese im Rahmen eines energierechtlichen Anzeigeverfahrens (§ 43f Abs.1 S. 1 EnWG) bei der zuständigen Planfeststellungsbehörde angezeigt werden (vierter Kasten). Wie es weiter geht, ist davon abhängig, ob die Änderung bzw. Erweiterung wesentlich oder unwesentlich ist. Unwesentlich ist sie, wenn die Voraussetzungen des § 43f Abs. 1 EnWG kumulativ erfüllt sind:

Nach dem UVPG oder nach Absatz 2 ist unter folgenden Bedingungen keine Umweltverträglichkeitsprüfung durchzuführen,

- Andere öffentliche Belange sind nicht berührt oder die erforderlichen behördlichen Entscheidungen liegen vor und stehen dem Plan nicht entgegen und
- Rechte anderer werden nicht beeinträchtigt oder es wurden mit den vom Plan Betroffenen entsprechende Vereinbarungen getroffen.

Nach § 43f Abs. 2 Nr. 1 EnWG ist für Umstellvorhaben keine UVP durchzuführen. Folglich ist diese Voraussetzung kraft Gesetzes erfüllt. Die dritte Voraussetzung wird dahingegen eingeschränkt, dass gemäß § 43f Abs. 4 S. 5 Hs. 2 EnWG die Prüfung der dinglichen Rechte anderer für Umstellvorhaben entfällt. Der Vorhabenträger hat demzufolge der zuständigen Behörde insbesondere nachzuweisen, dass andere öffentliche Belange⁹ (§ 43f Abs. 1 S. 1 Nr. 2 EnWG)

⁷ Der Austausch des Transportmediums wird i.d.R. mit technischen Umbaumaßnahmen an der Gasversorgungsleitung (z. B. Erneuerung von Molchscheulen und Armaturen, Auswechselung von Rohren und Einbauteilen) einhergehen [...]. In diesem Fall empfiehlt sich eine sorgfältige Prüfung der Bestandsgenehmigung und Antragsunterlagen, um einzuschätzen, ob der Änderungsbegriff erfüllt ist. Je konkreter und detaillierter die Genehmigungsunterlagen die Gasversorgungsleitung mit ihren Einbauteilen beschreiben, umso eher werden die Umbaumaßnahmen eine Abweichung vom Status quo darstellen und den Änderungsbegriff erfüllen. (Riege: Die Umstellung von Gasversorgungsleitungen für den Wasserstofftransport (EnWZ 2021, 391))

⁸ Riege: Die Umstellung von Gasversorgungsleitungen für den Wasserstofftransport (EnWZ 2021, 391)

⁹ Wann eine Beeinträchtigung öffentlicher Belange vorliegt, ist u.a. in § 35 Abs. 3 BauGB aufgezählt, wobei die Aufzählung nicht abschließend ist.

nicht berührt werden¹⁰ bzw. die benötigten Einzelgenehmigungen¹¹ der Fachbehörden vorliegen. Die Behörde entscheidet, ob die Änderung bzw. Erweiterung unwesentlich ist und trifft in ihrem Ermessen die Entscheidung, ob das Umstellvorhaben von einem förmlichen Verfahren freigestellt ist (§ 43f Abs. 4 S. 4 EnWG). Ist dies der Fall, dann kann die Planfeststellungsbehörde das Umstellvorhaben ohne langwieriges förmliches Verfahren mit ihrem Bescheid im Anzeigeverfahren zulassen (§ 43f Abs. 4 S. 4 EnWG).

Der Medienwechsel von Erdgas zu Wasserstoff ist keine wesentliche Änderung gemäß § 43l Abs. 4 S. 4 EnWG. Bei einem reinen Medienwechsel und keinen zusätzlichen baulichen oder technischen Änderungen oder Erweiterungen würde somit eine Anzeige des Umstellvorhabens nach § 113 c Abs. 3 EnWG ausreichen.

Ist die Änderung bzw. Erweiterung wesentlich, dann ist, in Abhängigkeit vom Durchmesser der Leitung (genau wie bei Neubauvorhaben), entweder ein Planfeststellungs- oder Plangenehmigungsverfahren oder die Beantragung von Einzelgenehmigungen bzw. ein fakultatives Planfeststellungsverfahren für die Änderung bzw. Erweiterung durchzuführen (Umkehrschluss von § 43f Abs. 1 S. 1 EnWG).¹²

Anzeigeverfahren zur Umstellung (§ 113 c Abs. 3 EnWG): zuständige Behörde, Fristen und Unterlagen

Zuständige Behörde: Die zuständige Behörde ist in der Regel die Energieaufsichtsbehörde. Dies ist im Einzelfall zu prüfen (energierechtliche Relevanz) und ergibt sich aus den jeweiligen Zuständigkeitsverordnungen der Länder. Eine frühzeitige Kontaktaufnahme mit der Energieaufsichtsbehörde ist sehr zu empfehlen, damit das Verfahren reibungslos abläuft. Zudem muss die für die Gashochdruckleitungsverordnung zuständige Behörde einbezogen werden, da sie im Rahmen der zulassungsrechtlichen Abarbeitung der baulichen Änderungen beteiligt ist.

Fristen: Das Umstellvorhaben ist der Behörde mindestens acht Wochen vor dem geplanten Beginn der Umstellung anzuzeigen. Die zuständige Behörde kann die geplante Umstellung innerhalb einer Frist von acht Wochen beanstanden. Diese beginnt erst, wenn die erforderlichen Unterlagen und die gutachterliche Äußerung vollständig vorliegen.

Unterlagen: Der Anzeige sind alle sicherheitsrelevanten Unterlagen und eine gutachterliche Äußerung eines Sachverständigen (detailliert weiter unten beschrieben) beizufügen, die bestätigt, dass die Leitung den Anforderungen des § 49 Abs. 1 EnWG entspricht. Im Falle einer unterlassenen, fehlerhaften, unvollständigen oder nicht rechtzeitig erstatteten Anzeige, sieht § 95 Abs. 1 Nr. 1c) EnWG ein Bußgeld von bis zu 100.000 Euro vor.

Die gutachterliche Äußerung eines Sachverständigen stellt sicher, dass die Beschaffenheit der genutzten Leitung den Anforderungen nach § 49 Abs. 1 EnWG entspricht, was die Eignung der Bestandsleitung für die neue Verwendung bestätigt. Der Sachverständige muss eine kritische Prüfung und Bewertung des Sachverhalts durchführen. Dies beinhaltet die Berücksichtigung aller relevanten Vorgaben im Hinblick auf die technische Sicherheit der Anlagen, sowohl bezüglich der Errichtung als auch des Betriebs. Dabei ist sicherzustellen, dass die Vorgaben des DVGW eingehalten werden. Es muss klar erkennbar sein, dass der Sachverständige sich

¹⁰ Riege: Die Umstellung von Gasversorgungsleitungen für den Wasserstofftransport (EnWZ 2021, 389)

¹¹ Hierzu müsste auch das Ergebnis des sicherheitstechnischen Anzeigeverfahrens gem. § 113c Abs. 3 EnWG gehören.

¹² Es müsste ein öffentlicher Belang entgegenstehen. Die bisherigen Umstellungsvorhaben vollziehen sich nahezu ausschließlich auf den „Bestandsflächen“. Demzufolge gibt es keine nennenswerten neuen Betroffenen. Folglich betrifft dies nur Ausnahmefälle.

umfassend mit den Anforderungen an die Umstellung auseinandergesetzt und die vorgelegten Unterlagen gründlich nachvollzogen hat. Ein Sachverständiger für Umstellvorhaben nach § 113c Abs. 3 EnWG ist, wer gemäß § 11 GasHDrLtgV anerkannt ist und dessen individuelle Anerkennung sich auf Wasserstoffleitungen erstreckt.¹³

Energierechtliches Anzeigeverfahren (§ 43f Abs.1 S. 1 EnWG): zuständige Behörde, Fristen und Unterlagen

Zuständige Behörde: Für das energierechtliche Anzeigeverfahren ist die je nach Bundesland zuständige Planfeststellungsbehörde zuständig (z.B. Landesdirektion Sachsen, Referat 32).

Fristen: Die Behörde hat nach § 43f Abs. 4 S. 4 EnWG innerhalb von einem Monat nach der vollständigen Anzeige eine Ermessensentscheidung zu treffen über die Freistellung von einem förmlichen Verfahren oder ob ein Planfeststellungs- oder Plangenehmigungsverfahren notwendig ist. Allerdings handelt es sich hier um eine nicht sanktionsfähige Ordnungsfrist. Kann diese Frist von der Behörde (z.B. aufgrund von Kapazitätsengpässen oder fehlenden Einzelerlaubnissen) nicht eingehalten werden, gibt es keine Genehmigungsfiktion. Der Vorhabenträger muss mit dem Start der Umstellung abwarten, bis die Entscheidung erteilt wurde. Demzufolge ist die Dauer der Entscheidung meist abhängig von den Ressourcen der Behörde und der Qualität sowie dem Vorliegen der erforderlichen Unterlagen.

Unterlagen:

- Anzeige, inkl. Erläuterungsantrag (detaillierte Beschreibung des geplanten Umstellvorhabens)
- Erläuterungen zur Erfüllung der Voraussetzungen des § 43f Abs. 1-3 EnWG
- Darstellung zu erwartender Umweltauswirkungen (§ 43f Abs. 4 S. 3 EnWG)
- Bezugnahme auf bestehende Genehmigungen
- Zustimmung aller betroffenen Grundstückseigentümer / Bewirtschafter (vorbehaltlich § 43f Abs. 4 S. 5 EnWG)
- behördliche Entscheidungen bzw. Stellungnahmen der Träger öffentlicher Belange und der betroffenen Fachbehörden (insb. untere Wasserbehörde, untere Naturschutzbehörde, untere Denkmalbehörde)

Die einzureichenden Unterlagen und ihr Umfang sind von der jeweiligen Behörde, die für die Durchführung des Verfahrens zuständig ist, festzulegen. Welche Unterlagen vorzulegen sind, ist abhängig von dem spezifischen Vorhaben und wird hier nur beispielhaft aufgezählt. Von der Bezirksregierung Düsseldorf gibt es beispielsweise ein „Merkblatt zur Anzeige einer unwesentlichen Änderung einer Gasversorgungsleitung“.¹⁴

¹³ Ein Verzeichnis der nach DVGW CERT GmbH zertifizierten Personen nach G 100 (Sachverständige) ist unter [DVGW CERT GmbH: G 100 \(dvgw-cert.com\)](https://www.dvgw-cert.com) zu finden (zuletzt aktualisiert am 15.10.2024; abgerufen am 16.10.2024). Unter das FG 6 (Fachgebiet 6) fallen Gasrohrleitungen bis 16 bar und unter das FG 7 Gasrohrleitungen über 16 bar Auslegungsdruck.

¹⁴ Bezirksregierung Düsseldorf, Merkblatt zur Anzeige einer unwesentlichen Änderung einer Gasversorgungsleitung, online unter: [20190704_2_25 Energieversorgung Merkblatt Anzeige unwesentliche Aenderung-0 \(nrw.de\)](https://www.bzreg-duesseldorf.de/20190704_2_25_Energieversorgung_Merkblatt_Anzeige_unwesentliche_Aenderung-0_(nrw.de)) (Zugriff am 16.04.2025).

Planunterlagen für Feststellungsbeschluss

- Trassenverlauf im Maßstab 1 : 25 000
- grundstücksbezogene Baupläne (Grundrisse, Längsschnitte) im Maßstab 1 : 1000
- Sonderbaupläne im Maßstab 1 : 100, 1 : 250 oder 1 : 500
- Festigkeitsberechnungen für Rohre und eingebaute Rohrleitungsteile
- Angaben zur Bauausführung
- Unterlagen für die nach §4 GasHDrLtG erforderliche Anzeige (DVGW-Arbeitsblatt G 466-1)
- genau bezeichnet Förder- bzw. Transportmedium (z.B. 2.Gasfamilie nach G 260)
- Gutachterliche Stellungnahme

2.5 Durchführung der Netzumstellung

2.5.1 Hintergrund und Begriffsbestimmungen

Dieses Kapitel zielt auf die Umstellung des Netzes an sich ab. Auf Regelanlagen wird im Kapitel 2.5.7, auf Hausanschlussleitungen in Kapitel 3 eingegangen.

Neben den durchzuführenden Vorarbeiten hinsichtlich Prüfungen und Genehmigungen enthalten die DVGW-Merkblätter G 221, G 407, G 408 und G 409 [24–27] keine detaillierten Vorgaben zur praktischen Durchführung einer Umstellung von vermaschten Erdgasnetzabschnitten (Umstellbezirke) auf Wasserstoff. Die „Umstellung“ als Begriff wird lediglich als „Änderung des transportierten Mediums (...)“ definiert. Darüber hinaus ist nur die Rede von der „Inbetriebnahme“ der Wasserstoffnetze.

Die Inbetriebnahme von (Erdgas-)Netzen wird in den DVGW-Arbeitsblättern G 462, G 463, G 465-2, G 466-1 und G 614 [28–32] sowie der DIN EN 12327 / G 469 [33] behandelt. Dabei sind allgemein immer auch weitere Vorschriften zu beachten, wie z. B. DGUV Regeln und Informationen zu Arbeiten an Gasleitungen. Jedoch werden bei den Beschreibungen der Inbetriebnahme nur die Begriffe „Leitung“ bzw. „(Rohr-)Leistungsabschnitt“ verwendet.

Die DIN EN 12327 definiert...

- **Leitungsanlage** = Verbund aus Rohren und Formstücken
- **Rohrleitung** = System aus Leitungsanlagen mit allen zugehörigen Einrichtungen und Stationen bis zur Übergabestelle.

Und die G 400 [34] definiert...

- **Gasverteilnetz** = Zur Versorgung der Verbraucher erforderliches Leitungssystem einschließlich aller ober- und unterirdischer Leitungen sowie sonstiger Anlagen.
- **Leitung/Leistungen** = System aus Rohren und Formstücken

- **Leitungsabschnitt** = Teil einer Leitung mit gleichen bestandsbeschreibenden Attributen (z.B. Nennweite, Rohrwerkstoff, Rohrverbindung, Rohrumhüllung, Baujahr) oder funktionaler Trennung.
- **Rohrleitungsteile** = Teile, aus denen ein Leitungssystem bzw. eine Anlage besteht; diese sind:
 - Eigens konstruierte und gefertigte Bauteile
 - Rohre einschließlich Baustellenbögen
 - Formstücke (z.B.: T-Stücke, Reduzierstücke, Werkskrümmer, Flansche, gewölbte Böden, Schweißstutzen, lösbare Verbindungen)
 - ...

Es gibt demnach im derzeit gültigen Regelwerk keine ganzheitliche Beschreibung, wie ein vermaschtes Verteilnetz in Betrieb genommen bzw. umgestellt werden soll.

In der Praxis werden aber neu erschlossene Netzgebiete mit vermaschter Netzstruktur gebaut, geprüft und in Betrieb genommen. Die gängige Praxis der Netzbetreiber ist es, dabei die neuen Netzgebiete abschnittsweise in Betrieb zu nehmen.

Als „Leitungsabschnitt“ wird daher im Folgenden eine unverzweigte Versorgungsleitung verstanden, die z.B. von T-Stück zu T-Stück in Betrieb genommen wird. Dies stellt zudem sicher, dass es beim Umstellen keine Stellen gibt, an denen Erdgas nicht vollständig durch Wasserstoff ausgetauscht wird (Toträume). Dieses könnte sich ansonsten später mit dem Wasserstoff vermischen und den sicheren Betrieb von Gasanwendungen gefährden. Hiervon ausgenommen sind Abzweige zu Hausanschlussleitungen. Deren Umstellung wird in den Kapiteln 3 und 4 betrachtet.

Da die „Umstellung“ als Prozess nicht näher definiert ist, wird auf die regelwerkskonforme Definition der „Inbetriebnahme“ zurückgegriffen. Streng genommen kann etwas nur in Betrieb genommen werden, wenn es vorher außer Betrieb war, also entweder neu errichtet oder zuvor außer Betrieb genommen wurde. Daher muss ebenfalls die regelwerkskonforme Definition der „Außerbetriebnahme“ berücksichtigt werden.

Die DIN EN 12327 definiert...

- **Inbetriebnahme** = erforderliche Maßnahmen zur Druckbeaufschlagung einer Leitungsanlage, einschließlich Stationen, Einrichtungen und Geräten mit Betriebsgas zur anschließenden Aufnahme des Betriebs
- **Außerbetriebnahme** = erforderliche Maßnahmen zur Außerbetriebsetzung von gasgefüllten Leitungsanlagen, Stationen, Einrichtungen oder Geräten zur Abtrennung vom System

Die G 400 definiert...

- **Inbetriebnahme** = Erforderliche Maßnahmen zur erstmaligen Druckbeaufschlagung eines Leitungssystems oder von Teilen des Leitungssystems mit Gas zur anschließenden Aufnahme des Betriebs.

- **Außerbetriebnahme** = Vorrübergehende physische und gasdichte Trennung vom gasführenden Leitungssystem (zeitlich begrenzte Betriebseinstellung). Ein außer Betrieb genommenes Leitungssystem oder Teile des Leitungssystems wird bzw. werden instandhaltungstechnisch, wie ein in Betrieb befindliches Leitungssystem betrachtet.
- **Außerbetriebsetzung** = Beabsichtigte befristete Betriebseinstellung eines Leitungssystems einschließlich seiner Rohrleitungsteile oder eines Abschnittes des Leitungssystems während des Betriebs vorrangig mit dem Ziel, Instandsetzungsarbeiten innerhalb des außer Betrieb gesetzten Bereiches durchzuführen.
- **Stilllegung** = Endgültige Beendigung der Nutzung des Leitungssystems oder von Teilen des Leitungssystems, hierbei erfolgt eine physische Trennung vom übrigen Netz.

Zusammenführend wird im Folgenden unter „Inbetriebnahme“ die erstmalige Druckbeaufschlagung von „Leistungsabschnitten“ mit Betriebsgas verstanden.

Mit der Vorgabe zur physischen Trennung vom übrigen Netz entspricht die „Außerbetriebnahme“ laut DIN EN 12327 der „Stilllegung“ aus der G 400. Im Folgenden wird die „Außerbetriebnahme“ laut G 400 als vorübergehende Trennung vom übrigen Leitungssystem verstanden.

Gemäß G 465-2 bzw. DIN EN 12327 sind „Leistungsabschnitte“ „frei von brennbaren Gasen zu machen“ bzw. zu „spülen“. „Spülung“ ist gemäß DIN EN 12327 der „Vorgang zur sicheren Verdrängung von Luft oder Inertgas in Leitungsanlagen und Einrichtungen durch Gas oder umgekehrt.“

Eine Umstellung von Leitungen kann regelwerkskonform also nur durchgeführt werden, als Kombination aus Außerbetriebnahme mittels Spülen mit Luft oder Inertgas und der Inbetriebnahme gemäß der genannten DVGW-Arbeitsblätter.

In den Forschungsprojekten *H2Direkt* und *H₂-Wärmeinsel Linnich* wurden 1,2 km bzw. 130 m Rohrleitungen zunächst mit Stickstoff inertisiert [35]. Der Aufwand hierfür wäre bei einer großflächigen Umstellung eines Netzes mit mehreren hundert Kilometern Leitung jedoch sehr groß.

Außerdem ist davon auszugehen, dass nicht genügend Absperrarmaturen vorhanden sind, um jeden Leistungsabschnitt einzeln absperren zu können. An den meisten Abzweigen werden daher neue oder temporäre Absperrungen mit den entsprechenden Tiefbauarbeiten notwendig sein.

Dies soll im Folgenden anhand eines beispielhaften Nieder- oder Mitteldruck-Umstellbezirks mit einer Leitungslänge von 3,6 km und 300 Hausanschlüssen gezeigt werden. Hierbei müssen gemäß DGUV 203-090 [36] und G 465-2 beim Entspannen oder Spülen von Gasleitungen austretendes Gas gefahrlos abgeführt werden.

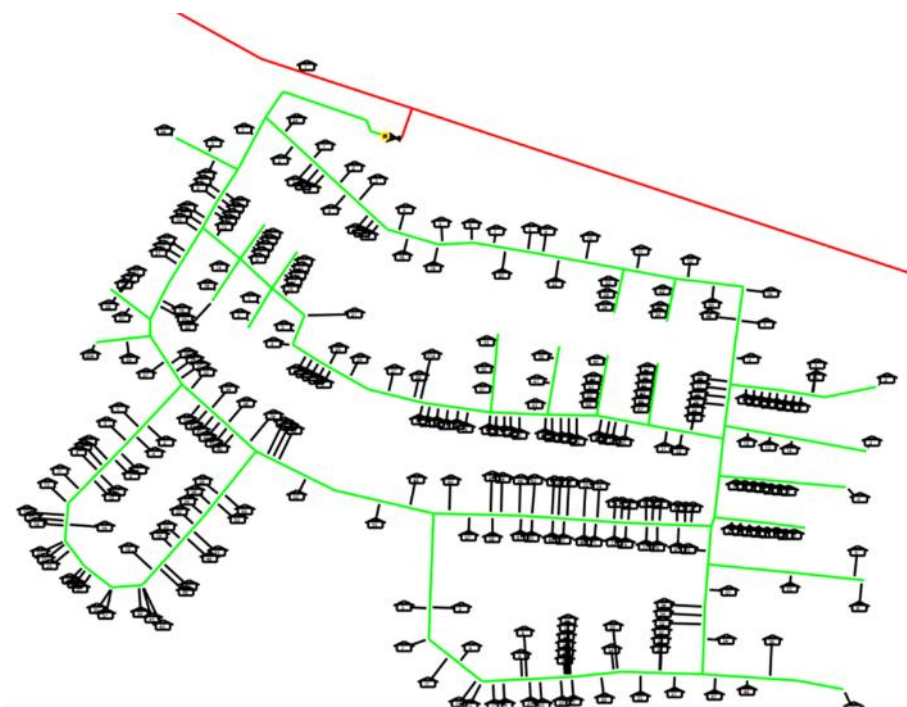


Abbildung 2.6: Beispiel-Umstellbezirk

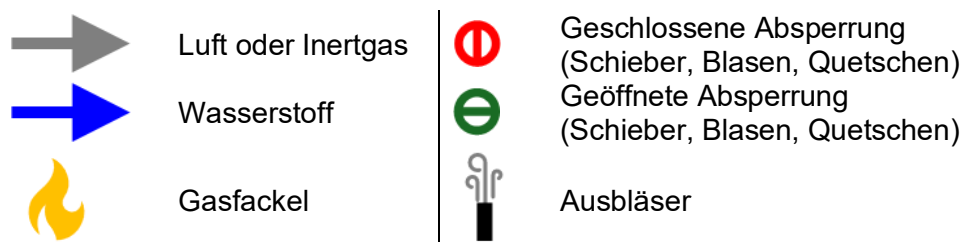
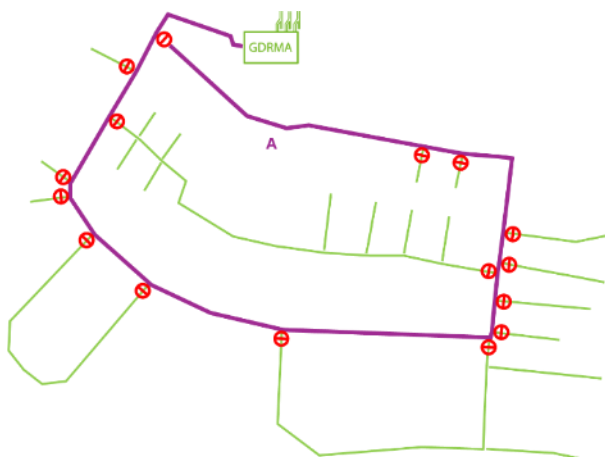


Abbildung 2.7: Legende für Beschreibung der Umstellung der Leitungen

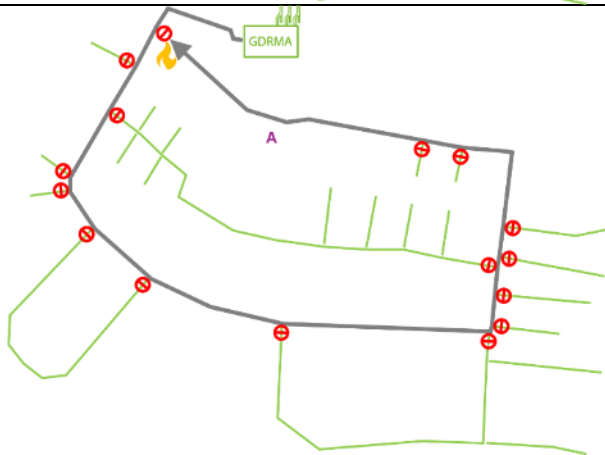
2.5.2 Umstellung der Leitungen mit indirekter Spülung: Erdgas – Stickstoff – Wasserstoff



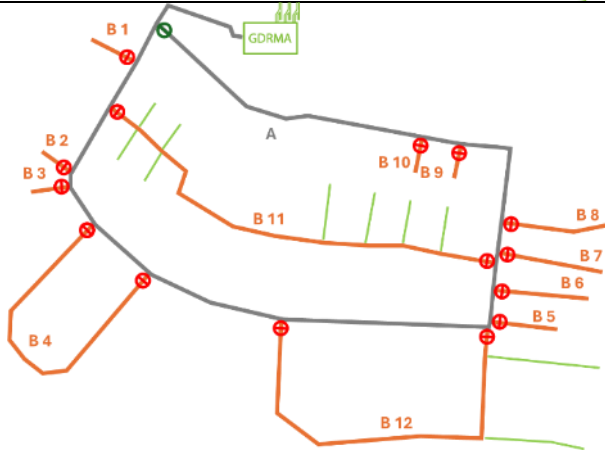
1. Festlegen des ersten Leitungsabschnitts → **A**

2. Absperrn aller Abzweigungen von Leitungsabschnitt **A**

(16 Absperrungen)

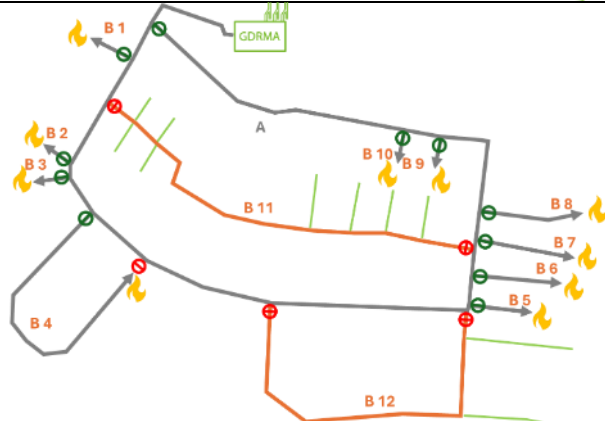


3. Erdgas am Ende des Leitungsabschnitts **A** abfackeln und Leitungsabschnitt inertisieren

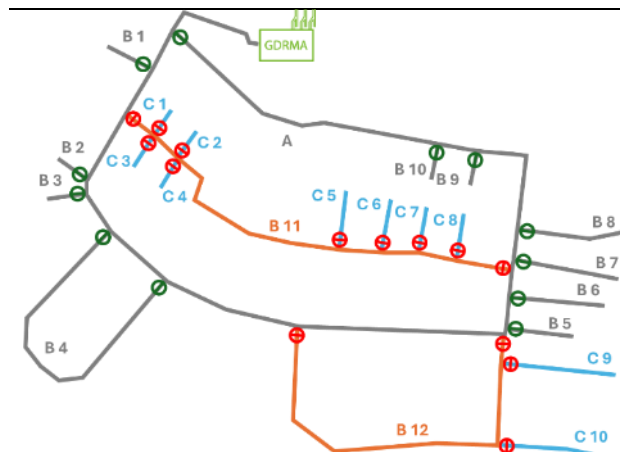


4. Festlegen der folgenden Leitungsabschnitte ausgehend von Abzweigungen von Leitungsabschnitt **A** → **B 1 – B 12**

5. Öffnen von Absperrung zur Wiederherstellung der Masche von Leitungsabschnitt **A**



6. Nacheinander die Absperrungen der Leitungsabschnitte **B 1 – B 10** öffnen, Erdgas an den Enden abfackeln und Leitungsabschnitte inertisieren

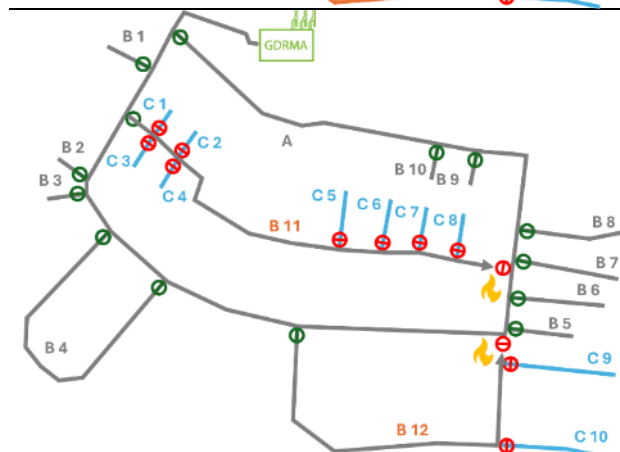


7. Öffnen von Absperrung zur Wiederherstellung der Masche von Leitungsabschnitt **B 4**

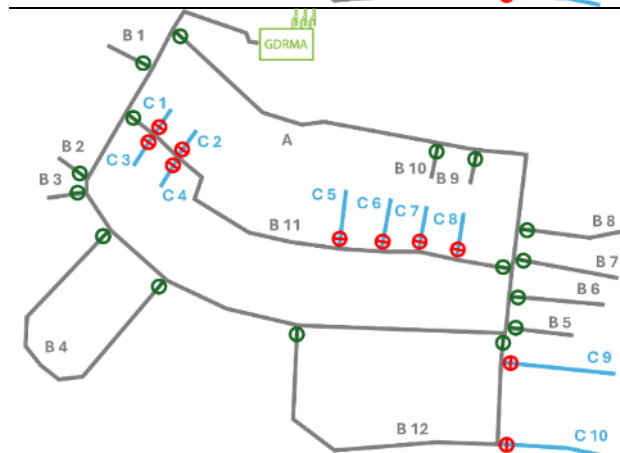
8. Festlegen der folgenden Leitungsabschnitte ausgehend von Abzweigungen der Leitungsabschnitte **B → C 1 – C 10**

9. Absperrn aller Abzweigungen von Leitungsabschnitten **B**

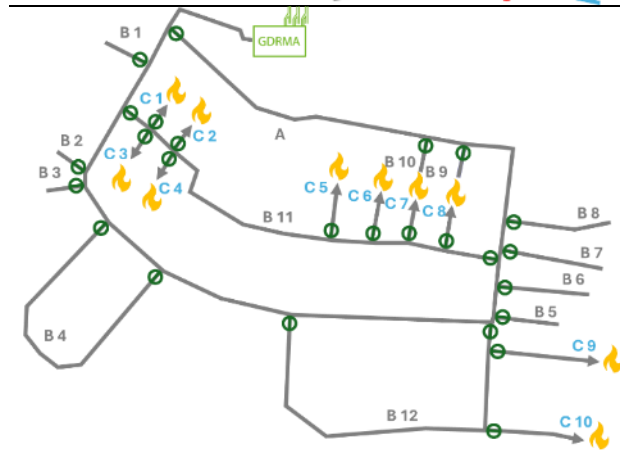
(26 Absperrungen)



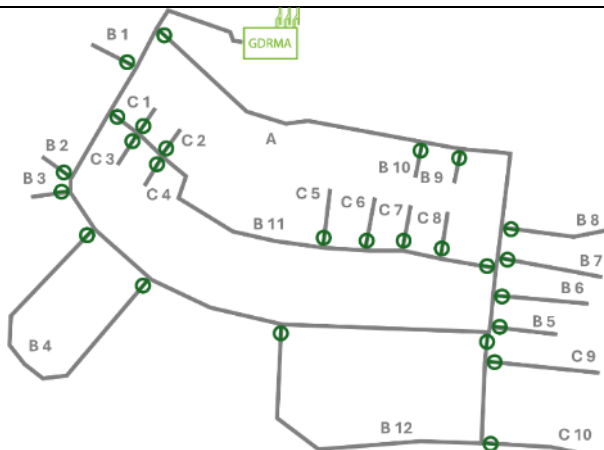
10. Nacheinander die Absperrungen der Leitungsabschnitte **B 11 – B 12** öffnen, Erdgas an den Enden abfackeln und Leitungsabschnitte inertisieren



11. Öffnen von Absperrungen zur Wiederherstellung der Maschen der Leitungsabschnitte **B 11 – B 12**

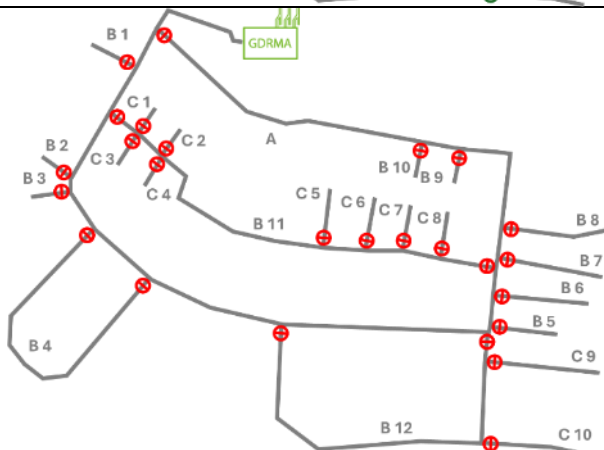


12. Nacheinander die Absperrungen der Leitungsabschnitte **C 1 – C 10** öffnen, Erdgas an den Enden abfackeln und Leitungsabschnitte inertisieren

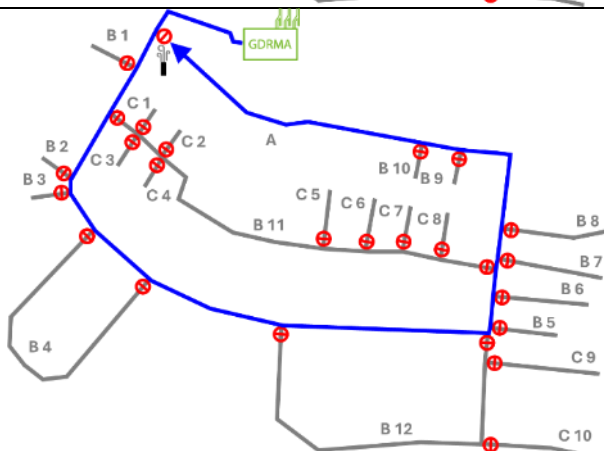


13. Umstellbezirk vollständig außer Betrieb genommen

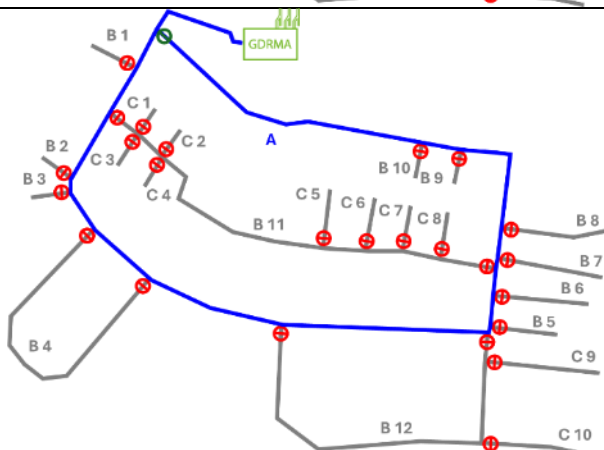
Hausanschlüsse an bereits außer Betrieb genommenen Leitungsabschnitten könnten ebenfalls schon außer Betrieb genommen werden, während nachfolgende Leitungsabschnitte noch außer Betrieb genommen werden.



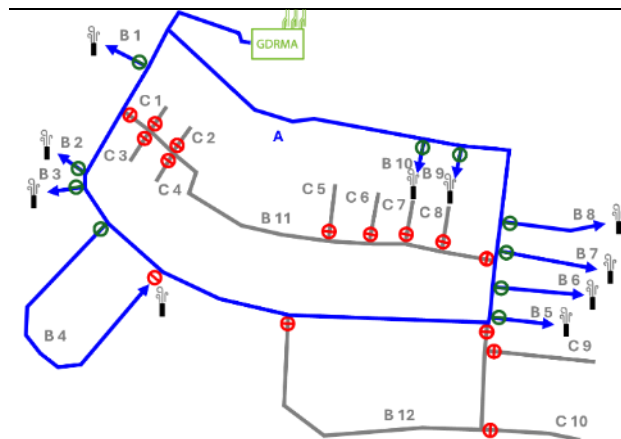
14. Schließen aller Absperrungen



15. Befüllen des Leitungsabschnitts **A** mit Wasserstoff & Ausblasen des Stickstoffs am Ende des Leitungsabschnitts **A** bis Gasreinheit des Wasserstoffs gemessen wird

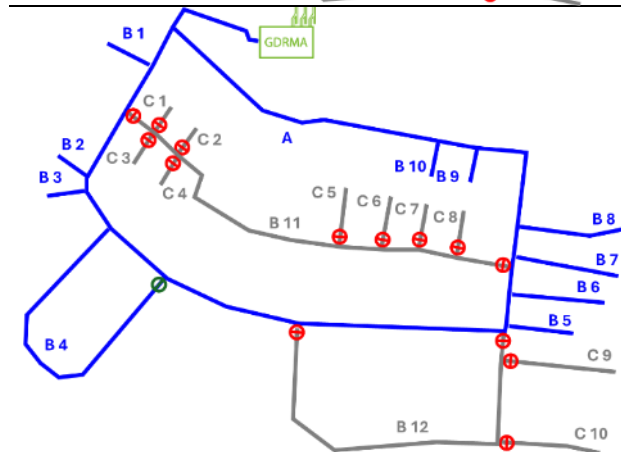


16. Öffnen von Absperrung zur Wiederherstellung der Masche von Leitungsabschnitt **A**



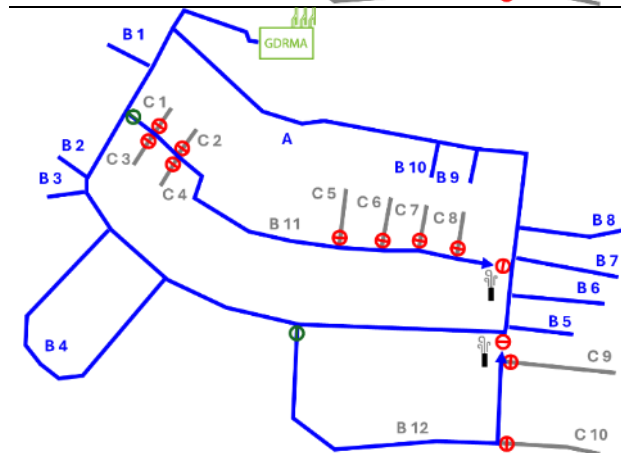
17. Nacheinander die Absperrungen der Leitungsabschnitte **B 1 – B 10** öffnen, mit Wasserstoff befüllen und den Stickstoff an den Enden der Leitungsabschnitte ausblasen, bis Gasreinheit des Wasserstoffs gemessen wird

(25 Absperrungen)



18. Öffnen von Absperrungen zur Wiederherstellung der Masche von Leitungsabschnitt **B 4**

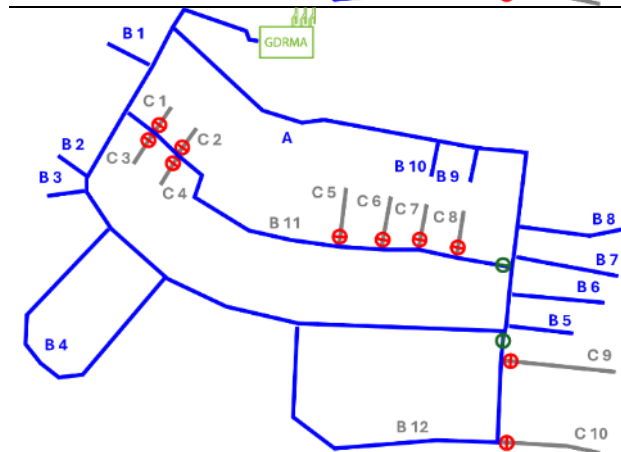
(14 Absperrungen)

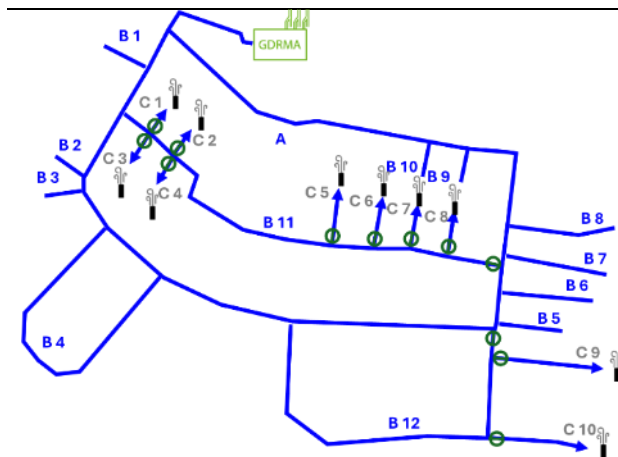


19. Nacheinander die Absperrungen der Leitungsabschnitte **B 11 – B 12** öffnen, mit Wasserstoff befüllen und den Stickstoff an den Enden der Leitungsabschnitte ausblasen, bis Gasreinheit des Wasserstoffs gemessen wird

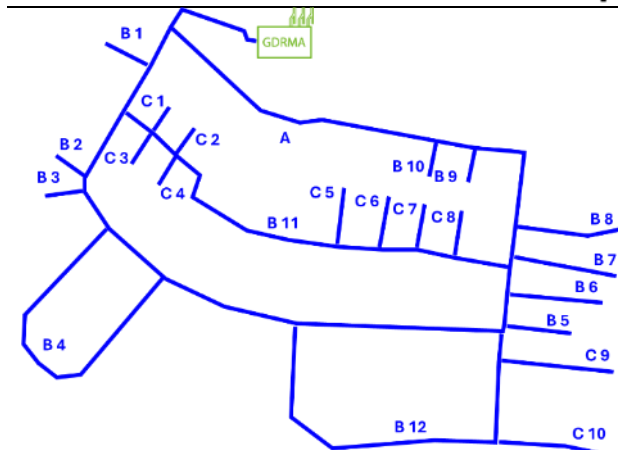
20. Öffnen von Absperrungen zur Wiederherstellung der Maschen der Leitungsabschnitte **B 11 – B 12**

(12 Absperrungen)





21. Nacheinander die Absperrungen der Leitungsabschnitte **C 1 – C 10** öffnen, mit Wasserstoff befüllen und den Stickstoff an den Enden der Leitungsabschnitte ausblasen, bis Gasreinheit des Wasserstoffs gemessen wird



22. Umstellbezirk vollständig umgestellt

Hausanschlüsse an bereits umgestellten Leitungsabschnitten könnten ebenfalls schon umgestellt werden, während nachfolgende Leitungsabschnitte noch umgestellt werden.

2.5.3 Umstellung der Leitungen mit direkter Spülung: Erdgas - Wasserstoff

Obwohl das aktuelle Regelwerk dies nicht mehr beinhaltet, gibt es älteres Regelwerk von der Umstellung von (wasserstoffreichem) Stadtgas auf Erdgas. Die Brenngase wurden auch ohne vorheriges Spülen und außer Betrieb nehmen direkt gegeneinander getauscht. In der TGL 190-356/09 aus dem Jahr 1986 [37] heißt es dazu:

„5.4 Durchführung des Gasartwechsels

Mit dem Gasartwechsel darf erst begonnen werden nach Vorliegen der „Freigabe Gas“ nach TGL 30451/05.

Während des Gasartwechsels ist eine ständige Druckhaltung im Gasrohrnetz zu gewährleisten.

Der Gasartwechsel ist ohne Schließung der Hauptabsperreinrichtung durchzuführen.

Das Gasrohrnetz des umzustellenden Gebiets ist von Stadtgas-Rohrnetz zuverlässig zu trennen. Eine Trennung des umzustellenden Gasrohrnetzes von Stadtgas-Rohrnetz durch Absperrblasen oder Trennschieber ist nicht zulässig.

Durch Druckmessungen in den angrenzenden, abgetrennten Gebieten ist die zuverlässige Trennung nachzuweisen.

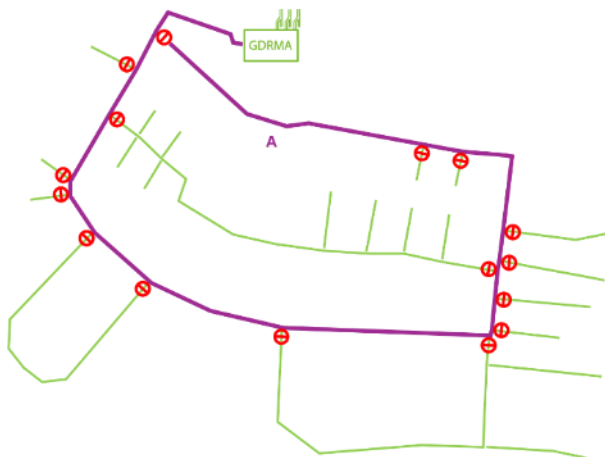
An allen End- und exponierten Stellen des umzustellenden Gasrohrnetzes sind Abfackelrohre mit Absperrorganen so einzubauen, daß beim Abfackeln des Gases andere Anlagen, Gebäude oder Personen nicht gefährdet werden können.

An den Einspeisestellen des umzustellenden Gasrohrnetzes ist die Druckhaltung im Gasrohrnetz während des Gasartwechsels durch Meßgeräte zu kontrollieren.

Der Gasartwechsel ist im Gasrohrnetz als beendet anzusehen, wenn beim Abfackeln

an Endstellen das typische Erdgasflambild erkennbar ist und mittels Prüfpumpe bei vorgeschaltetem Kohlevorsatzröhrchen ein CO-Anteil $\leq 1,0$ Vol.-% gemessen oder der Gasartwechsel mittels Gasspürgerät URSALYT SG nachgewiesen wird.“

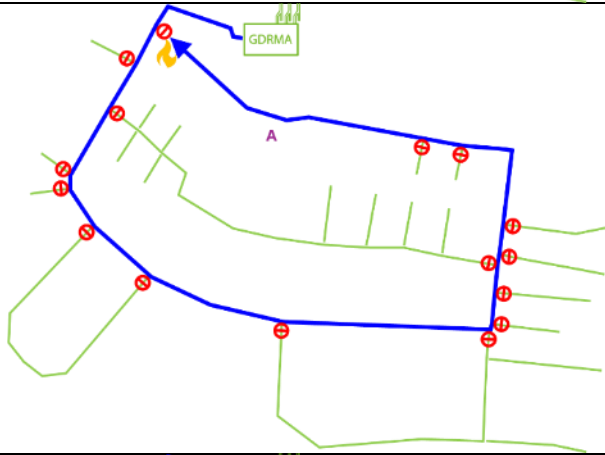
Ein solches Vorgehen würde die notwendige Zeit zum Umstellen eines Umstellbezirks erheblich verkürzen und ist im Folgenden dargestellt.



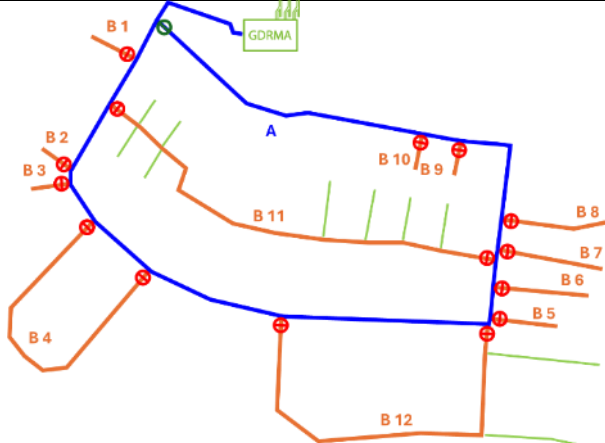
1. Festlegen des ersten Leitungsabschnitts → **A**

2. Absperren aller Abzweigungen von Leitungsabschnitt **A**

(16 Absperrungen)

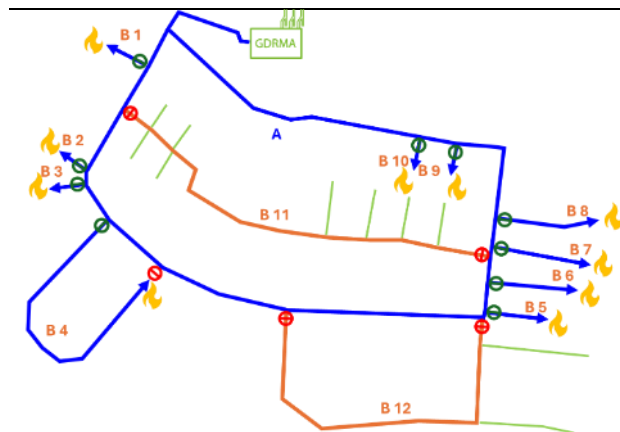


3. Befüllen des Leitungsabschnitts **A** mit Wasserstoff & Abfackeln des Erdgases am Ende des Leitungsabschnitts **A**, bis Flammenänderung eintritt und/oder Gasreinheit des Wasserstoffs gemessen wird



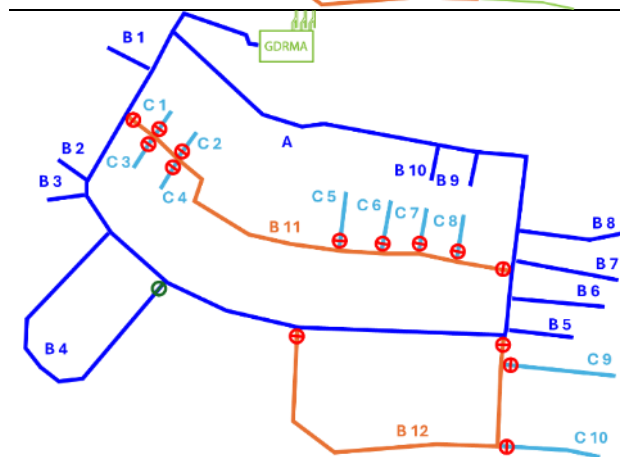
4. Festlegen der folgenden Leitungsabschnitte ausgehend von Abzweigungen von Leitungsabschnitt **A** → **B 1 – B 12**

5. Öffnen von Absperrung zur Wiederherstellung der Masche von Leitungsabschnitt **A**



6. Nacheinander die Absperrungen der Leitungsabschnitte **B 1 – B 10** öffnen und Erdgas an den Enden abfackeln, bis Flammenänderung eintritt und/oder Gasreinheit des Wasserstoffs gemessen wird

(15 Absperrungen)

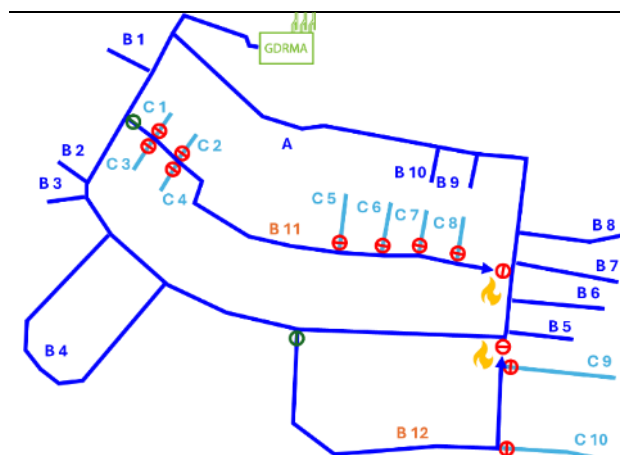


7. Öffnen von Absperrung zur Wiederherstellung der Masche von Leitungsabschnitt **B 4**

8. Festlegen der folgenden Leitungsabschnitte ausgehend von Abzweigungen der Leitungsabschnitte **B**
→ **C 1 – C 10**

9. Absperrn aller Abzweigungen von **B**

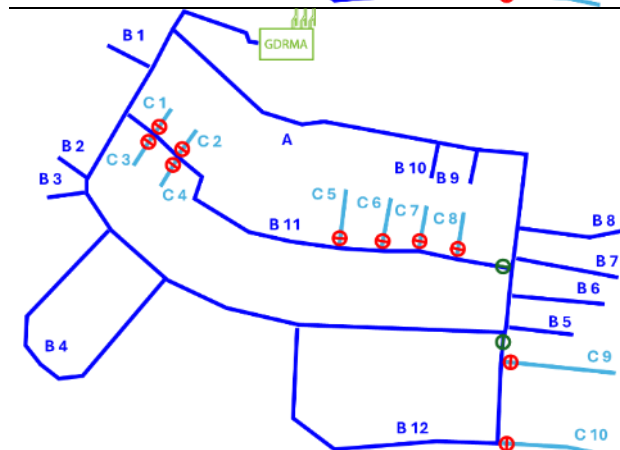
(15 Absperrungen)

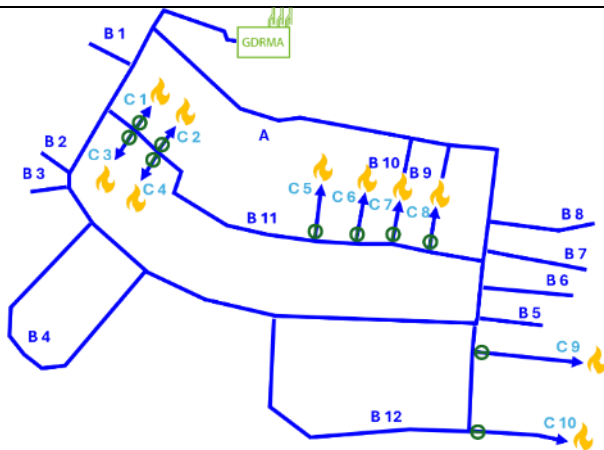


10. Nacheinander die Absperrungen der Leitungsabschnitte **B 11 – B 12** öffnen und Erdgas an den Enden abfackeln, bis Flammenänderung eintritt und/oder Gasreinheit des Wasserstoffs gemessen wird

11. Öffnen von Absperrungen zur Wiederherstellung der Maschen der Leitungsabschnitte **B 11 – B 12**

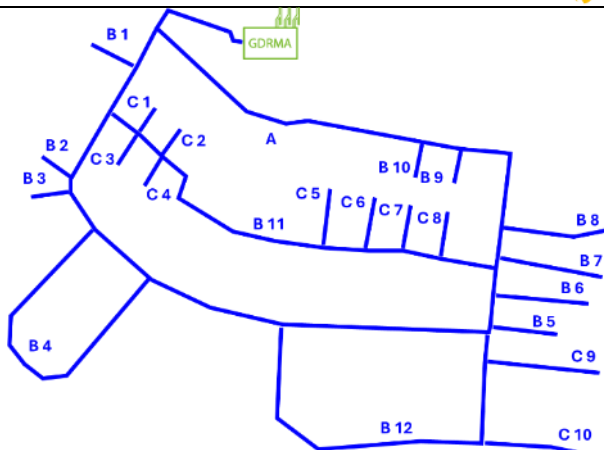
(12 Absperrungen)





12. Nacheinander die Absperrungen der Leitungsabschnitte **C 1 – C 10** öffnen und Erdgas an den Enden abfackeln, bis Flammenänderung eintritt und/oder Gasreinheit des Wasserstoffs gemessen wird

(10 Absperrungen)



13. Umstellbezirk vollständig umgestellt

Hausanschlüsse an bereits umgestellten Leitungsabschnitten könnten ebenfalls schon umgestellt werden, während nachfolgende Leitungsabschnitte noch umgestellt werden.

Unabhängig davon, welche Art der Absperrung verwendet wird (Absperrarmatur, Blasensetzen, Abquetschen), fallen für jede Absperrung mindestens die Tiefbaukosten an. Beim direkten Spülen mit Wasserstoff werden im beispielhaften Umstellbezirk gleichzeitig nur noch höchstens 15 Absperrungen benötigt, im Vergleich zu den 26 gleichzeitig benötigten Absperrungen, wenn zunächst mit Stickstoff inertisiert werden muss. Dieses Vorgehen würde hochgerechnet auf das gesamte Netzgebiet eine deutlich geringere Anzahl an gleichzeitig anzubringender Absperrungen benötigen, was, zusätzlich zum nicht benötigten Stickstoff, ebenfalls Zeit und Kosten einsparen kann.

Es wäre nach derzeitigem Stand, wie oben erläutert, jedoch nicht regelwerkskonform. Für dieses vereinfachte Verfahren zur Umstellung der Leitungen müssten das DVGW- und andere Regelwerke entsprechend angepasst bzw. ergänzt werden.

Die ONTRAS Gastransport GmbH hat im Rahmen der Forschung im Reallabor Energiepark Bad Lauchstädt 25 km Transportleitung erfolgreich mit direkter Spülung von Erdgas auf Wasserstoff umgestellt [38].

2.5.4 Spülgeschwindigkeiten

Im Anhang A der DIN EN 12327 sind minimale Spülgeschwindigkeiten für den Austausch von Luft / Inertgas durch Erdgas oder umgekehrt aufgeführt. Diese liegen für Leitungsdurchmesser von 150 bis 1.200 mm zwischen 0,6 und 1,7 m/s und max. 20 m/s sollte nicht überschritten werden. Die G 465-2 erwähnt Praxiswerte von 3 bis 7 m/s und laut DGUV 203-090 „sollten (die Strömungsgeschwindigkeiten) *mindestens über 3 m/s (um Schichtbildung im Rohr zu*

vermeiden) liegen und nicht mehr als 7 m/s (um das Aufwirbeln vorhandener Partikel in der Leitung zu vermeiden) betragen.“

Minimale Spülgeschwindigkeiten beruhen auf dem Unterschied der Dichten von Erdgasen und Luft / Stickstoff, um Schichtbildung der unterschiedlichen Gase in den Leitungen zu vermeiden. Typische Erdgase nach G 260 haben laut Anhang A eine Dichte von $\sim 0,81 \text{ kg/m}^3$ und Stickstoff hat eine Dichte von $1,25 \text{ kg/m}^3$.

Da der Unterschied bei Wasserstoff mit seiner Dichte von $0,0899 \text{ kg/m}^3$ deutlich größer ist, wurden in einer studentischen Projektarbeit am DBI mittels CFD-Simulationen erste Untersuchungen vorgenommen, welche minimale Spülgeschwindigkeit beim Spülen von mit Erdgas gefüllten Leitungen mit Wasserstoff notwendig ist, um eine Schichtbildung zu vermeiden. Die Ergebnisse für eine DN 300 Versorgungsleitung mit angeschlossener DN 50 Hausanschlussleitung und einem Betriebsdruck von 50 mbar sind in Abbildung 2.8 zusammengefasst und lassen zunächst den Schluss zu, dass beim Spülen mit Wasserstoff höhere Spülgeschwindigkeiten eher zu dem gewünschten Ergebnis führen. Die minimale Spülgeschwindigkeit hängt von den Parametern der zu spülenden Leitung ab, die unten dargestellten 5 m/s sind somit als Beispiel / Tendenz zu verstehen.

Dies wäre bei der Durchführung der Umstellung von Leitungsabschnitten auf Wasserstoff zu berücksichtigen und ggf. durch Messungen am Ende der Leitungsabschnitte zu überprüfen.

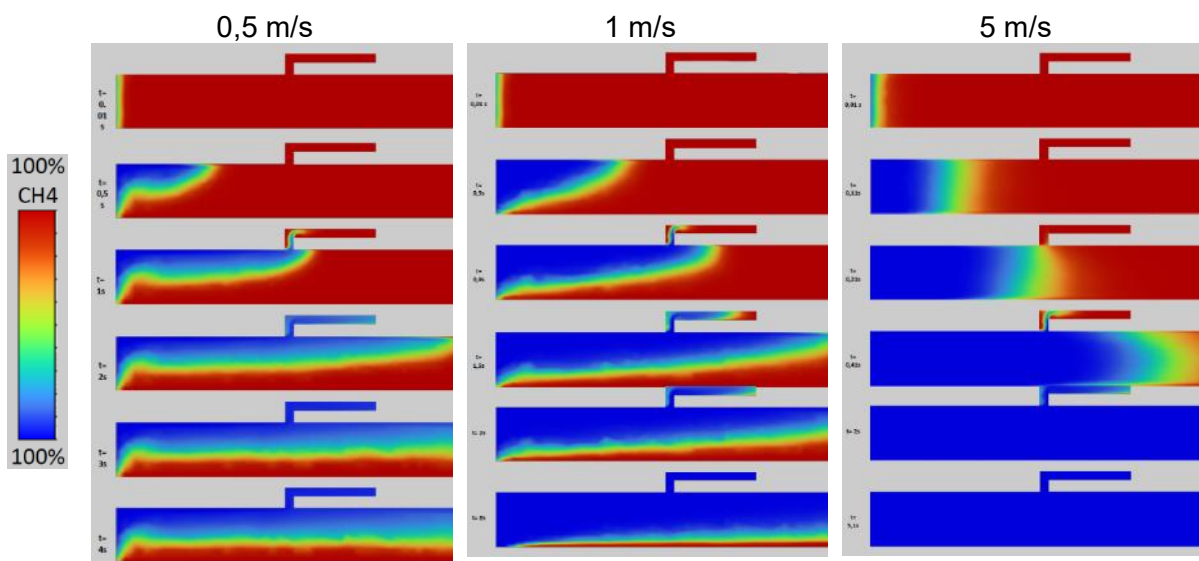


Abbildung 2.8: CFD-Simulation Spülgeschwindigkeiten Wasserstoff-Erdgas

Weitere Untersuchungen mittels CFD-Simulationen finden für Hochdruck-Transportleitungen derzeit im DVGW Forschungsprojekt „H₂-Vent“ [39, 40] statt. Eine umfangreichere Betrachtung für Verteilnetzleitungen müsste noch erfolgen.

2.5.5 Ausblasen und Abfackeln von Gas während der Umstellung

Für beide Verfahren wäre zu beachten, dass die EU-Verordnung 2024/1787 *über die Verringerung der Methanemissionen im Energiesektor* Beschränkungen für das Ausblasen und Abfackeln beinhalten. Allerdings sind Ausnahmen enthalten:

Artikel 15 – Beschränkungen für das Ausblasen und Abfackeln

- (1) **Das Ausblasen ist** außer unter den in diesem Artikel genannten Umständen **verboten**. Routinemäßiges **Abfackeln ist verboten**.
- (2) Das Ausblasen oder Abfackeln ist nur in einem Notfall oder bei einer Betriebsstörung erlaubt.
- (3) Unbeschadet des Absatzes 2 **ist das Ausblasen oder Abfackeln erlaubt, wenn es unvermeidbar und unbedingt notwendig ist** und die Berichterstattungspflichten nach Artikel 16 eingehalten werden.

Das Ausblasen und Abfackeln gilt in den folgenden spezifischen Situationen als unvermeidbar und unbedingt notwendig, in denen ein Ausblasen bzw. Abfackeln nicht vollständig vermieden werden kann oder aus Sicherheitsgründen erforderlich ist:

- e) **während der** Reparatur, Wartung, Testverfahren und **Außerbetriebnahme**, einschließlich Abblasen und Drucklosmachen, um Reparatur und Wartung durchführen zu können;
 - j) **während der Inbetriebnahme von Rohrleitungen**, Ausrüstung oder Anlagen, jedoch nur solange dies notwendig ist, um Verunreinigungen, die in die Rohrleitung oder Ausrüstung gelangt sind, herauszuspülen;
 - k) während des Molchens, **des Abblasens einer Leitung zum Zweck** der Reparatur, während der **Außerbetriebnahme** oder des Durchspülens einer Leitung zum Zweck der Reparatur oder Wartung, jedoch nur, wenn das Gas nicht eingeschlossen oder in einen nicht betroffenen Teil der Leitung umgeleitet werden kann.
- (4) In den Fällen, in denen Ausblasen gemäß den Absätzen 2 und 3 erlaubt ist, **erfolgt das Ausblasen durch die Betreiber nur dann, wenn das Abfackeln technisch nicht durchführbar ist, weil die Flamme nicht entzündet oder aufrechterhalten werden kann, die Sicherheit des Betriebs oder des Personals gefährdet oder in Bezug auf die Emissionen schlechtere Umweltauswirkungen hätte.** (...)
 - (5) Ausrüstung zum Ausblasen wird durch nicht emittierende Alternativen ersetzt, **wenn diese auf dem Markt erhältlich sind** und den gemäß Artikel 32 festgelegten Standards oder technischen Vorschriften für Komponenten, die für das Ausblasen ausgelegt sind, entsprechen.
 - (6) Zusätzlich zu den Bedingungen gemäß den Absätzen 2 und 3 **ist Abfackeln nur erlaubt, wenn eine Wiedereinspeisung, Nutzung vor Ort, Lagerung zur späteren Nutzung oder Weiterleitung des Methans an einen Markt aus anderen Gründen als wirtschaftlichen Erwägungen nicht durchführbar ist.** (...)

Dem Wortlaut der Verordnung entsprechend wäre das Abfackeln nur für das kombinierte Umstellverfahren mit Außer- und Inbetriebnahme der Leitungsabschnitte erlaubt, da das direkte

Ersetzen von Erdgas durch Wasserstoff – also der Begriff der „Umstellung“ - keine der genannten Ausnahmen Betriebsstörung, Reparatur, Wartung, Außer- oder Inbetriebnahme ist, für die Abfackeln erlaubt ist.

Dies müsste bei einer eventuellen Anpassung des DVGW-Regelwerks für das beschriebene verkürzte Umstellverfahren bei der Definition einer „Umstellung“ berücksichtigt werden, damit das Abfackeln hierbei nicht gegen die EU-Verordnung verstößt. Alternativ müsste die EU-Verordnung um die Ausnahme des „Umstellens“ ergänzt werden.

Für Wasserstoffemissionen gibt es derzeit noch keine vergleichbaren Verordnungen oder Restriktionen.

2.5.6 Umstellung der Leitungen des vorgelagerten Hochdruck-Verteilnetzes

Ein vorgelagertes Hochdruck-Verteilnetz (in Abbildung 2.9 links: rote Leitungen) müsste analog zu der vorherigen Beschreibung für Nieder- oder Mitteldruckverteilnetze (in Abbildung 2.9 links: grüne und blaue Leitungen) in Leitungsabschnitte aufgeteilt und nacheinander mit einer der beiden beschriebenen Varianten auf Wasserstoff umgestellt werden. Für die Aufteilung eignen sich Schiebergruppen, die üblicherweise an Abzweigen oder vor Gasdruckregelanlagen bereits vorhanden sind.



Abbildung 2.9: Aufteilung HD-Verteilnetz

Die Anzahl und Lage der Gasdruckregelanlagen hat daher einen erheblichen Einfluss auf die Gestaltung der Umstellbezirke sowie auf die Reihenfolge der Umstellung der Bezirke und der Hochdruckleitungsabschnitte.

2.5.7 Umstellung der Gasdruckregelanlagen

Vorhandene Gasdruckregelanlagen werden bei der Umstellung von vermaschten Netzen die primären Ausgangspunkte für die Gestaltung der Umstellbezirke sein, da sie den Wasserstoff in die umzustellenden Bezirke einspeisen werden.

Die Umstellung von Gasdruckregelanlagen auf Wasserstoff sollte also während der Umstellung der eingangsseitigen (Hochdruck-)Leitung vorbereitet werden und muss vor Beginn der Umstellung des ausgangsseitigen Umstellbezirks abgeschlossen sein.

Da beim Wechsel der Gasfamilie gemäß G 221 sowie G 407, G 408 und G 491 bzw. durch den Austausch nicht wasserstofftauglicher Bauteile eine wesentliche Änderung vorliegt, müssen die Anlagen entsprechend neu (druck-)geprüft und abgenommen. Da das Erdgas dabei

voraussichtlich bereits entfernt wurde, kann der Wasserstoff bei der (Wieder-) Inbetriebnahme der Anlage als neues Betriebsgas eingelassen werden.

3 Umstellung Gashausinstallation und industrielle Leitungen

In diesem Kapitel erfolgt zunächst die Dokumentation der am GWI installierten H₂-Infrastruktur. Diese Infrastruktur dient neben der Versorgung aller angeschlossenen Abteilungen des GWI mit Wasserstoff ebenfalls nachgelagerten Untersuchungen. In Kapitel 3.1 und 3.1 werden die Hausinstallation betreffenden Untersuchungen gemäß ihrem Aufbau, der Methodik und der Ergebnisse bewertet. In Kapitel 3.3 erfolgt dann eine Auswertung der bereits im Regelwerk vorhandenen und definierten Anforderungen vor und während der Umstellung im Hinblick auf eine reine Wasserstoffanwendung. Einzelne Komponenten der Hausinstallation werden betrachtet und bewertet. Daran schließt sich ein Ausblick auf die Umstellung von industriellen Werksnetzen auf Wasserstoff in Kapitel 3.5 an.

3.1 Aufbau der Wasserstoffinfrastruktur am GWI

Begleitend zur Definition eines möglichen Umstellprozess von Erdgas auf Wasserstoff, findet am GWI die Installation einer Wasserstoffinfrastruktur statt. Mit Hilfe dieser Infrastruktur soll der Umstellprozess und das zukünftige Wasserstoffnetz abgebildet werden. Berücksichtigt werden neben den Netzabschnitten über das Werkgelände des GWI mit Speicher, Übergabestation, erdverlegten und freiverlegten Leitungen, Gasdruckregelanlage und Netz- bzw. Hausanschluss auch eine vergleichbare Hausinstallation von Endkunden auf Basis der TRGI bzw. G 655 im Demo-Haus. Dabei werden im Netz verschiedene Druckbereiche abgebildet, teilweise unterschiedliche Verbindungsmethoden eingesetzt und ein ungleichmäßiger Verbrauch verschiedener Abnehmer erreicht. So wird neben der eigentlichen Hausinstallation ebenfalls eine Art Verteilnetz in kleinem Maßstab abgebildet. Auch hier werden Erkenntnisse gewonnen, welche die Voraussetzung schaffen, Handlungsempfehlungen zur Vereinfachung der Umstellung direkt aus der Praxis abzuleiten.

Das GWI bietet auf seinen rund 13.000 m² Platz für Untersuchungen zu diversen Energieträgern und Energieumwandlungsprozessen. Neben dem LNG-Tank und der europaweit größten erdgasbetriebenen SOFC-Brennstoffzelle wird ein ca. 45 m³ H₂-Speicher das Energieportfolio erweitern. Versorgt werden neben 4 Abteilungen auch das Demo-Haus sowie die zu Testzwecken modular aufgebaute Gasdruckregelanlage für das Forschungsprojekt HySpeed.

Als Ergebnis der Bewertung der Platzverhältnisse kann der Speicherstandort nach dem Ausschlussverfahren definiert werden. Maßgebend für den Aufstellort sind die zu berücksichtigenden Explosionsschutzzonen sowie der Abstand zu möglichen, weiteren Baumaßnahmen.



Abbildung 3.1: Die H₂-Infrastruktur am GWI

Unter Berücksichtigung der genannten Maßgaben, stellt die Fläche am Parkplatz des GWI, einseitig eingegrenzt durch die SOFC-Brennstoffzelle, den Aufstellungsort dar. Da ein großer Teil der Energieinfrastruktur des GWI bereits unterirdisch verlegt wurde, entschied man sich auch an dieser Stelle, einige Teile der Versorgungsleitungen unterirdisch auszuführen.

Nach den erforderlichen Abstimmungsgesprächen können alle angeschlossenen Abteilungen ihre Anforderungen hinsichtlich des benötigten Drucks und des Volumenstroms definieren. Durch die Unterstützung und Rohrnetzberechnung des Rohrleitungsbauers werden die erforderlichen Rohrleitungsquerschnitte und -längen festgelegt. Für vorzusehende, ggf. nachträglich einzubauende Armaturen (Kugelhähne, Abzweigungen, Gaszähler, etc.) werden Platzhalter eingefügt.

Die Befüllung des H₂-Speichers wird durch einen Tankwagen erfolgen. Da nicht alle Verbraucher durchgehend in Volllast betrieben werden, kann der regelmäßige Füllzeitpunkt gegenwärtig noch nicht final bestimmt werden. Es wird davon ausgegangen, dass eine wöchentliche Befüllung den durchschnittlichen Bedarf decken wird.

H₂-Speicher und Gasdruckregelanlage stellen eine gemeinsame Schnittstelle dar, welche nach der Erstellung der Fundamente durch ein Unternehmen umgesetzt und dem GWI schlüsselfertig übergeben werden soll.



Abbildung 3.2: H₂-Speicher-Standort

Wie in obiger Abbildung 3.2 zu erkennen, befindet sich das Fundament zum Zeitpunkt der Berichtserstellung noch im Bau und die Lieferung des Speichers erfolgt zum Projektabschluss, sodass an dieser Stelle nicht die finale Aufstellungssituation gezeigt werden kann. Aufgrund der durchwachsenen Bodenbeschaffenheit muss der Boden zunächst zusätzlich verdichtet werden, bevor das stark bewehrte Betonfundament gegossen werden kann. Parallel dazu verschiebt sich auch die Herstellung des Gasdruckregelanlage-Fundamentes.



Abbildung 3.3: Gasdruckregelanlage-Standort

Die Gasdruckregelanlage wird auf dem in Abbildung 3.3 fotografierten Grünstreifen des hinteren Parkplatzes aufgestellt. Die Verbindung der Gasdruckregelanlage zu dem Wasserstoffspeicher erfolgt unterirdisch, welche in korrosionsgeschütztem ummanteltem 2" Kupferrohr ausgeführt wurde. Es handelt sich dabei um eine Schnittstelle, welche von einem Fremdanbieter betreut und umgesetzt wird. Nach Rücksprache mit dem GWI erfolgt der Anschluss an die H₂-Infrastruktur sowie die finale Inbetriebnahme. Die Beladung des Speichers erfolgt dabei mit einem Fülldruck von ungefähr 40 bar und wird auf Grundlage des gemittelten, voraussichtlichen Verbrauchs jede Woche erfolgen. Da die Anlage im Druckbereich größer 5 bar sowie einem Auslegungsvolumenstrom größer 200 m³/h operiert, obliegt dem ausführenden Unternehmen die Pflicht, Nachweise über die Eignung gemäß DVGW-Arbeitsblatt G 491 zu führen und dem GWI als Projektdokumentation zur Verfügung zu stellen.

Die Leitungsführung ab der Gasdruckregelanlage wird durch das GWI nach G 462 oder G 472 für die erdverlegten Leitungen und G 614-1 für die freiverlegten Leitungen sowie G 459-1, -2 für den Netz- bzw. Hausanschluss geplant und von entsprechend qualifizierten Unternehmen umgesetzt. Alternativ zur Rohrführung an der Hauswand, bietet sich eine Verlegung über das Dach an. Im Hinblick auf zukünftige Dachsanierungen, PV-Installationen sowie dem an der Hauswand ausreichend zur Verfügung stehenden Platz, wird von dieser Möglichkeit jedoch Abstand genommen. Kumulierend ergibt sich ein maximaler Gesamtvolumenstrom von 850 m³/h H₂ bei einem Betriebsdruck von 10 bar_{abs} zur gleichzeitigen Versorgung aller angeschlossenen Verbraucher. Davon ausgehend werden die Rohrleitungsdimensionen wie folgt festgelegt. Die Hauptleitung, abgehend von der Gasdruckregelanlage und unterirdisch verlegt zur Hauswand der Erdgas-Gasübergabestation, wird in DN50 ausgeführt. Die erste Abzweigung bildet sich in zwei DN32 Ausführungen aus und verzweigt sich zu den einzelnen Abnahmestellen zu DN25.



Abbildung 3.4: Übergang des Leitungsverlaufs

Die Leitung wird, wie in Abbildung 3.4 schematisch dargestellt, aus dem Boden an die Wand geführt. Entlang des orangen abgesetzten Streifens teilt sich die Leitung nach linksbündig zu den Abteilungen Industrielle Feuerungstechnik (IFT) und Bildungswerk (BW) sowie zu dem HySpeed-Container und dem Demonstrationshaus (Demo-Haus) auf. Zur rechten Seite schließen die Abteilungen Brennstoff- und Gerätetechnik (BGT) und Prüflabor (PL) an. Der Leitungsdurchmesser reduziert sich an dieser Stelle von DN50 auf DN32.

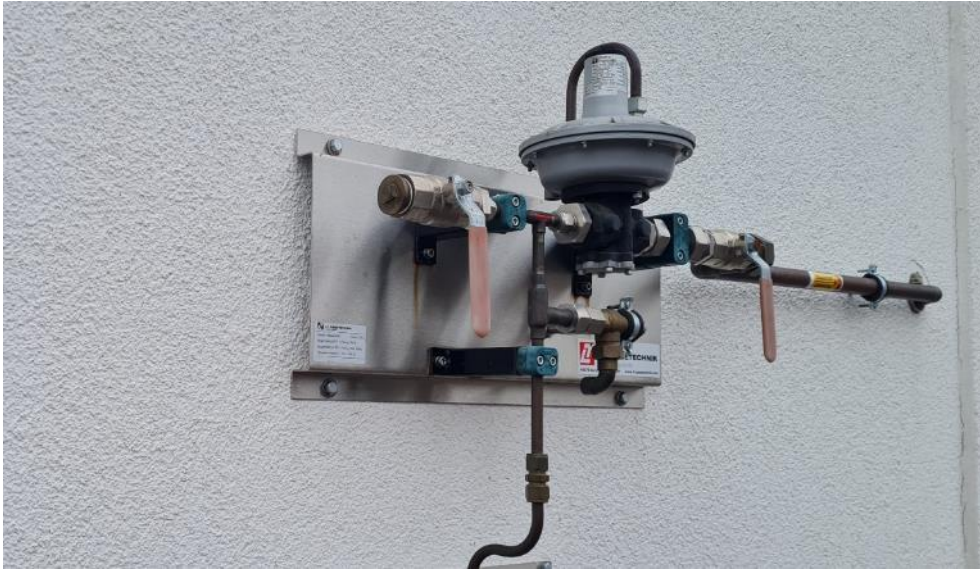


Abbildung 3.5: Vorinstallierte H₂-Infrastruktur

Einige Abteilungen verfügen bereits über eine H₂-Infrastruktur, ähnlich wie in Abbildung 3.5, die bisher über temporär aufgestellte Flaschenbündel gespeist werden. Die bestehenden Komponenten sollen genutzt und an das neue H₂-Netz angebunden werden. Mit Inbetriebnahme des H₂-Speichers stellen die Flaschenbündel dann nur eine zeitlich begrenzte Versorgungsergänzung dar, um auftretende Spitzenverbräuche aufzufangen.



Abbildung 3.6: Leitung an der Gasübergabestation zur IFT, BW, Demo-Haus

In entgegengesetzter Richtung erfolgt die Versorgung der übrigen Abteilungen und Abnahmestellen. Entlang der Stirnseite der Erdgasübergabestation teilt sich die Leitung erneut auf. Waagrecht mündet die Leitung zur Abteilung IFT, in Abbildung 3.6 rückseitig abgelichtet. Senkrecht wird die Leitung für die ausstehenden, anzuschließenden Stationen zunächst wieder unterirdisch geführt. Da sich die freiverlegten Leitungen hier grundsätzlich auch im Verkehrsbereich befinden, sind Schutzmaßnahmen gegen eine Beschädigung zu treffen. Hier kann auf den bereits bestehenden Rammschutz zurückgegriffen werden. Die exakte Leitungsführung orientiert sich dabei an der Grenze zwischen Beton und Ziegelsteinübergang. Die

Aufnahme der Letzteren stellt sich als die weniger aufwändige Methode dar, sodass nach erfolgter Verlegung der geschaffene Graben wieder vollständig zurückgesetzt werden kann.



Abbildung 3.7: Entnahmestelle Bildungswerk

Abbildung 3.7 zeigt die Entnahmestelle der Abteilung BW. Dort werden im Nachgang individuelle Abgänge und Reduzierungen zu Demonstrationszwecken in und um das Demonstrationsgelände realisiert. Rechts abgehend erfolgt unterirdisch die Zuleitung zum HySpeed-Container und dem Demo-Haus.



Abbildung 3.8: Leitungsführung unterirdisch zum Demo-Haus und HySpeed-Forschungscontainer

Der erforderliche Graben wurde entlang der Grasnarbe ausgehoben und nach Verlegung der Leitung wieder geschlossen (siehe Abbildung 3.8).



Abbildung 3.9: Aufstellort Hyspeedcontainer/Gasdruckregelstation

Am HySpeed-Forschungscontainer, in Abbildung 3.9 momentan durch ein Fundament symbolisiert, wird die Leitung ein letztes Mal geteilt. Während der Container unverändert mit 10 bar gespeist wird, reduziert sich der Druck zum Demo-Haus auf 100 mbar. Die Gasdruckregelanlage wird entsprechend der G 491 ausgeführt. Unmittelbar vor der Druckreduzierung ist ein T-Stück installiert, über das das Demo-Haus alternativ mit Erdgas versorgt oder mit Stickstoff gespült werden kann.



Abbildung 3.10: Unterirdisch ausgeführte Hauseinführung ins Demo-Haus

Die anschließend weiter erdverlegte Kupferleitung mündet in die Einsparte-Hauseinführung, analog zu G 459-1 nah am Gebäude, in Abbildung 3.10 unmittelbar zwischen den beiden Lichtschächten, des Demo-Hauses. Dort findet ein Werkstoffübergang von Kupfer auf PE statt.

Die gesamte Leitung wird in Kupfer, die Verbindungsstellen hartgelötet, ausgeführt. Die offenen Abgänge sind jeweils durch einen Stopfen am Kugelhahn gesichert. Die unterirdisch verlegten Kupferrohre liegen in einer Tiefe von ca. 60 cm zur Grasnarbe und sind durch Haftgrund und Mehrschicht-Korrosionsschutz entsprechend DIN EN 12068 / DIN 30672 gegen Korrosion geschützt. Jeder Abzweig wird im Gebäude mit einem eigenen Gaszähler versehen, um die

Verbräuche abteilungs- und projektspezifisch zu erfassen. Abgebildet werden diese Verbräuche schließlich auch im Living Lab, einem GWI -Instrument, um innerhalb einer Software verschiedene Messwerte an lokal differenzierten Orten zusammenzufassen und für weitere Auswertungen nutzbar zu machen.

Bewertet nach Arbeitsblatt G 441 finden innerhalb der gesamten auf Werksgelände verlegten Gasleitungsanlage einige Absperrreinrichtungen Anwendung. Kugelhähne nach DIN EN 331, die durch Handhebel betätigt und als zentrale Absperrkomponente, werden in allen Leitungsabschnitten eingesetzt. Grundsätzlich sind diese metallisch dichtend ausgeführt, durch eine Viertelumdrehung zu öffnen (in Leitungsrichtung) bzw. zu schließen (orthogonal zur Leitungsrichtung) und mit der Versorgungsleitung verlötet. Die Verbindung wird dort wahlweise durch einen Überwurf oder gewindedichtend über entsprechende Dichtmittel hergestellt. Unterirdisch befinden sich keine Absperrarmaturen, die auf Werksgelände verlegten Leitungen wurden ausschließlich hartverlötet, nachträglich korrosionsgeschützt ohne separate Komponenten verlegt. Die maximal zulässigen Betriebsdrücke der jeweiligen Absperrorgane werden den verschiedenen Druckebenen der Wasserstoffversorgung zwischen 0 und 10 bar zugeordnet. Die Strecken und Abgänge sind einzeln absperrbar, sodass spätere Umbaumaßnahmen, Wartungs- und Reparaturanwendungen problemlos umgesetzt werden können, ohne die allgemeine Versorgung des GWI zu unterbrechen. Alle Absperrorgane werden manuell durch Kraft betätigt. Alternative, ferngesteuerte Zugänge sind nicht vorgesehen. In den einzelnen Leitungsabschnitten fungieren die Kugelhähne ebenfalls als Schnittstelle um zukünftige intervallabhängige Dichtheits- und Druckprüfungen durchzuführen. Diese sind im regulären Betrieb mit einem zusätzlichen Stopfen gegen unbefugten oder versehentlichen Zugriff gesichert.



Abbildung 3.11: Hauseinführung und Hausinstallation

Die Hauseinführung nach G 459-1 und Gasdruckregelgerät nach G 459-2 stellt den Übergabepunkt zur Hausinstallation nach G 600 dar. An die Hauseinführung/Hauptabsperrreinrichtung (Einsparte) anschließend befinden sich der Gasdruckregler (nach DIN EN 88) sowie der Gasströmungswächter nach DIN 30652-1, ausgelegt für einen Nennbelastung von 60 kW Erdgas. der Inneninstallation, hintereinander in Abbildung 3.11 dargestellt. Da der Wasserstoff nicht odorisiert ist, wird an dieser Stelle nachträglich noch ein Magnetabsperrventil mit vorgeschalteter TAE eingefügt, welches im Zuge der Gaswarnanlageninstallation eingebunden wird.



Abbildung 3.12: Einzeln abrechenbare Geräteanschlussleitungen

Die Leitung teilt sich nach dem Magnetventil in drei parallele Stränge auf, welche durch separate Gaszähler, in Abbildung 3.12 deutlich zu erkennen, einzeln abgerechnet werden können. Ferner wird unmittelbar vor den Gaszählern jeweils ein T-Stück vorgesehen, sodass nach Erfordernis die Leitung mit Stickstoff gespült werden kann. Diese Spülleitungen sind ebenfalls durch einen Kugelhahn plus Stopfen absperrrbar.



Abbildung 3.13: 100-Vol.-%-H₂-Gerät/ Abluftventilatoren und Gaswarnsensor

Während die H₂-Leitungen oberhalb des Kellers an geeigneten Wandmontagen in Da15 münden, wie hier in Abbildung 3.13 gezeigt, wird die Spülleitung links durch die Außenwand nach außen geführt. Die Spülleitung wird durch einen Ausbläser abgeschlossen. Diese Spülleitung dient in dem Prüfaufbau für nachgelagerte Versuche zur Beschleunigung des Gasaustauschs. Da diese grundsätzlich nicht in Hausinstallationen Anwendung findet, wird diese hier auch nicht für die zeitbasierten Gasaustauschversuche verwendet, der Vollständigkeit halber jedoch aufgezählt.

Die gesamte Infrastruktur wird nach Abschluss der Verlegearbeit vermessen und in einen GWI-Leitungsplan eingefügt. Dieser dient nachhaltig dazu, Regelwerksvorgaben aus G 600 bzw. G 614-1 und G 462 zu erfüllen und einzuhalten. Im Geltungsbereich der G 614-2 werden für freiverlegte Werksleitungen entsprechende Betriebs- und Instandhaltungsmaßnahmen (z. B. Sichtprüfungs- und Dichtheitsprüfungsintervalle) festgelegt. Um einwandfrei erkennen zu können, ob alle Verbindungen fachgerecht ausgeführt und auch im Nachhinein dicht sind, wird auf einen farblichen Anstrich der Rohre verzichtet. Alternative Ummantelungsverfahren zur Isolierung oder zum Korrosionsschutz werden ebenfalls keine Anwendung finden. Die Erdein- und Austritte der Leitung im Verkehrsbereich werden jeweils von einem schwarz-gelb markierten Rammschutz eingerahmt. Dieser wird so ausgebildet, dass eine Kollision von Fahrzeugen mit der Leitung ausgeschlossen ist. Ferner wird auf eine Freiverlegung der Leitung mittels Leitungsbrücken zur Überführung der Leitungen über Werksverkehrsflächen verzichtet, da eine Maximalhöhe der zu erwartenden Transport- und Baufahrzeuge nicht abschließend definiert werden kann. Die oberirdisch an der Hauswand verlegte Kupferleitung wird in regelmäßigen Abständen mit einem Aufkleber versehen, welche sie klar als wasserstoffführende Leitung kennzeichnet. Die Vorgaben G 614-1 bezüglich der Halteschellenabstände werden eingehalten, Rohrwanddurchführungen isoliert und die Leitung an den Blitzableiter angeschlossen. Nach Fertigstellung wurden die Leitungsabschnitte den Dichtheits- und Belastungsprüfungen nach G 462, G 614-1 bzw. G 469 unterzogen. Kein Leitungsabschnitt zeigt während der Belastung Undichtigkeiten, sodass die H₂-Infrastruktur über das gesamte Gelände als technisch dicht angesehen wird.

Die Gasinstallation im Demo-Haus wird analog zur G 600 von einem Vertragsinstallationsunternehmen erstellt und in Betrieb genommen. Da es sich um eine möglichst genaue Abbildung einer im Feld befindlichen Hausinstallation handeln soll, wird auch bei den Komponenten darauf geachtet, dass diese den üblichen Bauteilen nach G 600 entsprechen und nicht bereits als wasserstofftauglich ausgewiesen sind. Die Leitung ist komplett zugänglich, für spätere Prüfung und Instandhaltung dauerhaft erreichbar und die Parallelstränge über die eingebauten Kugelhähne einzeln absperrrbar.



Abbildung 3.14: Tableau der Gaswarnanlage

Auf eine Odorierung des Wasserstoffs wird an dieser Stelle verzichtet, weil über die Gesamtinfrastruktur des GWI final auch industrielle Forschungen durchgeführt werden, welche eine Odorierung des Gasgemisches nicht zulassen. Dadurch, dass der Wasserstoff wie Erdgas im unodorierten Zustand jedoch geruchlich nicht wahrnehmbar ist, wird hier auf eine Gaswarnanlage zurückgegriffen werden. Da der künftig im öffentlichen Netz verteilte Wasserstoff genauso wie Erdgas entsprechend G 280 mit einem geeigneten Odoriermittel versetzt ist, ist eine Gaswarnanlage im häuslichen Bereich gemäß G 600 bzw. G 655 nicht notwendig. Die zur Absicherung dieser Demonstrationsanlage implementierte Gaswarnanlage, wird über das in Abbildung 3.14 abgebildete Bedientableau gesteuert und verwaltet. Hauptkomponenten des Konzepts sind die lokal platzierten H₂-Sensoren einer Gaswarnanlage. Die Gaswarnanlage erfüllt überdies die Auswahlkriterien nach DGUV 213-057. Wasserstoff wird in diesem Zusammenhang als vorrangiges Betriebsgas definiert. Derzeit befinden sich im Aufstellungsraum noch Gasgeräte, welche mit Erdgas betrieben werden können. Dies ist zwar bis auf Weiteres nicht vorgesehen, da das Demo-Haus jedoch ebenfalls über eine aktive Erdgasversorgung verfügt, detektieren die Sensoren ebenfalls CH₄. Der Detektionsbereich dieser Sensoren erstreckt sich über 0 – 30% Konzentration der UEG (Unteren Explosionsgrenze) von H₂, erfüllt somit den nach DGUV 213-057 geforderten Bereich bis maximal 40%. Die Sensoren schließen unabhängig voneinander im Bedarfsfall das zuvor genannte Magnetventil in der Hauptzuleitung. Die Schaltung erfolgt dabei zweistufig. Bei Erreichen des eingestellten Grenzwertes von 15% der UEG wird zur optischen Warnanlage (Blinklicht an der Außenwand) parallel eine Zwangsbelüftung zugeschaltet. Diese wiederum besteht aus zwei Abluftventilatoren, sodass eine unverzügliche Gasabführung gewährleistet ist. Kann die Konzentration nach erfolgter Belüftung nicht reduziert werden, sperrt das Magnetventil bei Erreichen einer H₂-Konzentration von 30% der UEG die Wasserstoffleitung und die Erdgaszuleitung zu. Eine Wiederinbetriebnahme kann nur durch manuelle Freischaltung erfolgen. Durch geeignete, mobile Messgeräte soll die Undichtigkeit lokalisiert und durch gezielte Maßnahmen beseitigt werden. Ergänzt wird die Sicherheitsabschaltung durch ein akustisches Signal in Form einer Sirene. Das Sicherheitskonzept wird in die bestehende Sicherheitsinfrastruktur des GWI eingebettet, sodass auch entfernte Abteilungen Kenntnis von der anfallenden Wasserstoffundichtigkeit im Demo-Haus erhalten und sich konform der Sicherheitsbestimmungen verhalten können. Präzisiert wird das Vorgehen bei einer Wasserstoffundichtigkeit durch den befugten Sicherheitsingenieur in Absprache mit der Sicherheitsfachkraft.

Die Fertigstellung der Infrastruktur erfolgt freigabebedingt sukzessiv, sodass einzelne Netzabschnitte erst nach Beendigung dieses Vorhabens entstehen werden. Da die Generalversorgung über den H₂-Speicher gewährleistet sein soll, können einige Abteilungen erst nach dessen Aufstellung von der übergangsweise verwendeten Flaschenbündellösung auf die Speicherversorgung über die neue Infrastruktur umgestellt werden. Vorausschauend werden also projektrelevante Netzabschnitte bereits vor Aufstellung des Speichers installiert und können ebenfalls über eine alternative Lösung in Betrieb genommen werden. Im Rahmen des Projektes sollte die Auslegung von Gasströmungswächtern analog zur G600 an allen gängigen Typen mit Wasserstoff validiert werden. Während im Demo-Haus ein Gasströmungswächter Typ K für den maximalen Erdgasvolumenstrom von 10 m³/h die Leitung zu den drei parallelen Abgängen sichert, werden die Gasströmungswächter Typ A-D für die Haus- bzw. Netzanschlussleitung im Nachgang auf einem zurzeit im Bau befindlichen Prüfstand gemessen.

3.2 Versuchskonzeptionierung und Durchführung

Im Rahmen von Kapitel 2.5 werden, sowohl während der Inbetriebnahme des im Demo-Haus installierten H₂-Brennwertgeräts als auch separat im ausgelagerten Versuchsaufbau, Prüfungen im Bereich der Leitungsinertisierung der Hausinstallation durchgeführt. Die erfolgreiche Inbetriebnahme des Brennwertgeräts nebst Spülen und Begasung der Leitung wird in Kapitel 4 deutlicher ausgeführt. Die entsprechende Begasung des Leitungssystems findet in AP2 größere Schwerpunkte, sodass die zugehörigen Versuche nachfolgend fokussierter betrachtet werden. Unter Berücksichtigung des geltenden Regelwerks, zur Untermauerung und Übertragbarkeit der dort definierten Vorgehensweise auf reinen Wasserstoff, werden vier wesentliche Szenarien beleuchtet. Diese werden durch entsprechende Versuche und deren Auswertung verglichen. Die Versuche in AP 2 zur Inertisierung findet grundsätzlich auf einem separaten Prüfstand an einem konventionellen, erdgasbetriebenen Brennwertgerät statt. Da der Fokus auf der benötigten Zeit und der erreichbaren Wasserstoffreinheit liegt, soll hier eine versehentliche Erdgasbeaufschlagung der 100 Vol.-%-H₂ Geräte vermieden werden.

Grundlegend wird die Leitung, wie in allen Regelwerken gleichermaßen beschrieben, auf Dichtheit überprüft. Hierzu werden neben der Druckbeaufschlagung der geschlossenen Leitung ebenfalls die einzelnen Verbindungen und Armaturen mit einem Detektor mittels Gasspürgeräts auf Dichtheit überprüft. Nach Feststellung des einwandfreien Zustandes, der technischen Dichtheit, wird die Leitung für die Versuche freigegeben. Gemäß des Versuchsgegenstandes wird die Leitung im Ausgangszustand unter Erdgas gesetzt. Die angeschlossene Messtechnik am Leitungsende bestätigt während der Versuchsreihen die entsprechende Gasbeschaffenheit in der Leitung. Ziel der hier untersuchten Szenarien ist es jeweils, die Leitung mit N₂ zu inertisieren. Lediglich im folgenden Versuch AP 2-1 wird ein Direktaustausch mit Wasserstoff, betrachtet, bei den weiteren Versuchen wird stattdessen die Inertisierung in den Vordergrund gestellt.

Versuch AP 2-1 – Direktes Spülen mit H₂ über Druckmessstutzen des Gasgerätes

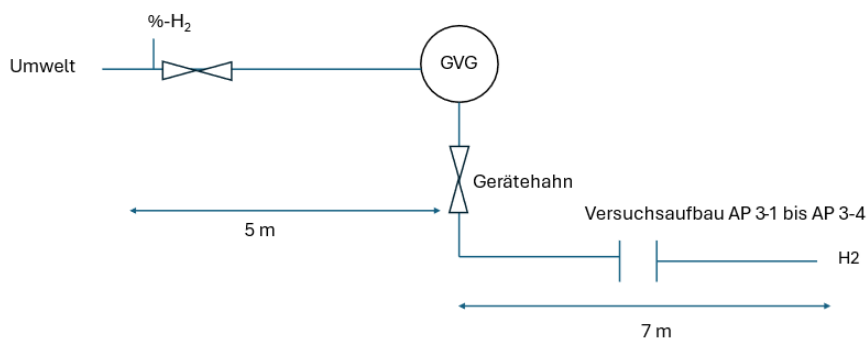


Abbildung 3.15: Versuchsaufbau Versuch AP 2-1

Der Versuch aus Abbildung 3.15 sieht vor, die Leitung bis unmittelbar vor das Gasgerät/der Brennkammer zu spülen. GVG steht in den Darstellungen für Gasverbrauchsgerät, umfasst also alle zum bestimmungsgemäßen Verbrennen von Gas verwendeten Endgeräte. Wie in

Versuchsreihe AP 2-2 bis AP 2-4 wird die Leitung vorerst erneut mit Erdgas gespült, bevor die H₂-Zufuhr geöffnet wird. Ein eventuell vor Ort befindliches konventionelles Gasgerät oder aber ein bereits installiertes H₂-100% Gerät müssen nicht in Betrieb genommen, es muss nur der Zugang zum Druckmessstutzen des Gasgerätes sichergestellt werden. Die Schraube des Druckmessstutzens wird für die Versuchsdauer ausgeschraubt und der Stutzen über den passenden Schlauch mit dem Konzentrationsmessgerät verbunden und das Gas gefahrenfrei ins Freie abgeleitet. Entgegen den folgenden Versuchen wird hier ein Direktaustausch mit Wasserstoff durchgeführt. Die Größe des Druckmessstutzens und der geringe Vordruck führen erwartungsgemäß zu einer unkritischen Gaskonzentration am Austritt. Für die weiteren Versuche wird hier die Gasaustauschzeit mit N₂ untersucht.

Das Gas wird so lange über die Druckmessbohrung abgelassen, bis sich eine Wasserstoffkonzentration von 100% einstellt. Es wird das Abführen des Gases über eine Schlauchleitung durch ein Fenster oder ähnliches simuliert, ein Abfackeln des Gases findet innerhalb dieses Versuches nicht statt. Messtechnisch wird in dieser Versuchsreihe die Zeit von dem Gaswechsel bis zum Erreichen einer 100% Wasserstoffkonzentration gemessen.

Versuch AP 2-2 – indirektes Spülen mit N₂ und Adapter an Geräteanschlussarmatur

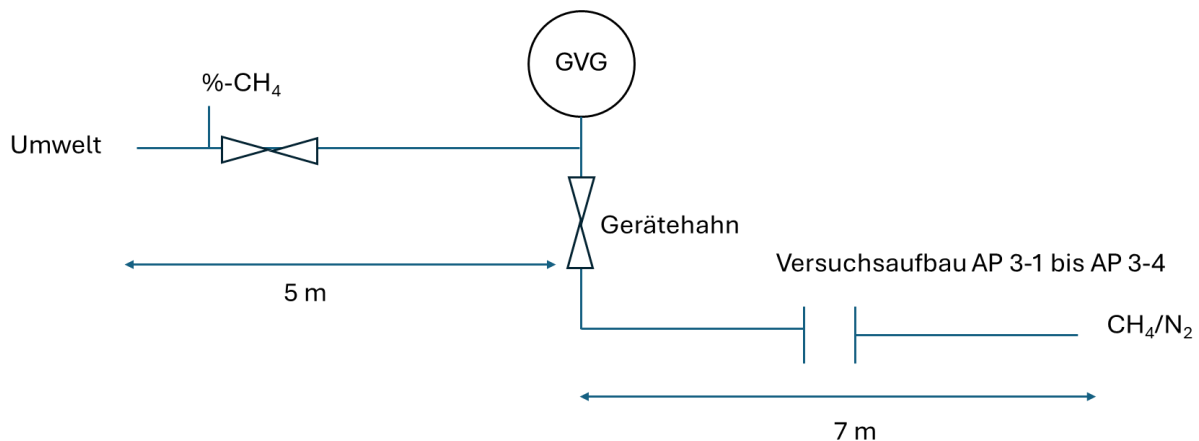


Abbildung 3.16: Versuchsaufbau Versuch AP 2-2

In Abbildung 3.16 zu erkennen, ist sowohl der im späteren Verlauf des Berichts näher beschriebene Aufbau der Gasanwendungsversuche AP 3-1 bis AP 3-5 als auch die für die Inertisierung der Gasleitung bis vor das Endgerät modifizierte Spüleinrichtung.

Im weiteren Projektfortlauf werden weitere Methoden zum schnelleren Gasaustausch untersucht. Abweichend von den beiden nachfolgenden Versuchen orientiert sich dieser Versuch ausschließlich an der Zeitdauer des gefahrenfreien Ablassens von Erdgas über einen geeigneten Schlauch, ohne das Gas zu zünden (abzufackeln). Unter der Prämisse, dass die Umstellung bzw. Inertisierung der Gasinstallationsleitungen außerhalb der Methanverordnung läuft, das kurzzeitige Ablassen des Erdgases in die Atmosphäre also ohne Abfackeln von Statuen gehen darf, wird hier die entsprechende Dauer zur Erreichung von 100 % Stickstoff ermittelt.

Versuch AP 2-3 – indirektes Spülen mit N2 und Adapter an Geräteanschlussarmatur + Fackel

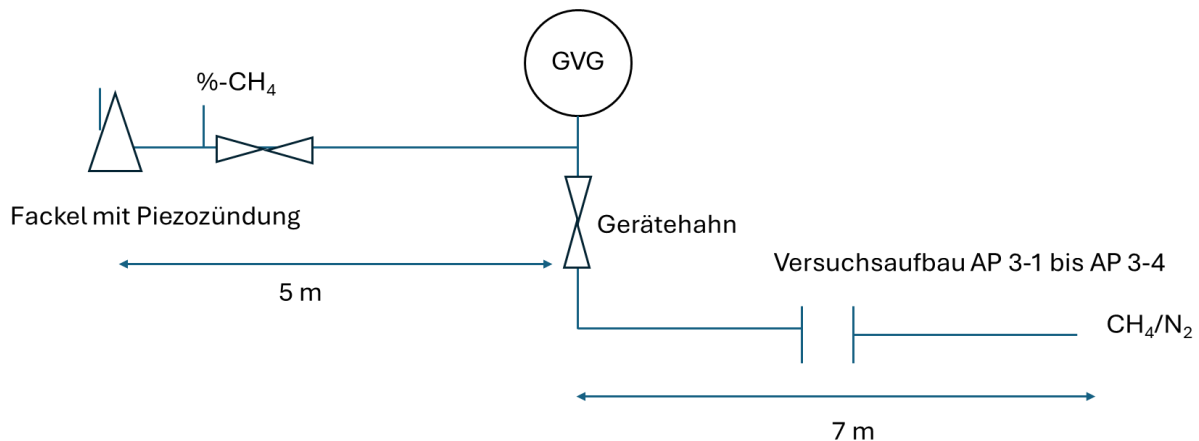


Abbildung 3.17: Versuchsaufbau Versuch AP 2-3

Dieser Versuch befasst sich mit der Methode, das in der Leitung befindliche Erdgas im Zuge der Inertisierung über den Gerätehahn mittels Adapter abzulassen und durch eine geeignete Fackel zu verbrennen. Dabei wird, in Abbildung 3.17 links zu sehen, die Fackel mit einem circa 5 Meter langen Schlauch (DN 25) verbunden. Die Länge soll sich an der Möglichkeit orientieren, das Gas vom Gerät im Aufstellraum (Heizkeller) durch ein nahegelegenes Fenster abzuführen.

Unmittelbar vor der Fackel befindet sich die Konzentrationsmessung für CH₄. Dadurch soll festgestellt werden, bis zu welcher Methankonzentration das Methan/Stickstoffgemisch selbstständig brennt.

Versuch AP 2-4 – indirektes Spülen wie AP 2-3 + Zündbrenner an Fackel

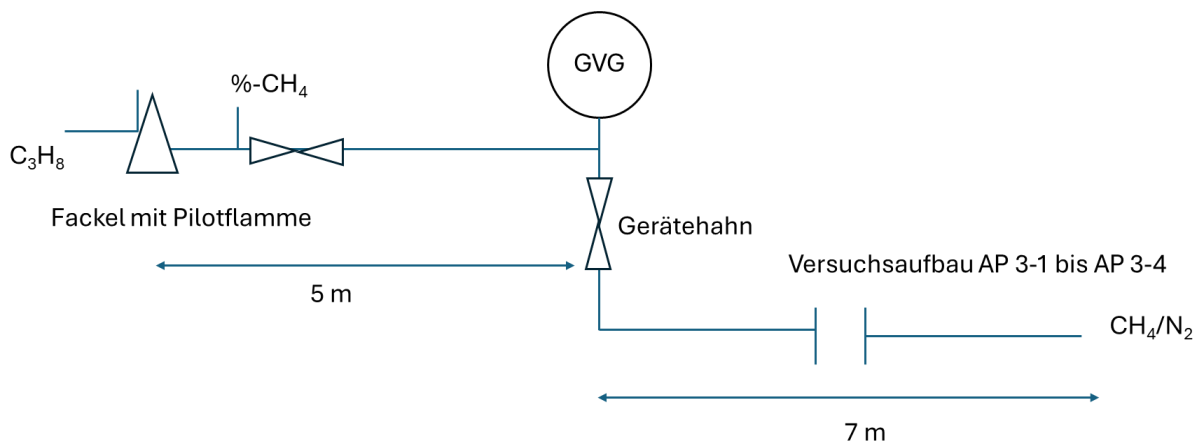


Abbildung 3.18: Versuchsaufbau Versuch AP 2-4

In dieser Versuchsreihe wird der Aufbau optimiert, indem die Dauer-Piezo-Zündung der Fackel durch eine Pilotflamme ersetzt wird. An den berücksichtigten Leitungslängen ändert sich, wie in Abbildung 3.18 zu erkennen, nichts. Der Grund für das Hinzufügen der Pilotflamme besteht darin, alle zündfähigen CH₄ Bestandteile im Brenngas zu verbrennen, welche durch die Beimischung mit N₂ ansonsten nicht mehr zündfähig wären.

Auswertung Versuch AP 2-1 – Direktes Spülen mit H₂ über Druckmessstutzen des Gasgerätes

Der Versuch AP 2-1 zeigt eine signifikante Abweichung in der benötigten Zeit des Gasaustauschs im Vergleich zu den anderen Versuchsreihen. Obwohl bei dieser Methode kein zusätzlicher Aufwand einer Gasadapter bzw. Fackelinstallation besteht, stellt dieses Verfahren respektive der erforderlichen Zeit keine geeignete Alternative dar.

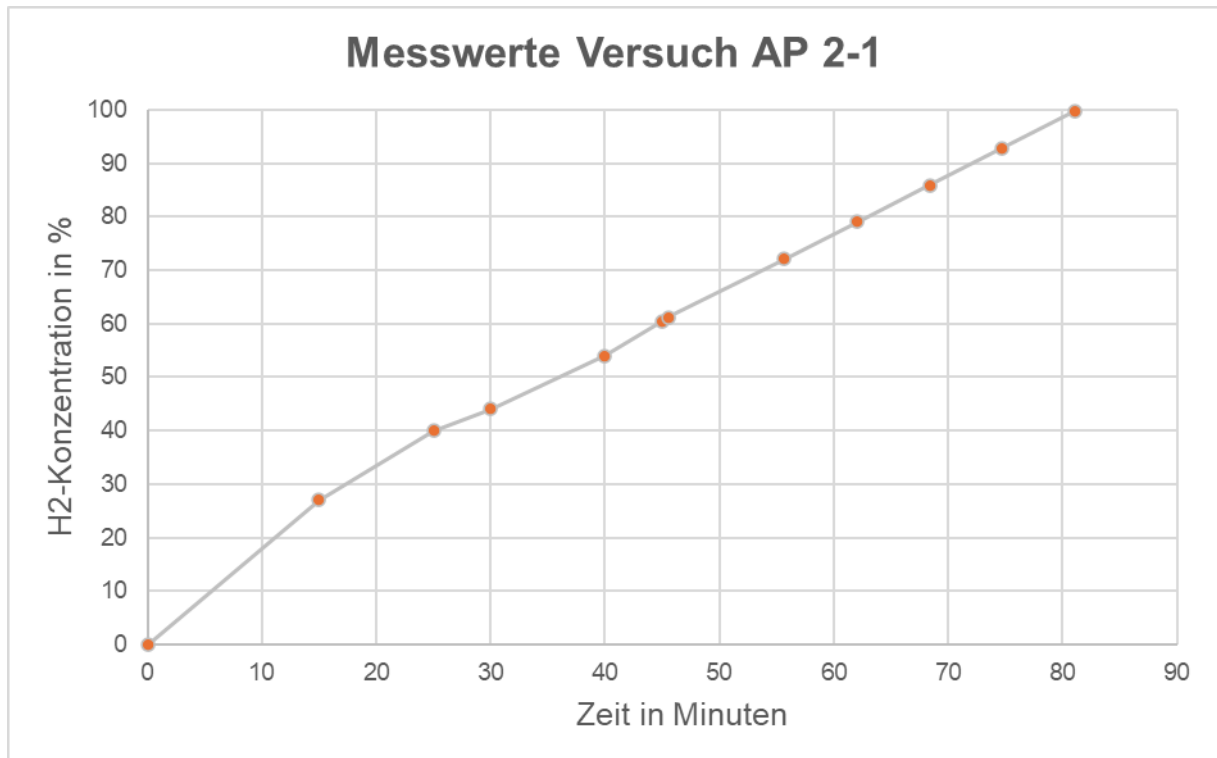


Abbildung 3.19: Messergebnisse AP 2-1

Zwar weist jenes Verfahren durch die minimale Öffnung den geringsten Gasverlust im Hinblick auf freiströmendes Gas aus, kann für eine flächendeckende Umstellung jedoch keine Anwendung finden. Der in Abbildung 3.19 dargestellte lineare Anstieg der Wasserstoffkonzentration deutet darauf hin, dass es zu einer stärkeren Durchmischung der beiden Einzelgase kommt. Die kleine Öffnung am Druckmessstutzen sorgt für einen entsprechend längeren Aufenthalt des Erdgases in der Leitung, wodurch die Durchmischung dahingehend begünstigt wird.

Auswertung Versuch AP 2-2 indirektes Spülen mit N₂ und Adapter an Geräteanschlussarmatur

Da das Spülkonzept aus AP2-1 hinsichtlich der Spülposition unter Betrachtung der oben erzielten Zeitmessung erheblicher Optimierung bedarf, wird in den folgenden Versuchen die Position des Spülanschlusses verändert. Dadurch, dass unmittelbar vor dem Gerät, am Gerätehahn, die Leitung unterbrochen und durch einen analog zu der Gasleitung dimensionierten Schlauch das Erdgas abgelassen und durch Stickstoff ersetzt wurde, konnten maßgeblich verkürzte Austauschzeiten beobachtet werden. Nach ungefähr 38 Sekunden, gemittelt anhand von drei Versuchsdurchgängen, wurde das Erdgas der insgesamt 12 Meter langen Leitung (7 Meter Hausinstallation zuzüglich 5 Meter Leitungsführung ins Freie) durch 100 % Stickstoff ersetzt, also voll inertisiert. Faktoriell ausgedrückt beschleunigt sich die Austauschzeit auf das 130-fache.

Auswertung Versuch AP 2-3 - indirektes Spülen wie AP 2-3 + Piezo-Zündung an Fackel

Wird an das oben definierte Spülprogramm am Ende noch eine Fackel zugefügt, kann ein wesentlicher Teil des Erdgases verbrannt werden. Da die verwendete Fackel in diesem Aufbau jedoch nur über eine Piezozündung verfügt, erlischt die Flamme, sobald kein zündfähiges Gasgemisch (CH_4/N_2) mehr vorliegt. Dies geschieht nach näherungsweise 15 Sekunden im Bereich von 60% bis 70% CH_4 . Bauartbedingt schließt bei Erlöschen der Flamme kein vorgeschaltetes Sperrventil den Gaszufluss, sodass das Gas weiterhin ungehindert und unverbrannt in die Atmosphäre strömt. Geschuldet ist diese Beobachtung der entlehnten Betriebsweise, denn eine Fackel eignet sich vorrangig dazu brennbare Gase vor dem Atmosphäreneintritt umzusetzen, welche von der Piezozündung entsprechend gezündet werden. Dadurch, dass dem Erdgas in diesem Beispiel Stickstoff beigemischt wird und dieses in ein nicht zündfähiges Gemisch überführt, kann die Sicherheitseinrichtung in Form der Piezodauerzündung nicht wirken. Mit Hilfe der angeschlossenen Konzentrationsüberwachung kann jedoch ebenfalls in dieser Versuchsreihe die vollständige Inertisierung 15 Sekunden nach Erlöschen der Flamme bestätigt werden. Sollte hingegen ein Direktaustausch von Erdgas gegen Wasserstoff erfolgen, strömt kontinuierlich ein brennbares Gasgemisch durch die Leitung bis zur Fackel. Erwartungsgemäß sollte sich die wandelnde Gasmischung hin zu reinem Wasserstoff an dem Flammenbild bemerkbar machen. Aufgrund fehlender, entsprechender Eignungsnachweise der Fackel für Wasserstoff-Erdgasgemische wurde auf einen Versuch zu einem Direktaustausch verzichtet.

Auswertung Versuch AP 2-4 - Zündbrenner an Fackel Um die oben beschriebene Abfackeleinrichtung zur vollständigen Verbrennung des Erdgases zu nutzen, wird die Fackel nun um eine externe Pilotflamme ergänzt. Diese Pilotflamme wird über eine Propangasflasche versorgt und entspricht in diesem Versuchsaufbau einem Bunsenbrenner. Die Flamme des Bunsenbrenners wird diagonal in die Flamme der eigentlichen Fackel ausgerichtet, sodass das Gas über einen breiten Querschnitt gezündet werden kann. Nachdem die Gasversorgung zunächst wieder auf reines Erdgas umgestellt und die Fackel in Betrieb genommen wird, kann die Pilotflamme dazugeschaltet werden. Mit Umstellen der Versorgung auf Stickstoff wird erneut die Zeit bis zum Erlöschen der Flamme, bzw. das sich verändernde Flammenbild des Bunsenbrenners gemessen. Wie erwartet kann durch den Einsatz einer Pilotflamme wesentlich mehr Erdgas aus dem Erdgas-Stickstoffgemisch verbrannt werden. Die Bunsenbrennerflamme zeigt 22 Sekunden lang ein verändertes Brandbild, sodass davon ausgegangen werden kann, dass in diesem Zeitfenster neben Propan auch Erdgas verbrannt wird. Nach benanntem Zeitraum nimmt die Flamme das bekannte Bild an. Zur vollständigen Inertisierung kam es binnen 3 Sekunden nach der Flammenänderung. Es wird davon ausgegangen, dass hier nahezu 100% des Erdgases des Gasgemisches verbrannt werden können. Zurückzuführen ist diese Beobachtung auf das Flammenbild und die parallele Gaskonzentrationsüberwachung.

Diskussion und Handlungsempfehlung

In eine Empfehlung überführend, werden an dieser Stelle die Messergebnisse der Versuchsreihe AP 2-1 bis AP 2-4 dahingehend ausgewertet, die Praktikabilität für eine Umsetzung im Feld einzuordnen. Eindeutig ist hervorzuheben, dass ein Spülen/Begasen aus zeitlicher Sicht nur dann sinnvoll umgesetzt werden kann, wenn eine alternative Ausströmmöglichkeit als der im Gerät integrierte Druckmessstutzen (siehe Versuchsergebnisse AP 2-1) geboten wird. Da für die hier abgebildeten 7 Meter Leitungslänge eine Austauschzeit von fast 85 Minuten erreicht werden, empfiehlt sich das Abblasen des Gases an einer alternativen Position. An dieser

Stelle wird auf die Position des Ausblaseanschlusses aus den Versuchsreihen AP 2-1 bis AP 2-3 verwiesen. Einerseits bietet sich die modulare Integration einer Spülvorrichtung unmittelbar vor dem Gerät, etwa am Geräteabsperrhahn, an. Wird dieser vor der Installation des Neugerätes (100 Vol.-%-H₂) um einen Anschluss/Adapter für einen geeigneten Schlauch zum Ableiten ergänzt, kann das Spülen und anschließende Begasen mit Wasserstoff unter Hinzunahme eines geeigneten Messgeräts binnen Minuten erfolgen. Für eine Entwicklung eines solchen, fest mit der Leitung/Absperreinrichtung verbundenen, Spül-Adapters sind die Anforderungen an den Manipulationsschutz nach TRGI zu beachten. Andererseits könnte je nach Geräteumrüstverfahren (Umrüstkit) auch innerhalb des Gerätes an geeigneter Stelle ein Anschlussstutzen (in der Regel ½“ Gewindeanschluss) für das Spülen und anschließende Begasen mit Wasserstoff genutzt werden. Möglich wäre hier unter anderem der Zeitpunkt einer Umstellung des Gasgerätes. Wird zur Umstellung der Gasqualität beispielsweise der Austausch der Brennergruppe vorgesehen, kann ein verfügbarer Adapter vorübergehend auf die Gasanschlussleitung im Gerät gesetzt werden. Das Spülen/Begasen der Gasleitung im Gebäude (ab Hauptabsperreinrichtung) erfolgt dann als Zwischenschritt innerhalb der Geräteumstellung.

Kommt vereinzelt jedoch lediglich ein Geräteaustausch in Frage, wird die Spülmöglichkeit unmittelbar am Gerätehahn die Wahl sein. Ob es sich dabei um einen genormten Geräteanschlusshahn oder aber um die prozesstechnische erforderliche Spülung über einen Adapter am Gerätehahn selbst zwischen Bestandsgerätdemontage und H₂-100 % Gerätmontage handelt, sei an dieser Stelle nicht weiter diskutiert.

Direktes Spülen mit CH₄/H₂

Wird entgegen der beschriebenen Vorgehensweise doch ein Direktaustausch von Erdgas gegen Wasserstoff angestrebt, sollen hier notwenige Hinweise nicht unbeleuchtet bleiben. Es muss sichergestellt sein, dass ggf. eingesetzten Fackeln problemlos reinen Wasserstoff sowie Erdgas-Wasserstoffgemische von 0 bis 100% verarbeiten können. Primär stellt hier die Nutzung einer Pilotflamme unter Verwendung einer alternativen Gasquelle (bspw. Propangas) eine Möglichkeit dar, alle brennbaren Gasbestandteile bis zur Erreichung von 100 %-H₂. Gemäß DGUV Information 203-090 ist unter Verwendung eines Regulierorgans bei gleichzeitiger Messung der Strömungsgeschwindigkeit sicherzustellen, dass das Brenngas mit einer Fließgeschwindigkeit von 3 bis 7 m/s am Ausgang strömt, sodass einerseits die Bildung von Schichten sowie das Mitreißen von Partikeln unterbunden wird, unabhängig davon, welches Gas ausgetauscht wird. Bei einem Spülvorgang mit Stickstoff erübrigt sich eine Gaskonzentrationsmessung, da mit Erlöschen der Brennflamme unter Erhaltung der Pilotflamme bei registrierter Strömungsgeschwindigkeit eine Inertisierung der Leitung hinreichend genau bestimmt werden kann. Wird hingegen ein Direktaustausch von Erdgas mit Wasserstoff anvisiert, ist die Konzentrationsmessung des Wasserstoffgehalts im Brenngas ein zwingend erforderlicher, sicherheitsrelevanter Arbeitsschritt.

Der Vorteil der hier untersuchten Spülpositionen besteht darin, dass diese endgerätunabhängig und in jeder gängigen, nach Regelwerk ausgeführten Hausinstallation angewendet werden können. Bei Verwendung eines Spül-adapters ist zu beachten, dass dieser nach erfolgreichem Gasaustausch zwingend wieder von dem Gerätehahn entfernt werden muss, bevor das neue Gerät angeschlossen werden kann.

Eine weitere bauliche Umsetzung für einen geeigneten Spülanschluss, kann auch durch einen angepassten, genormten und generell auszutauschenden Geräteanschlusshahn

ausgeführt werden. So könnte der Geräthahn als umschaltbares T-Stück ausgeführt werden, welches ein Ablassen des Gases orthogonal zum Gerät ausweist. Analog zu der Variante mit dem Adapter stellt diese zunächst den größtmöglichen Leitungsquerschnitt für eine schnelle Spülung dar. Additiv stellt sich aber auch hier die Sicherheitsfrage, da dieser separate Auslass bei regulärem Betrieb der Leitungsanlage versiegelt bzw. verstopft und manipulationssicher ausgeführt sein muss.

Als Untersuchungsergebnis festgehalten wird, dass das Spülen bzw. Begasen der Gasleitungsanlage nach der HAE unter Berücksichtigung einer geeigneten Spülposition sicher und schnell erfolgen kann. Sind geeignete Rahmenbedingungen hinsichtlich des Installationsortes (Keller oder Erdgeschoß) des Gasgeräts gegeben, kann das ausgespülte Erdgas zusätzlich methanverordnungskonform abgefackelt werden. Stellt der Installationsort jedoch eine nicht lösbare Herausforderung (ab 1.Etage) an die Abführung des Gases dar, muss wahrscheinlich auf eine Verbrennung verzichtet und stattdessen auf reine Spülung zurückgegriffen werden. Hier entscheiden dann die Verfügbarkeit und Einschätzung des vor Ort tätigen Monteurs darüber, ob ein Fenster bzw. Balkon für die Spülung ins Freie genutzt werden kann. Unter zu Hilfenahme entsprechender Messtechnik kann die Gaskonzentration in der erforderlichen Reinheit bestimmt werden, sodass final das 100 Vol.-% H₂-Gerät in Betrieb genommen werden kann.

3.3 Erarbeitung eines Umstellprozess für die Hausinstallation

3.3.1 Referenzprojekte und technisches Regelwerk

Das zu Grunde gelegte Regelwerk für die vorliegende Begutachtung setzt sich aus den zum Zeitpunkt der Bearbeitung gültigen gesetzlichen Vorschriften und technischen Regelwerken zusammen, bestehend aus:

- EnWG: Energiewirtschaftsgesetz
- NDAV: Niederdruckanschlussverordnung
- VO (EU) 2016/426, Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates vom 9. März 2016 über Geräte zur Verbrennung gasförmiger Brennstoffe und zur Aufhebung der Richtlinie 2009/142/EG
- DGUV Regel 100-500, Kap. 2.31 Arbeiten an Gasleitungen (zukünftig DGUV Information 203-090 Arbeiten an in Betrieb befindlichen Gasleitungen - Handlungshilfe zur Erstellung der Gefährdungsbeurteilung)
- DGUV Information 203-092, Arbeitssicherheit beim Betrieb von Gasanlagen – Handlungshilfe zur Erstellung der Gefährdungsbeurteilung
- DGUV FBETEM-007, Fachbereich Aktuell – Gefährdungen und Schutzmaßnahmen bei Arbeiten im Bereich von Wasserstoffanlagen und -leitungen
- DVGW G 260 (A), Gasbeschaffenheit
- G 280:2018 bzw. Entwurf G 280:2024 (angepasst auf H₂), Gasodorierung
- G 469 (A), Druckprüfverfahren Gastransport/Gasverteilung

- G 469-B1 (A): 2024-07, 1. Beiblatt zum DVGW-Arbeitsblatt G 469:2019-07 Druckprüfverfahren Gastransport/Gasverteilung
- DVGW G 600 (A), Technische Regel für Gasinstallationen
- DVGW G 614-1 (A), Freiverlegte Gasleitungen auf Werksgelände hinter der Übergabestelle; Planung, Errichtung, Prüfung und Inbetriebnahme
- DVGW G 614-2 (A), Freiverlegte Gasleitungen auf Werksgelände hinter der Übergabestelle; Betrieb und Instandhaltung
- DVGW G 621 (A):2022-03, Gasinstallationen in Laborräumen und naturwissenschaftlichen Unterrichtsräumen – Planung, Erstellung, Änderung, Instandhaltung und Betrieb
- DVGW G 631 (A):2024-09, Installation von gewerblichen Gasgeräten in Anlagen für Bäckerei und Konditorei, Fleischerei, Gastronomie und Küche, Räucherei, Reifung sowie Wäscherei
- DVGW G 655 (M) Leitfaden H₂-Ready Gasanwendung (01/2025)
- DVGW G 680 (A), Erhebung, Umstellung und Anpassung von Gasgeräten (03/2020)
- G 1020 (A):2025-03, Qualitätssicherung für Planung, Erstellung, Änderung, Instandhaltung und Betrieb von Gasinstallationen
- DIN EN 15502 (Reihe), Heizkessel für gasförmige Brennstoffe
- DIN EN 437 Prüfgase - Prüfdrücke - Gerätekategorien; Deutsche Fassung EN 437:2021
- DIN EN 33822:2017: Gas-Druckregelgeräte und Sicherheitseinrichtungen
- DWV-Wasserstoff-Sicherheits-Kompodium, Hrsg.: Deutscher Wasserstoff- und Brennstoffzellenverband e.V., Berlin, November 2011
- DVGW CERT ZP 3100-20, Zertifizierungsprogramm Ergänzungsprüfungen für Heizkessel für gasförmige Brennstoffe für einen Wasserstoffgehalt von bis zu 20 Vol.-%
- DVGW Cert ZP 3100-100, Zertifizierungsprogramm Prüfungen für Heizkessel für gasförmige Brennstoffe für einen Wasserstoffgehalt von 100 Vol.-%

Die Anforderungen an die Erdgasinstallation sind im DVGW-Arbeitsblatt G 600, „Technische Regel Gasinstallation“ (TRGI) als nationale Umsetzung der DIN EN 1775:20074 aufgeführt und werden durch das DVGW-Merkblatt G 655:2025 bezüglich Wasserstoffs ergänzt. Insbesondere der Abschnitt 17.2 von G 655 (M) beschreibt die Anforderungen bei der Umstellung von Gasleitungsanlagen, Gasgeräten und industriellen Gasanwendungen auf Wasserstoff. Diese Erkenntnisse beruhen auf den zahlreich zu den verschiedenen Themen durchgeführten Forschungsprojekten im Gasfach.

Forschungsprojekte, insbesondere des DVGW (wie z.B. DVGW, G 202006 (SyWeSt), G 202333 (BAG464), G 201824-D3.5, G 202021 (F&E für H₂), G 202138 (EclHypse), haben gezeigt, dass hinsichtlich Dichtheit und Materialeignung im TRGI-Bereich eine sichere

Wasserstoffnutzung bereits mit der heutigen Gasleitungs- und Gasanschlusstechnik möglich ist. Im DVGW-Merkblatt G 655:2025-01 wird als wesentlicher Punkt für die Umstellung bestehender Leitungsanlagen ein ordnungsgemäßer Betrieb und Instandhaltung, eine Überprüfung der Gaszählerauswahl sowie die Feststellung der Gebrauchsfähigkeit für das Betriebsmedium Wasserstoff genannt. Die angeschlossenen Gasgeräte sind vor der Umstellung gegen H2-Ready-Gasgeräte (mit Umbaukit geeignet für Wasserstoff) auszutauschen.

Zusätzlich wurden derzeit laufende und abgeschlossene Projekt ausgewertet, in welchen Leitungsanlagen und Gasgeräte erhoben, untersucht und umgestellt wurden. Diese Projekte sind sowohl privatwirtschaftlich, DVGW- und öffentlich finanziert. Dementsprechend unterscheiden sich auch die zur Verfügung stehenden Daten deutlich. Tabelle 3.2 zeigt die betrachteten Referenzprojekte.

Tabelle 3.2: Referenzprojekte für die Umstellung von Hausanschlüssen

Projekt	Partner	Ort	Jahr	Wasserstoffanteil	Anschlüsse
H2Switch100	DBI, GNH	Hamburg	In Vorbereitung, bis 2027	100	14
H2Direkt	EBI, kig, Thüga, Energienetze Bayern	Hohenwart	2023-2025	100	11
H ₂ -HoWi	DBI, Westnetz	Holzwickede	2022	100	3
Trafo HyVE – Unterpaket: Erhebung der Installationen in Jüterbog	DBI u.a.	Jüterbog	2022	Bis 100 %	40
Wasserstoff-Insel Öhringen	EBI, Netze BW	Öhringen	2024	30	25
NETZLabor H2-100, Öhringen	EBI, Netze BW	Öhringen	2024/25	100	2
Westküste 100 - TP Grünes Heizen	DBI, thuega, SW Heide	Heide	eingestellt	20	214
H2-20	EBI, GWI, Avacon	Fläming	2023	20	350
Untersuchungen zur Einspeisung von Wasserstoff in ein Erdgasverteilernetz	EBI, E.on, GWI	Klanxbüll	2016	10	177

3.3.2 Komponenten in der Installation (Auszüge aus G 655 (M):2025 + Ergänzungen)

Balgengaszähler:

Eignung und Funktion wurden über das DVGW F&E-Vorhaben G 202010 bestätigt. Die Anforderungen der PTB TR G 19 und G 221 sowie G 685-2 sind zu beachten. Bezüglich der Eignung und Funktion der Messeinrichtung für Wasserstoff ist, bis zum Vorliegen entsprechender Normen oder Zertifizierungsprogramme, ergänzend zu dem Eignungsnachweis für Erdgas eine Herstellererklärung entsprechend den Vorgaben G 221, Anhang C erforderlich. Typischerweise sind installierte Erdgas-BGZ zu klein für den Betrieb mit Wasserstoff dimensioniert. Dementsprechend muss eine Überprüfung der Dimensionierung und ggf. ein Austausch erfolgen.

Bei Tausch der Balgengaszähler gegen einen Größere Bauart ist zu beachten, dass auch ggf. der Zählerplatz umgebaut werden muss (z. B. ab Zählergröße G10). Insbesondere für Einstutzen-Zähler existiert derzeit noch kein geeignetes Umbau-Formteil sodass ein Umbau derzeit von Hand erfolgen muss.

Leitungsanlage:

Gemäß G 600 (A) werden Leitungen seit TRGI 1986 grundsätzlich mit einem Betriebsheizwert von Erdgas L in Höhe von 8,6 kWh/m³ ausgelegt. Die Auslegung mit einem Betriebsheizwert von 8,6 kWh/m³ deckt auch den Betrieb mit Wasserstoff ab, da der um 1/3 geringere Heizwert durch die geringere dynamische Viskosität nahezu ausgeglichen wird [DVGW G 201824-D3.5].

Wurden die Leitungsanlagen mit größeren Betriebsheizwerten als 8,6 kWh/m³ ausgelegt, ist die Dimensionierung anhand der Tabellen im Anhang C bzw. D von G 655 (M) zu kontrollieren.

Für Wasserstoff wurden die Anforderungen und Sicherheitsbetrachtungen im DVGW-Forschungsvorhaben G 201824 Roadmap Gas 2050, TP3, D 3.5 vorgenommen. Für die Leitungsbemessung und Auslegung des Gasströmungswächters mit einem Betriebsdruck 100 hPa sind die entsprechend den Vorgaben der DVGW-Arbeitsblätter G 600 bzw. G 614-1 erstellten Tabellen für Wasserstoff im Anhang C bzw. Anhang D der DVGW Merkblatt G 655 (01/2025) zu verwenden. Die jeweils zulässigen maximalen Druckverluste sind G 600 bzw. G 614-1, Abs. 6.4.1 zu entnehmen.

Die Eignung der Bauteile von bestehenden Leitungsanlagen der Gasinstallation für Wasserstoff wurde in den DVGW-Forschungsvorhaben G 201824-D3.5, G 202006 (SyWeSt), G 202333 (BAG464), G 202010 (H₂-Mess), G 202021 (F&E für H₂), G 202138 (EclHypse) untersucht. Als Ergebnis wurde das Sicherheitskonzept sowie die Eignung bestätigt und es wurden die funktionalen Anforderungen an Bauteile bestätigt.

Unberührt bleiben die Anforderungen aus NDAV § 13, LBO und TRGI, Abschnitt 13.3.3.1.1 sowie G 614-2 zum ordnungsgemäßen Betrieb und Instandhaltung der Leitungsanlagen durch den Betreiber der Anlagen. Im Rahmen der Kundenkommunikation im Vorfeld zur Umstellung ist darauf hinzuweisen.

Aufgrund der unterschiedlichen Stoffeigenschaften ist vor der Umstellung von Erdgas auf Wasserstoff eine Prüfung auf Gebrauchsfähigkeit der Leitungsanlage nach G 600 durchzuführen. Dabei kommen folgende Parameter zur Anwendung:

- Bei Messung vor der Umstellung mit dem Prüfmedium Luft oder Erdgas sind die Kriterien der Gebrauchsfähigkeit nach G 600 (A), Abschnitt 5.6.4.3.1 zu halbieren (DVGW Merkblatt G 655 (01/2025)), das zieht folgende Werte nach sich:
 - Unbeschränkte Gebrauchsfähigkeit < 0,5 l/h Gasleckmenge,
 - verminderte Gebrauchsfähigkeit 0,5 l/h bis < 2,5 l/h Gasleckmenge und
 - keine Gebrauchsfähigkeit ab 2,5 l/h Gasleckmenge
- Bei Messungen im Betrieb (Prüfmedium: Wasserstoff) (DVGW G 655 Merkblatt (Entwurf 2024)):
 - Die Gebrauchsfähigkeitskriterien 1 l/h und 5 l/h können bei Messung mit dem Betriebsmedium Wasserstoff beibehalten werden.

Damit sind bei den entsprechenden Randbedingungen (0,2-facher Luftwechsel, Raumgröße in der Regel über 1 m³) ausreichend Toleranzen gegeben.

Vorgenanntes ist nicht erforderlich, wenn das Ergebnis der letzten dokumentierten Gebrauchsfähigkeitsprüfung die reduzierten Werte nach Aufzählungspunkt a) einhält.

Alternativ ist vor der Umstellung eine Stoßodorierung durchzuführen.

Zur Inbetriebnahme der umgestellten Leitungsanlagen (Spülen/Begasen) sind die DGUV 203-090 bzw. die Abschnitte 5.7.2.1.1 bis 5.7.2.1.4 von DVGW G 600 (A) zu beachten.

ANMERKUNG: Nach DGUV 203-090 sind u. a. Arbeiten an Leitungen der Gasinstallationen (z. B. Zählerwechsel, Instandhaltung) immer im abgesperrten Zustand durchzuführen bzw. es ist sicherzustellen, dass keine gefährdenden Mengen Gas in Räumen entstehen. Nach bisherigem Kenntnisstand sind für diese Arbeiten bei Betrieb mit Wasserstoff keine zusätzlichen Maßnahmen gegenüber DGUV 203-090 bzw. G 600 (A) erforderlich. Dies bedeutet, dass ein direktes Spülen/Begasen mit Wasserstoff nach Regelwerk möglich ist.

Gasdruckregelung:

Eignung und Funktion wurden über das F&E-Vorhaben G 202010 (H₂-Mess) bestätigt. Die Anforderungen der G 221 sind zu beachten. Bezüglich der Eignung und Funktion für Erdgas-Wasserstoffgemische ist, bis zum Vorliegen entsprechender Normen oder Zertifizierungsprogramme, ergänzend zu dem Eignungsnachweis für Erdgas eine Herstellererklärung entsprechend den Vorgaben G 221, Anhang C erforderlich.

Gasströmungswächter:

Es werden folgende Empfehlungen zum Vorgehen im Bestand gegeben (DVGW-Merkblatt G 655 (01/2025)):

- GS vorhanden: In Bezug auf das Schutzziel Manipulationserschwerung keine wesentliche Änderung. D. h. kein Austausch des GS bei Auslegung nach G 600 (siehe 17.2.5.2).
- GS nicht vorhanden (Leitungsanlagen größer 110 kW / 138 kW oder Leitungsanlagen die bis Ende 2003 errichtet wurden): Keine Aufhebung des Bestandschutzes in Bezug auf das Schutzziel Manipulation. Es wird auf die textlichen Inhalte des DVGW-Rundschreibens G 6 /03 zur Thematik „GS“ verwiesen.

ANMERKUNG 1: Wenn eine wesentliche Änderung an der Leitungsanlage erforderlich ist, ist eine Nachrüstung des GS erforderlich. Siehe DVGW-Rundschreiben G 6/03, S 34.

ANMERKUNG 2: Eine GS-Nachrüstung ist immer empfehlenswert, um die Leitungsanlage an den aktuellen Stand der Technik anzupassen.

3.4 Bewertung des aktiven und passiven Sicherheitskonzeptes

Die Schutzziele der DVGW-Arbeitsblätter G 600 oder G 614-1 und die Funktion der Bauteile dürfen nicht beeinträchtigt werden.

Das Sicherheitskonzept für Leitungsanlagen der Gasinstallation für Wasserstoff wurde in dem DVGW-Forschungsvorhaben G 201824-D3.5, G 202021 (F&E für H₂), G 202010 (H₂-Mess), G 202138 (Echlypse) untersucht. Als Ergebnis wurde das bestehende Sicherheitskonzept nach DVGW-Arbeitsblatt G 600 und G 614-1 (bis 1 bar) für Wasserstoff (5. Gasfamilie nach G 260) bestätigt.

Zur Inbetriebnahme der umgestellten Leitungsanlagen (Spülen/Begasen) sind die DGUV 203-090 bzw. die Abschnitte 5.7.2.1.1 bis 5.7.2.1.4 von DVGW G 600 (A) zu beachten.

ANMERKUNG: Nach DGUV 203-090 sind u. a. Arbeiten an Leitungen der Gasinstallationen (z. B. Zählerwechsel, Instandhaltung) immer im abgesperrten Zustand durchzuführen bzw. es ist sicherzustellen, dass keine gefahrdrohenden Mengen Gas in Räumen entstehen. Nach bisherigem Kenntnisstand sind für diese Arbeiten bei Betrieb mit Wasserstoff keine zusätzlichen Maßnahmen gegenüber DGUV 203-090 bzw. G 600 (A) erforderlich.

Auch für die leitungsgebundene Versorgung mit Wasserstoff gilt, dass gemäß DVGW-Arbeitsblatt G 280 bei der leitungsgebundenen Versorgung der Allgemeinheit mit Gas nach DVGW-Arbeitsblatt G 260 die Gase einen hinreichenden Geruch (Warngeruch) haben müssen. Sofern sie diesen nicht aufweisen, müssen sie odorisiert werden.

Auf die Anforderungen zur Abnahme nach Regelwerk durch Fach-/Sachkundige bzw. Sachverständige und ggf. gutachterliche Äußerung, eines Sachverständigen nach EnWG § 113c wird hingewiesen.

3.5 Umstellung von Werksnetzen nach DVGW-Arbeitsblatt G 614-1

Ansprüche an innere und äußere Dichtheit und Explosionsschutz

Wasserstoff und Erdgas besitzen ähnliche untere Explosionsgrenzen (UEG). Eine signifikante Abweichung ist hingegen bei der oberen Explosionsgrenze (OEG) festzustellen. Hier kommt der Effekt von Wasserstoff sehr deutlich zum Tragen (die obere Zündgrenze für

Wasserstoff ist um Faktor 5 höher als die von Erdgas), da insb. bei kleineren Leckagen (z.B. Punktquellen infolge von Korrosion, Undichtheiten) an Leitungen hohe Brenngaskonzentrationen erreicht werden können.

Die sicherheitsgerichteten Maßnahmen, wie zum Beispiel Lecksuche oder Gaswarneinrichtungen, können aufgrund der ähnlichen UEG bei den Gasen unberührt bleiben, müssen aber für die jeweilige Gasart geeignet sein. Da sich die Einstellung solcher Geräte an der UEG orientieren, bleibt eine Anpassung dieser Grenze unbeeinträchtigt.

Bezüglich der Explosionsgrenze muss eine Ansammlung von Wasserstoff in geschlossenen Räumen grundsätzlich durch technische oder bauliche Maßnahmen vermieden werden, dies stellen auch Maßnahmen wie Belüften und Odorieren dar.

Da für das Entstehen und das Gefahrenpotential eines zündfähigen Gemisches die untere Zündgrenze entscheidend ist, gibt es hier keinen wesentlichen Unterschied zum Erdgas.

Für freiverlegte Leitungsanlagen (außerhalb und innerhalb von Gebäuden) auf Werksgelände bis 1 bar wird auf die Ausführungen unter 3.3 bis 3.4 verwiesen.

Für freiverlegte Leitungen (außerhalb und innerhalb von Gebäuden) über 1 bar sind die Anforderungen G 614-1¹⁵ und -2¹⁶ sowie die wasserstoffspezifischen Anforderungen aus G 655 (M), Abschnitte 17.2, 17.2.2, 17.2.3.2 als auch G 221 (M) zu beachten.

Für erdverlegte Leitungen und Hausanschlüsse sind in Ergänzung zu den bestehenden Regelungen für Erdgas, G 459-1 (A), G 462 (A), G 463 (A), G 464 (M), G 472 (A), G 469 (A) die DVGW-Merkblätter G 407, G 408 und G 409 sowie G 469-B1 und insbesondere die Abschlussberichte G 202006 (SyWeSt) und G 202333 (BAG464) zu beachten. Siehe dazu die Ausführungen im Abschnitt 2.

In bisher durchgeführten Referenzprojekten von Industrieanlagen wurde neben der vollständigen Bewertung der installierten Komponenten vor allem die Dichtheit und Zustandsbewertung der Leitungsanlage in den Fokus gerückt.¹⁷

Das derzeit geltende Arbeitsblatt G 614-2 Kapitel 6 regelt die allgemeinen Grundlagen für die Zustandsbewertung der Gasanlage auf Werksgelände. Vor Umstellung sollten nach jetzigem Stand auf Basis der G 614-2, G 655 und G 221, sowie DGUV 203-092 in Verbindung mit BGEM FB007 und des aktuellen Stands von Wissenschaft und Technik folgende Überprüfungen des ordnungsgemäßen Betriebs des Werksnetzes stattfinden:

- Überprüfung und Abgleich von Prüfplan und Prüfpflichten
- Sichtkontrolle der Leitungsanlage
- Überprüfung aller Abschnitte auf Dichtheit, hierbei ist G 655, Abschnitt 17.2.3.2, Absatz 3 zu beachten

¹⁵ In Teilen nationale Umsetzung der DIN EN 15001-1:2023 „Gasversorgungssysteme - Gasleitungsanlagen mit einem Betriebsdruck größer 0,5 bar für industrielle Installationen und größer 5 bar für industrielle und nicht-industrielle Installationen - Teil 2: Detaillierte funktionale Anforderungen an Inbetriebnahme, Betrieb und Instandhaltung; Deutsche Fassung EN 15001-2:2023“

¹⁶ In Teilen nationale Umsetzung der DIN EN 15001-2:2023 „Gasversorgungssysteme - Gasleitungsanlagen mit einem Betriebsdruck größer 0,5 bar für industrielle Installationen und größer 5 bar für industrielle und nicht-industrielle Installationen - Teil 2: Detaillierte funktionale Anforderungen an Inbetriebnahme, Betrieb und Instandhaltung; Deutsche Fassung EN 15001-2:2023“

¹⁷ Industrieprojekte, durchgeführt durch DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH

- Beurteilung des baulichen Zustands
- Beurteilung der Mängel-Historie
- Bewertung der installierten Komponenten (bis 5 bar über G 202021 „Werkstoffmatrix abgedeckt“) (5-16 bar BAG464 + Weitere Forschungsprojekte (z.B. Flansche, Absperrarmaturen))¹⁸
- Einholen von Herstellererklärungen der Komponenten oder Bewertung durch Sachverständigen für die Wasserstofftauglichkeit
- Instandsetzung und/oder Austausch nicht geeigneter oder defekter Komponenten/ Leitungen
- Anpassung von Prüfplänen und Prüfzeiten sowie von Bewertungs- und Klassifizierung-Schemata
- Dokumentation

Zur Inbetriebnahme der umgestellten Leitungsanlagen (Spülen/Begasen) sind G 614-2 in Verbindung mit bzw. DIN EN 15001-2, Abschnitt 5.2 sowie DGUV 203-090 in Verbindung mit FBETEM-007 zu beachten.

Auf die Anforderungen zur Abnahme nach Regelwerk durch Fach-/Sachkundige bzw. Sachverständige und ggf. gutachterliche Äußerung, eines Sachverständigen nach EnWG § 113c wird hingewiesen.

3.6 Umstellung von industriellen Gasanwendungen, wie z. B. Thermoprozess-Anlagen

Diese Anlagen sind nach ProdSG, BetrSichV, GefStoffVO ggf. ÜAnlG sowie den einschlägigen DIN EN Normen auf Ihre H₂-Eignung durch entsprechend qualifiziertes Personal zu bewerten und umzustellen. Auf die Inhalte der DVGW-Information Gas Nr. 10 sowie G 655, Abschnitt 15 und 17.2.8 wird hingewiesen.

Relevant sind hier u.a. die Aussagen der DIN EN ISO 13577-2, Industrielle Thermoprozessanlagen und dazugehörige Prozesskomponenten Sicherheitsanforderungen Teil 2: Feuerungen und Brennstoffführungssysteme ist wie folgt geregelt:

„4.9.7 Entfernen von Brennstoffrückständen“

„Bei gasförmigen Brennstoffen mit einem Volumenanteil von mehr als 80 % Wasserstoff (...) muss der Restbrennstoff von den automatischen Absperrventilen zu den Brennern gefahrlos abgeleitet oder verbrannt werden, es sei denn, die Menge des Restbrennstoffs im Verhältnis zur Brennkammergröße stellt keine Gefahr dar oder führt zu einem unsicheren Zustand.“

Bewertungsgrundlage ist in diesem Fall die UEG, welche in jedem Fall unterschritten sein muss. Dies kann beispielsweise über kurze Rohrleitungslängen zwischen Magnetventil / Absperrklappen und dem Brenner gewährleistet werden.

¹⁸ Anmerkung: Hinsichtlich der Materialverträglichkeit bis 5 bar gelten keine Einschränkungen ggü. dem Betrieb mit Erdgas. Generell finden hier die Arbeitsblätter G 614-1 und G 614-2 sowie die DGUV 203-092 ggf. in Verbindung mit BGEM FB007 Geltung. Für Anlagen bis DP 16 bar gelten bei erdverlegten Leitungen für den Betrieb die Regeln nach Arbeitsblätter G 465-1 bis -4, G 221 sowie hinsichtlich der Materialtauglichkeit das Merkblatt G 407 und G 408.

„4.11.6 Höchstwerte der Sicherheitszeiten für Gebläsebrenner und gasbefeuerte Brenner mit mechanischer Verbrennungsluftzuführung“:

Bei Wasserstoff und Brenngasen mit einem Volumenanteil von mehr als 80 % Wasserstoff muss die Sicherheitszeit auf 3 Sekunden begrenzt werden.

Diese Werte sind ähnlich / vergleichbar zu den Vorgaben für Erdgas aus der DIN EN ISO 13577-2 (früher DIN EN 746), müssen in der Prozessregelung und beim Layout der Brennstoffführungssysteme aber immer zwingend beachtet werden. Hinweise für die Umstellung von industriellen Anwendungen werden in G 201824-D3.4 gegeben.

4 Umstellung häusliche/gewerbliche und industrielle Gasanwendungen

Anknüpfend an die Betrachtung der Leitungsanlagen im häuslichen und gewerblichen Bereich, werden in diesem Kapitel die Rahmenbedingungen einer Umstellung für die Gasanwendung näher betrachtet. Das anzuwendende Regelwerk für den Umstellprozess der Gasgeräte und industriellen Anwendungen ist das DVGW-Arbeitsblatt G 680 „Titel ergänzen“, auch wenn in diesem derzeit noch nicht explizit die Umstellung auf Wasserstoff enthalten ist. Qualifikationsanforderungen an Umstellfirmen werden in G 682 „Titel ergänzen“ beschrieben. Um eine Erdgas-Wasserstoff-Umstellung auch gesetzlich abzubilden, sind sinnngemäße Regelungen im EnWG wie für eine L-H-Gasanpassung erforderlich. Grundsätzlich werden im GEG aus 2024 (§71) die Grundlagen für Wasserstoffnetze zur Wärmeversorgung geschaffen.

Analog zu den Versuchsaufbauten in Kapitel 3, werden in Kapitel 4.1 Versuchsreihen an Gasgeräten beschrieben und ausgewertet. Kapitel 4.2 gibt einen Überblick über den aktuellen, technologischen Stand von Gasgeräten in Bezug auf reine Wasserstoffanwendung. Hier werden Hinweise auf bereits erarbeitetes und gültiges Regelwerk sowie Zertifizierungsprogramme gegeben.

4.1 Versuchsreihen am GWI

Im Vordergrund der gesamten Gasumstellung steht ein möglichst problemloser Übergang und damit Austausch der Gase untereinander, ohne dass es im Leitungsnetz zu undefinierten Zuständen oder Komfortproblemen bei den Gasabnehmern kommt. Im Versuchsaufbau entsprechende Probleme zu lokalisieren und verfügbare Lösungen auf spätere Netze zu übertragen ist Gegenstand der fortlaufenden Untersuchungen. Im angepassten Maßstab wird also die oben beschriebene Infrastruktur in Teilen dazu verwendet, eine realitätsnahe Umstellung abzubilden und Gefahren sowie Verbesserungspotential zu identifizieren.

Nach erfolgreicher Inbetriebnahme der Wasserstoffinfrastruktur erfolgte die Installation der Gasgeräte im Demo-Haus. Für das Projekt konnten zwei Hersteller gewonnen werden, die wandhängende Brennwertgeräte speziell für den Betrieb mit 100 % Wasserstoff bereitstellen. Es handelt sich dabei ausschließlich um 100%-H₂ Geräte, Umrüstkits sind zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht verfügbar. Einige Hersteller bieten seit 2024 bereits Gasgeräte an, welche aktuell bis 20 % H₂-Beimischung geeignet sind und ab 2026 mit einem dann verfügbaren „Umstellkit“ mit einfachen Handgriffen und vertretbarem Aufwand auf Wasserstoff umgestellt werden können [41, 42]. Das während der Projektlaufzeit installierte Gerät weist eine maximale Wärmebelastung von 35 kW auf. Da das zweite Gerät erst zum Projektende installiert werden konnte, existieren dafür zum Zeitpunkt der Berichtserstellung keine relevanten Messdaten.

Zur Simulation eines Umstellprozesses wird der Leitungsabschnitt von der Gasdruckregelanlage bis zum Gasgerät mit Erdgas befüllt und entlüftet. Die Befüllung erfolgt über den Bypass der GDRA, welcher neben der Erdgasanwendung auch die spätere Inertisierung via Stickstoff ermöglicht. Da der in Kapitel 3.1 beschriebene H₂-Speicher nicht vor Projektende geliefert bzw. in Betrieb genommen werden kann, muss hier auf eine alternative Wasserstoffbereitstellung zurückgegriffen werden. Die Versorgung mit H₂ über die Versuchsdauer wird über ein Wasserstoffbündel realisiert. Dieses Bündel stellt über die Verschaltung von 12 Flaschen à 300 bar eine Gesamtleistung von circa 60 kW zur Verfügung. Kurzfristig könnten somit drei Geräte in einer Größenordnung zu je 20 kW parallel betrieben werden. Technisch wird dieser Bypass

durch entsprechende Kugelhähne, zertifiziert nach DIN EN 331 von der übrigen H₂-Infrastruktur des GWI getrennt, ein Zurückströmen des eingespeisten Erdgases in die H₂-Infrastruktur wird so vermieden. Befüllt wird der Netzabschnitt so lange, bis an den einzelnen Abgängen und am Ausgang der Spülleitung ins Freie eine Erdgaskonzentration von näherungsweise 100% vorliegen. Dieser Ausgangszustand setzt die Rahmenbedingung für die Übertragungsfähigkeit der anstehenden Versuche ins Feld. Bevor ein Umstellprozess angestoßen wird, befindet sich also die nach TRGI ausgeführte Innenleitung unter Erdgas.

Die wesentliche Problematik hinsichtlich der Geräteumstellung stellt die Anwesenheit von restlichem Erdgas in der Leitung zwischen dem Einspeisepunkt für Wasserstoff und dem Gasgerät dar. So besteht zum Zeitpunkt der Umstellung die unwahrscheinliche Möglichkeit, dass ein H₂-100 Vol.-% Gerät während der Inbetriebnahme über einen undefinierten Zeitraum sowohl mit Erdgas als auch mit Erdgas-H₂-Gemischen versorgt wird, sofern auf eine Inertisierung verzichtet wird. Da nicht vorausgesetzt werden kann, dass jedes zum späteren Zeitpunkt verfügbare Gasgerät eine Beaufschlagung mit Erdgas überhaupt verträgt, wurden im Nachgang mehrere Möglichkeiten untersucht, das Erdgas vor Inbetriebnahme der 100 Vol.-%-H₂-Geräte weitestgehend aus der Leitung zu entfernen. Zu diesem Zweck wird ein verfügbares, erdgasbetriebenes Brennwertgerät auf den Prüfstand gestellt. Diese Versuche sollen ein Szenario abbilden, in welchem ein nicht für Wasserstoffbetrieb geeignetes Erdgasgerät zeitweise nicht bestimmungsgemäß mehr oder weniger beabsichtigt mit Wasserstoff beaufschlagt wird. Als Ergebnis der vorausgehenden Erhebungen nach G 680 der verbauten Gasgeräte sind alle Geräte zu identifizieren und entsprechend zu Kennzeichnen, um dieses Szenario zu verhindern. Würden hingegen einzelne Gasgeräte nicht oder falsch erhoben, könnte es dazu kommen, dass nicht erfasste Bestandsgeräte vereinzelt mit Wasserstoff in Kontakt kommen, was hier simuliert werden soll.

Währenddessen werden die im Demo-Haus installierten 100-Vol.-% -H₂-Geräte mit 100 % Wasserstoff in Betrieb genommen. Performance-basierte Tests sowie mögliche Störungsfälle werden an diesen Gasgeräten vorgenommen. Eine Beaufschlagung mit erdgashaltigem Wasserstoff muss lt. Hersteller weitestgehend verhindert werden. Wie aus dem Workshop mit den Geräteherstellern, protokolliert in Kapitel 4.3, zu diesem Thema hervorgeht, wird seitens der Hersteller eine Wasserstoffreinheit gemäß G 260 vorausgesetzt, nach Gruppe A also mindestens 98% H₂.

So besteht der Untersuchungsaufwand zunächst darin, die Leitungsanlage der Hausinstallation so auf Wasserstoff umzustellen, dass das Gasgerät erst gar nicht oder, falls unvermeidlich, so wenig Erdgas ausgesetzt wird, wie möglich. Hier wurde der Umstellprozess der Leitungsanlage in verschiedenen Ausführungen betrachtet. Um Geräteschäden und unsichere Situationen im Demo-Haus zu vermeiden, wurden die Versuche zum Gasaustausch und zu den Gerätereaktionen auf Prüfstände ausgelagert. Dabei wurde auch untersucht, inwieweit die hinsichtlich der Wasserstoffanforderung unreinen Gase/Gasgemische (CH₄/H₂, H₂/N₂) von den Bestandsgeräten im Sinne der THG-Minderung beim Spülprozess verbrannt werden konnten. Als Bestandsgerät dient in diesem Fall ein selbstadaptierendes Brennwertgerät. Hier sei auch die Ausblasproblematik des Erdgases in Hinblick auf THG-Emissionen angesprochen.

Zur Versinnbildlichung ist hier ein Schaubild angefügt, welches den Versuchsaufbau verdeutlicht.

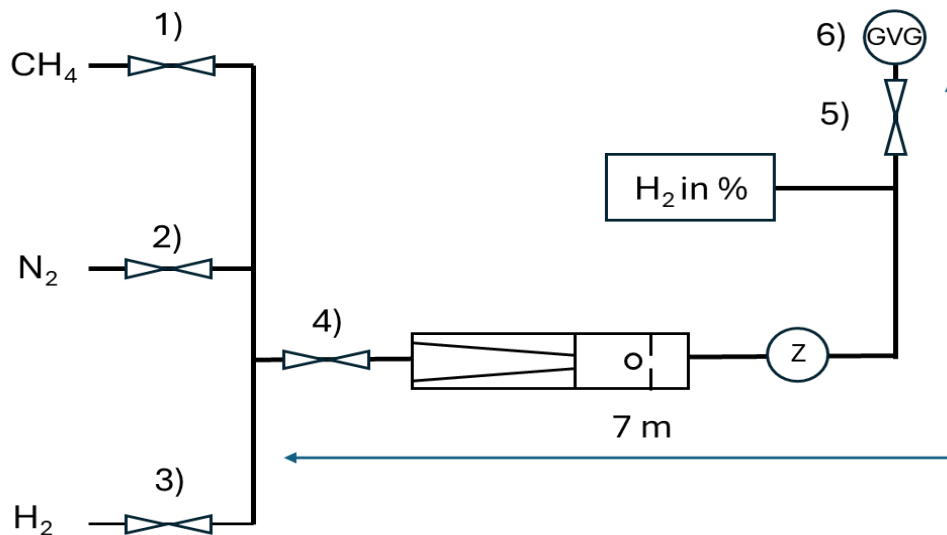


Abbildung 4.1: Schaubild des Versuchsaufbaus AP3-1 bis AP 3-4

Die Basis für alle Versuchsreihen bildet eine adaptierte TRGI-Hausinstallation, schematisch in Abbildung 4.1 gezeigt, an dessen Ende ein konventionelles, auf Erdgas ausgelegtes Brennwertgerät (Gasverbrauchsgeräte – GVG) getestet wird. Diese sollen genutzt werden, um die Restmengen Erdgas in der Zuleitung während einer Umstellung der Leitungsanlage zu verbrennen und einen möglichst hohen Wasserstoffanteil im Brenngas unmittelbar vor dem Gerätetausch zu erreichen. Unter den Ziffern 1 bis 3 befinden sich die Gase, welche über die Gasmischanlage zur Verfügung gestellt wurden. 4 stellt die Hauptabsperreinrichtung (HAE) nebst Gasdruckregler und Gasströmungswächter dar. Anschließend durchströmt das Gas den Gaszähler (Z), durch den Gerätehahn (5), vor welchem die H₂-Konzentrationsmessung abzweigt und mündet schließlich im Gasverbrauchsgerät (GVG). Zur Orientierung in den nachfolgend beschriebenen Versuchsreihen dienen entsprechend bezifferten Armaturen und Komponenten 1) – 6) des Schaubildes als Referenz. Im Ausgangszustand ist die Leitung grundsätzlich mit Erdgas bei 20 mbar gefüllt. Anders als bei den Versuchen in AP 2 steht hier nicht die Inertisierung der Leitung, sondern die Beaufschlagung eines erdgasbetriebenen Brennwertgeräts mit möglichen Gasgemischen im Zuge der Umstellung im Fokus. Hier wird also das Gemisch bis zur Verbrennung im Gerät verfolgt und nicht durch entsprechende Spülpositionen vorab aus der Leitung entfernt.

Es werden mit 7 Metern Länge eine repräsentative Leitungsdimension gewählt, welche den Abstand zwischen der Hauseinführung und dem 1. Gasgerät nachempfunden ist. Das soll die Übertragbarkeit auf reale Hausinstallationen vereinfachen. Natürlich wird es in der Praxis wesentlich größere Distanzen zwischen HAE und dem Gasgerät geben, welche es zu berücksichtigen und überwinden gilt. Ergebnisorientiert und ressourcenschonend wird hier jedoch auf eine 7 Meter Referenzvariante zurückgegriffen. Unter Berücksichtigung der verwendeten Dimensionen, Leitungsdrücke und der Leistung der angeschlossenen Gasgeräte sei eine Extrapolation auf entsprechend größere Leitungsabschnitte durchführbar. In dem hier gewählten Aufbau sind ebenfalls der Gasdruckregler und der Gasströmungswächter (im Gebäude) integriert. Der Gaszähler in analoger Ausführung vervollständigt die Hausinstallation im Sinne der verbauten Komponenten, wird während der Versuche jedoch nicht abrechnungstechnisch eingebunden.

Das Brennwertgerät wird regulär in Betrieb genommen und betrieben, bis sich ein stationärer Betrieb einstellt. Während der Versuchsreihen werden folgende Parameter gemessen:

- H_2 -Konzentration im Brenngas am Gerät
- Wärmeleistung als Indiz des Betriebszustandes
- Abgasemissionen – Temperatur, O_2 , CO_2 , CO , NO_x , H_2 im Abgas
- Zeit von Umschaltung bis Gerätereaktion auf alternatives Gas

Bei den folgenden vier Versuchsreihen gilt es zu beachten, dass der Betrieb jener Gasgeräte mit undefinierten, nicht bestimmungsgemäßen Gasbeschaffenheiten außerhalb jedes Regelwerks oder Herstellervorgaben durchgeführt wird. Die Messergebnisse werden verdeutlichen, dass eine solche Vorgehensweise keine Praxistauglichkeit aufweist und im Feld nicht in der Form durchzuführen ist bzw. durch die in G 680 beschriebene Verfahrensweise zur Erhebung und Umstellung der Gasgeräte/Gasanwendungen auszuschließen ist. Die unteren Ausführungen unterstreichen die Dringlichkeit durch gewissenhaftes Arbeiten eine derartige Situation möglichst zu vermeiden.

Versuch AP 3-1

Während der ersten Versuchsreihe wird zunächst das GVG (6) ausgeschaltet. Anschließend wird die Erdgaszufuhr (1) geschlossen. Die H_2 -Versorgung (3) wird geöffnet. Das GVG (6) wird wieder in Betrieb genommen. Nun wird beobachtet, wie lange das Gerät weiterbrennt, bis ein entsprechendes H_2/CH_4 -Gemisch vorliegt, welches zu einer unerwünschten Reaktion in der Brennkammer führt. Es wird festgestellt, wie lange die Flamme von der Flammenüberwachung erkannt wird, ob ein Rückschlagen der Flamme zum Brenner vorliegt, wie sich die Verbrennungshygiene ändert und ab welcher Konzentration das Gerät in Störung geht. So wird bei Abschaltung des Bestandsgeräts eine identifizierte Restkonzentration CH_4 in Wasserstoff vorliegen, mit welcher theoretisch das Austauschgerät (H_2 -100%) in Betrieb genommen wird, sollte das Gas nicht anderweitig abgelassen werden.

Versuch AP 3-2

Das GVG wird in Betrieb genommen, bis sich ein Beharrungszustand einstellt. Nun wird die Erdgasversorgung (1) geschlossen. Das Gerät brennt so lange weiter, bis ein entsprechender Vordruck unterschritten wird. Dieser wird über die Druckmessbohrung am Gerät erfasst. Nachdem das Gerät aus- bzw. in Störung gegangen ist, wird der Gerätehahn (5) geschlossen. Die Wasserstoffversorgung (3) wird geöffnet und es stellt sich der Geräteanschlussdruck von 20 mbar ein. Es liegt ein Wasserstoff-Methangemisch vor. Die Konzentration wird ebenfalls über die Druckmessbohrung des GVG messtechnisch erfasst. Im Vergleich zu Versuchsreihe 1 müsste die H_2 -Konzentration nun deutlich größer sein. Der Gerätehahn (5) wird geöffnet und das GVG (6) in Betrieb genommen. Analog zu Versuchsreihe 1 werden die Parameter gemessen und die Reaktion des Geräts überwacht.

Versuch AP 3-3

Versuchsreihe 3 erweitert den Gasaustausch um die Inertisierung mit Stickstoff. Analog zu den beiden vorherigen Versuchsreihen wird das Erdgasbrennwertgerät in Betrieb genommen, bis ein stabiler Beharrungszustand erreicht ist. Nun wird das GVG abgestellt und die Erdgasversorgung zugedreht. Anschließend wird die Stickstoffversorgung geöffnet und das Gerät wieder

in Betrieb genommen. Es wird sich ein Erdgas-Stickstoffgemisch einstellen. An dieser Stelle wird aufgezeichnet, bis zu welcher Stickstoffkonzentration das Gerät den Betrieb aufrechterhält.

Versuch AP 3-4

Das GVG wird in Betrieb genommen, bis sich ein Beharrungszustand einstellt. Nun wird die Erdgasversorgung (1) geschlossen. Das Gerät bleibt so lange in Betrieb, bis ein entsprechender Vordruck unterschritten wird. Dieser wird über die Druckmessbohrung am Gerät erfasst. Nachdem das Gerät aus bzw. in Störung gegangen ist, wird der Gerätehahn (5) geschlossen. Die Stickstoffversorgung (2) wird geöffnet und es stellt sich der Geräteanschlussdruck von 20 mbar ein. Es liegt ein Stickstoff-Methangemisch vor. Die Konzentration wird ebenfalls über die Druckmessbohrung des GVG messtechnisch erfasst. Der Gerätehahn (5) wird geöffnet und das GVG (6) in Betrieb genommen. Erneut werden die Verbrennungsparameter überwacht und die finale N₂-Konzentration gemessen, bei welcher das Gerät abschaltet bzw. in Störung geht.

Versuch AP 3-5

Abschließend zu den durchgeführten Versuchsreihen hinsichtlich der mit Erdgas befüllten Zuleitung wird in diesem Arbeitspaket das installierte 100-Vol.% H₂-Gerät im Demo-Haus betrachtet. Da die verfügbare Gasqualität mit 100-Vol.-% H₂ keine anderweitigen Komponenten beinhaltet, entfallen in diesem Zusammenhang Untersuchungen schwankender Gasqualitäten. Genauer werden hier die Verbrennungsstabilität (Abgaswerte) und Performance in Teillastbereichen betrachtet.

Auswertung

Die oben beschriebenen Versuchsreihen werden einzeln ausgewertet und dargestellt. Die abgebildeten Messkurven können zueinander leicht verschoben sein, da aufgrund unterschiedlicher Messsysteme, Messverfahren, Übertragungszeiten und Auswertemomenten divergentes Datenlogging nicht ausgeschlossen werden kann. Aller Voraussicht nach besteht hier die Abweichung in der Regel in einem Messzyklus von 2 bis 3 Sekunden. Die markierten Bereiche sind folglich etwas größer gewählt, um diese Art der Darstellungsunsicherheit etwas zu reduzieren. Grundsätzlich werden für die Versuchsreihe validierte, kalibrierte Messgeräte verwendet, um die Genauigkeit untereinander ebenfalls zu gewährleisten. Ferner wird in den folgenden Darstellungen nach Umstellen des Gases eine Wasserstoffkonzentration von nahezu 100% abgebildet. Um hier eine Fehleinschätzung vorwegzunehmen, sei auf die Position und das Messprinzip hingewiesen. Die Wasserstoffkonzentration wird am T-Stück (5), also unmittelbar vor dem Gerät gemessen. Im Messsystem wird mittels kontinuierlicher Strömung aus dem Gasfluss die Konzentration ermittelt. Schließt nun das Magnetventil im Gasgerät aufgrund einer Geräteabschaltung oder eines Störfalles, gelangt das Gas zwar nicht mehr in das Gerät, die Konzentrationsmessung wird aber fortgeführt. Um hier dennoch eine Aussage über den Bereich der Wasserstoffkonzentration zu extrahieren, wurde während der Messung unter Zuhilfenahme einer Stoppuhr der Bereich des Geräteausfalls gemessen. Aus den vorgenannten Gründen wird bei der Auswertung also ein Wasserstoffkonzentrationsbereich definiert, innerhalb welchem es zu dem Geräteausfall kommt. Eine leichte Unschärfe sei an dieser Stelle zugelassen.

Auswertung Versuch AP 3-1

Das Brennwertgerät konnte nach Herstellervorgaben installiert und in Betrieb genommen werden. Nachdem ein einwandfreier Betrieb mit Erdgas bis zum Beharrungszustand festgestellt werden konnte, wurde das Gerät ausgeschaltet, die Erdgasversorgung abgedreht und die Wasserstoffversorgung zugeschaltet.

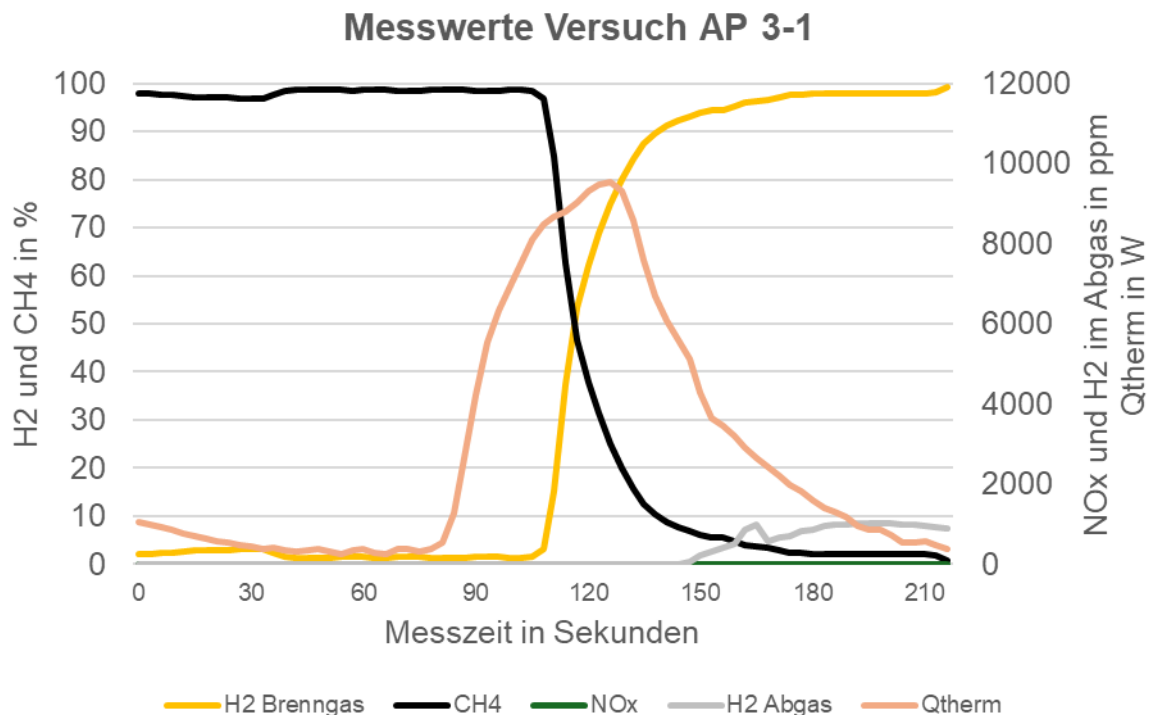


Abbildung 4.2: Messergebnisse AP 3-1

Abbildung 4.2 stellt die wesentlichen, gemessenen Parameter gegenüber. Die schwarze Kurve zeigt die CH_4 -Konzentration gegenüber der H_2 -Konzentration gelb abgebildet. Das Gerät lässt sich ohne Probleme starten und kann circa 22 Sekunden betrieben werden. Akustisch wahrnehmbar als Flammenrückschlag erreicht das Erdgas-Wasserstoffgemisch die Brennkammer und verhindert eine weitere Verbrennung, das Gerät geht aus und in Störung. Die orange abgesetzte Linie zeigt die erfasste Wärmebelastung wasserseitig. Die anschließenden Spülvorgänge im Gerät und die ausbleibende Zündung sind durch die sich einstellende H_2 -Konzentration von bis zu 1000 ppm im Abgas als graue Linie eingezeichnet. Es kann auch bei wiederholten Zündversuchen nicht wieder gestartet werden. Die Messdaten bestätigen, dass die Störung während des Gaswechsels auftrat. Aufgrund der schnellen Dynamik des Übergangs kann jedoch die genaue Wasserstoffkonzentration, die zum Geräteausfall führt, nicht reproduzierbar bestimmt werden. Die Auswertung der erfassten H_2 -Konzentrationsmesskurve zeigt einen schnellen Anstieg der Wasserstoffkonzentration von 0 auf nahezu 100 % innerhalb von 32 Sekunden. Die Daten legen nahe, dass die Wasserstoffkonzentration zum Zeitpunkt des Geräteausfalls bei über 60% liegt. Es wird daher angenommen, dass es innerhalb der kurzen Zeit zwischen Abschaltung des Geräts im Erdgasbetrieb bis zum Erreichen der Wasserstoffversorgung zu keiner homogenen Durchmischung der Gase kommt. Diese Art des Gasaustauschs führt vermutlich zu einer kleinen Mischzone zwischen den Einzelgasen. Der kurzfristige Gasübergang führt dann zu dem schlagartigen Geräteausfall. Das Brennwertgerät wurde bei diesen Versuchen, bis auf einen Knall und der damit verbundenen Auswirkungen auf die Abgaswerte, nicht beschädigt.

Sollte ein auf Erdgas ausgelegtes Brennwertgerät also mit einem wasserstoffreichen Gasgemisch (H_2 Konzentration > 60%) betrieben werden, wird es mit hoher Wahrscheinlichkeit zu einem Flammenrückschlag, einem anschließenden Geräteausfall und damit nicht kalkulierbaren Folgeschäden kommen.

Auswertung Versuchsreihe AP 3-2

Nach Beendigung der ersten Versuchsreihe kann das Gerät ohne Probleme wieder in Betrieb genommen und für die folgende Versuchsreihe konditioniert werden. Anders als beim vorangegangenen Test erfolgt hier zunächst die Abschaltung des Geräts nicht manuell, sondern durch Gasmangel als Folge des Zudrehens der Erdgaszufuhr. Ziel dieser Variante ist es, die effektive Menge an Erdgas in der Zuleitung weitestgehend zu reduzieren.

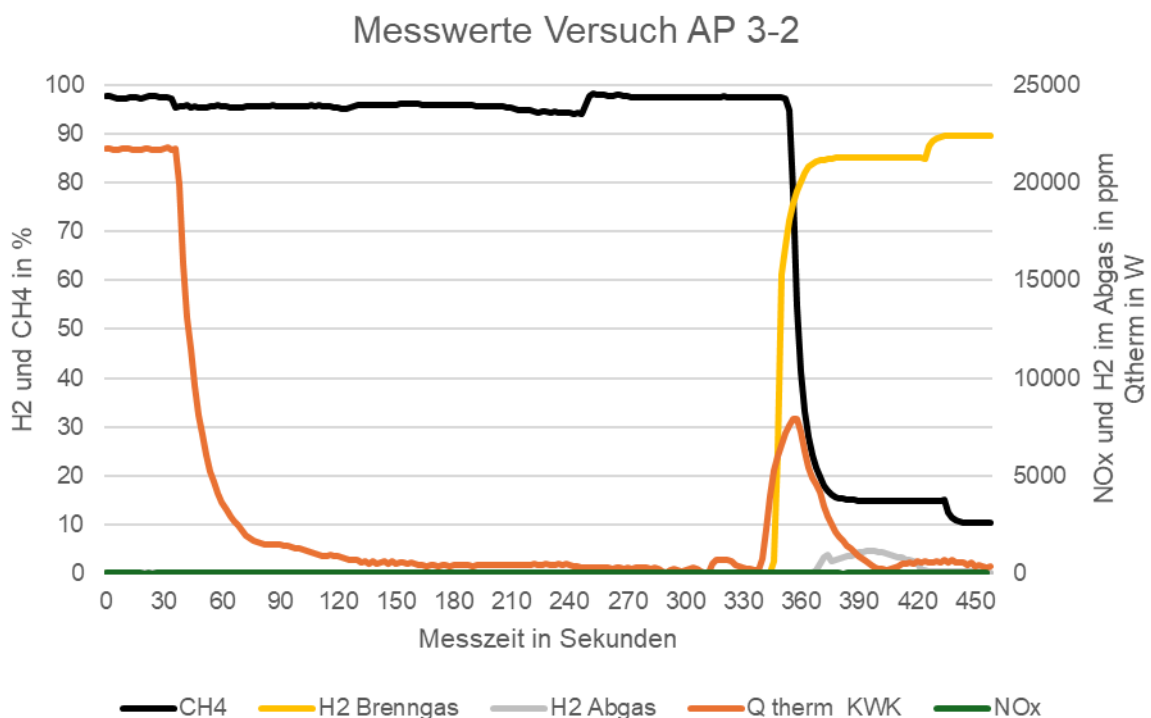


Abbildung 4.3: Messwerte AP 3-2

Die orangene Linie aus dem Graphen der Abbildung 4.3 zeigt, dass das Brennwertgerät zunächst abgeschaltet und nach Umstellen der Gasversorgung wieder in Betrieb genommen wird. Es ist der zeitlich verkürzte Übergangsbereich des Gaswechsels zu verzeichnen. Im Vergleich zum ersten Durchgang erfolgt hier ein stärkerer Konzentrationsanstieg der Wasserstoffkurve. Entgegen erster Annahmen, dass durch die im Vergleich zu Versuch AP 3-1 geringere Menge Erdgas in der Zuleitung ein Gaswechsel im Gerät entsprechend schneller stattfinden würde, lässt sich der Gaswechsel auf circa. 30 Sekunden beziffern, also marginal kürzer als im vorangegangenen Versuch. Abbildung 4.3 zeigt diesen Wechsel in dem Zeitfenster zwischen 500 und 543 Sekunden. Analog zu dem sich einstellenden Gaswechsel zündet das Gerät, geht vorübergehend in Betrieb und mit Erreichen von ca. 60% H_2 durch Flammenrückschlag in Störung. Dieser Flammenrückschlag erfolgt nahezu deckungsgleich mit dem vorangegangenen Versuch hinsichtlich der Konzentration und der akustischen Tragweite. So führen auch die darauffolgenden Wiederzündversuche unter weiter steigender H_2 -Konzentration erwartungsgemäß zu keinem Betriebszustand. Durch die Anwesenheit von H_2 im Abgas (grau hinterlegte Linie) wird deutlich, dass das Brennwertgerät nach erfolglosen Zündversuchen in

Störung geht. Erst nach erneutem Gaswechsel auf Erdgas kann das Brennwertgerät wieder in Betrieb genommen werden.

Auswertung Versuch AP3-3

Versuch AP 3-3 veranschaulicht die Möglichkeit einer Gasumstellung mit Zwischeninertisierung durch Stickstoff. Analog zu Versuchsreihe 1 wird zunächst das Gasgerät ausgeschaltet. Nach der Umstellung von der Erdgasversorgung auf eine Stickstoffzufuhr wird das Gerät eingeschaltet und so lange betrieben, bis es aufgrund des fehlenden Brenngases selbstständig abschaltet.

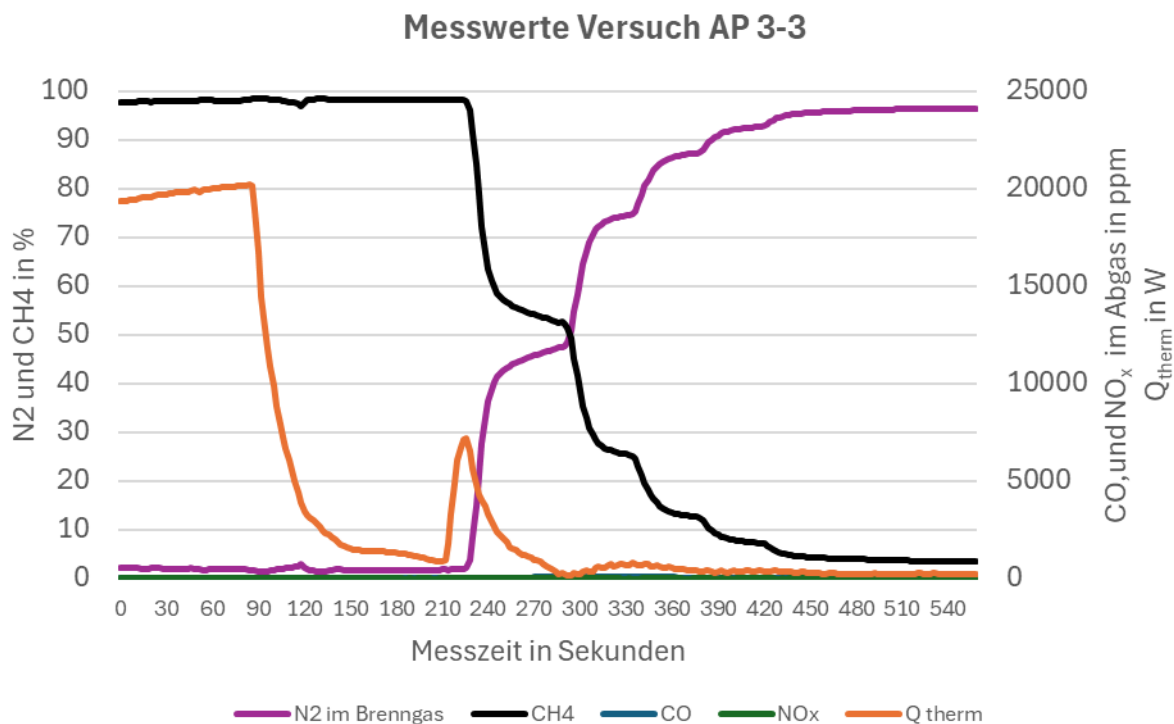


Abbildung 4.4: Messwerte AP 3-3

Anders als bei den beiden vorausgegangenen Versuchen wird hier der Gasaustausch von Erdgas auf Stickstoff, also die Inertisierung der Leitung, untersucht. Hierzu wird in Abbildung 4.4 neben den bekannten Parametern, die H_2 -Konzentration im Brenngas durch die Darstellung des Stickstoffs als violette Linie, ersetzt. Nach dem Gaswechsel und Starten des Geräts ist zu erkennen, dass eine Zündung erfolgt und das Gerät kurzzeitig in Betrieb geht (Q_{therm}). Mit Erreichen von ca. 35 % bis 40 % Stickstoff erlischt die Flamme und das Gerät geht aus. In Ermangelung eines zündfähigen Gasgemisches erfolgt auch keine Wiederezündung, das Gerät geht nach einigen Zündversuchen in Störung. Es befinden sich zum Zeitpunkt der Geräteabschaltung noch schätzungsweise 60 % bis 65 % Erdgas in der Zuleitung, welche durch die Gerätetechnik nicht weiter verbrannt werden können. Eine vollständige Inertisierung der Leitung durch den Gasaustausch während der Verbrennung ist also nicht möglich.

Wird ein auf Erdgas ausgelegtes Brennwertgerät mit einem Stickstoff-Erdgasgemisch betrieben, kommt es anders als bei den Versuchen aus AP3-1 und AP3-2 nicht zu einem Flammrückschlag oder vergleichbaren, gefährlichen Zuständen. Als Resultat kann das in Störung gegangene Brennwertgerät mit dem Leitungsgas nicht mehr in Betrieb genommen werden,

sodass dieses Gasgemisch auf anderem Wege aus der Leitung entfernt werden müsste, um gegen Wasserstoff ausgetauscht zu werden.

Auswertung Versuchsreihe AP 3-4

Anschließend an den Versuch AP 3-3 wird hier ebenfalls untersucht, wie sich die Mischungsgrenze von Erdgas und Stickstoff verschiebt, falls das Erdgas bis zur Unterschreitung des zulässigen Geräteanschlussdrucks im Gerät verbrannt wird.

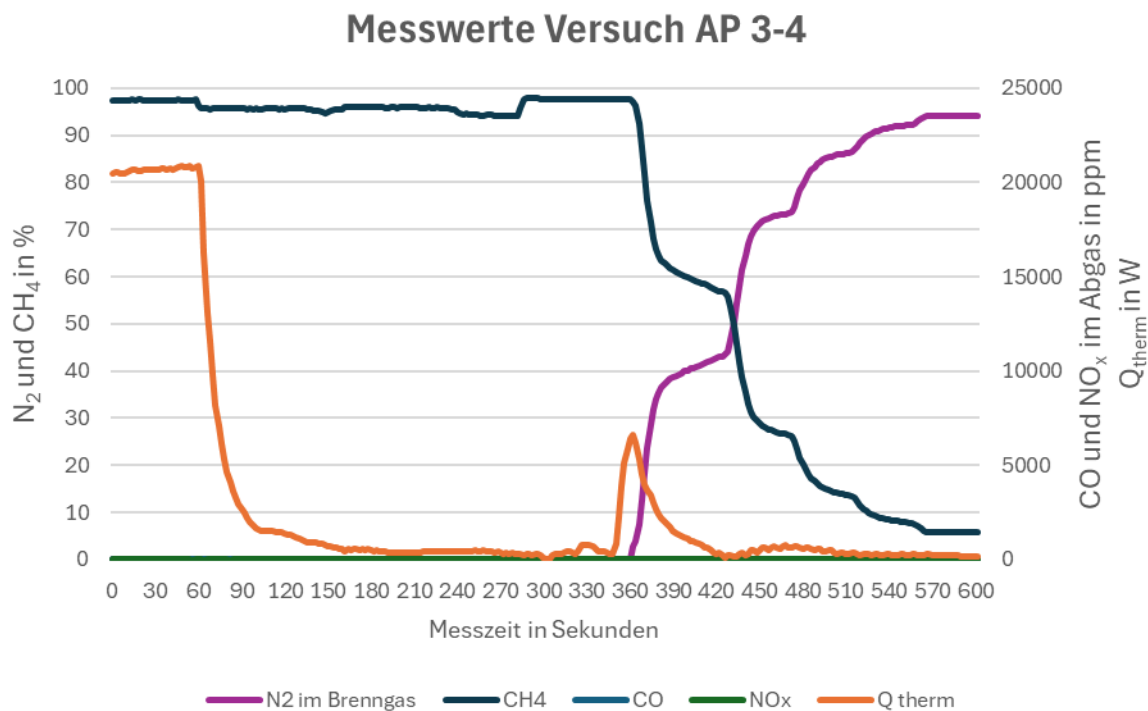


Abbildung 4.5: Messwerte AP 3-4

Ähnlich wie im Versuch AP 3-2 schon gezeigt, wird auch in Versuch AP 3-4, graphisch in Abbildung 4.5 orange hervorgehoben, das Gerät so lange betrieben, bis es auf Grund von Gasmangel abschaltet. Die Konzentrationskurven zeigen, dass die Durchmischung von Stickstoff und Erdgas einen zu Versuch AP 3-3 ähnlichen Verlauf hat, also weniger abhängig vom anliegenden Vordruck ist als die Durchmischung von Erdgas und Wasserstoff. Nahezu deckungsgleich zu Versuch AP 3-3 schaltet das Gerät hier auch bei Erreichen von 35% bis 40% Stickstoff ab. Das Resultat ist somit ebenfalls identisch und verdeutlicht, dass die Inertisierung der Leitungsanlage nicht durch die Verwendung eines Bestandsgerätes zur Umsetzung des Restgases in der Leitung, realisiert werden kann.

Auswertung Versuchsreihe AP 3-5

Parallel zu den durchgeführten Versuchsreihen an den Bestandsgeräten zur Entfernung des Erdgases in der Zuleitung, wird auch das bereits installierte 100-Vol.-%-H₂ Geräte untersucht. Nachdem die Leitung wie oben beschrieben gespült wird, kann mittels einiger Zündversuche das Gerät problemlos gestartet werden. Die anschließenden Abgasmessungen verdeutlichen den emissionsarmen Betrieb. Anpassungen im möglichen Modulationsbereich zwischen 11 % Leistung und 100 % Leistung stellen keine Herausforderung dar und zeigen keine gravierenden Abweichungen der Abgaswerte insgesamt. Als Referenz wird die Temperaturspreizung

60 °C/40 °C Vor- zu Rücklauftemperatur gewählt. Als wesentliche Abgaswerte werden NO_x sowie H₂ im Abgas jeweils im ppm-Bereich gemessen.

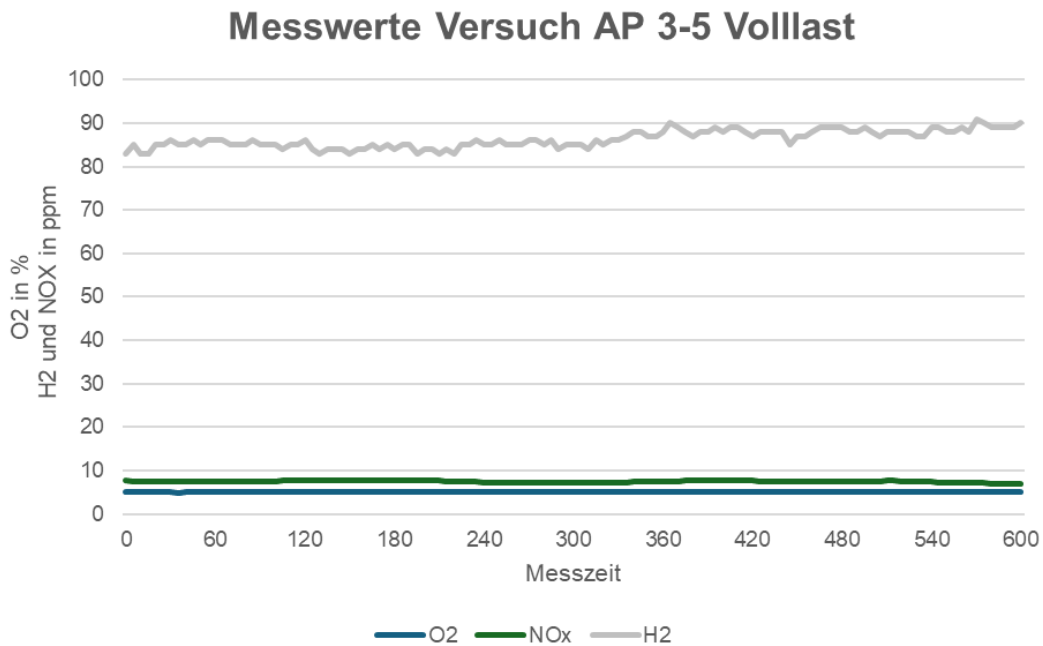


Abbildung 4.6: Messewerte Versuch AP 3-5 Volllast

Wie in Abbildung 4.6 zu sehen, erreichen die H₂-Emissionen während der Messzeit des Volllastbetriebs den Maximalwert von 91 ppm. Im dargestellten Messzeitraum wird eine durchschnittliche Konzentration von 85 ppm gemessen. Die NO_x-Konzentration pendelt sich zwischen 6 und 8 ppm ein, überschreiten im ungünstigsten Fall jedoch nicht 9 ppm.

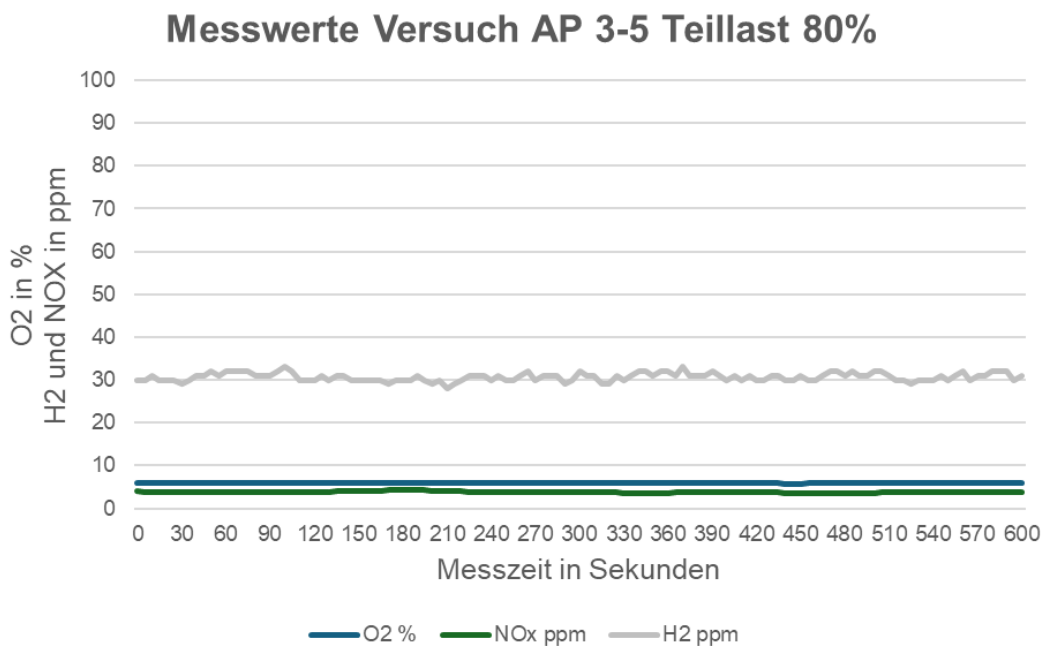


Abbildung 4.7: Messwerte AP 3-5 Teillast 80%

Im Teillastbereich bei ca. 80% ist bereits deutlich zu erkennen, dass sich die H₂ Emissionen mit einem Durchschnittswert von 30 ppm gedrittelt haben. Maximal werden im angezeigten Messzeitraum 32 ppm nicht überschritten. Das Gerät zeigt nach wie vor ein stabiles emissionsarmes Brennverhalten.

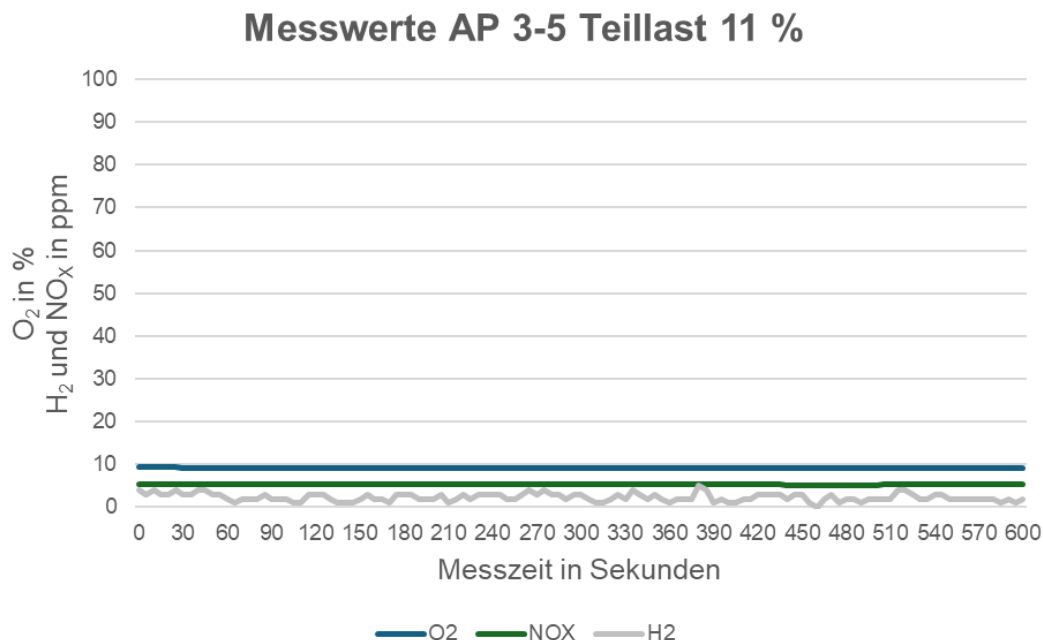


Abbildung 4.8: Messwerte AP 3-5 Teillast 11%

Im kleinstmöglichen Teillasteinstellbereich von 11 % erreichen die durchschnittlich emittierte H₂-Konzentration mit 2 ppm den geringsten Wert. In weiterführenden Messungen konnten die ermittelten Messwerte bestätigt werden. Unabhängig von dem gewählten Lastbereich kann ein stationärer und stabiler Betrieb durch geringe Abgaswertschwankungen während der Messungen nachgewiesen werden. NO_x- und H₂-Parameter im Abgas befinden sich grundsätzlich unterhalb von 100 ppm.

Diskussion und Handlungsempfehlung

Direkt anschließend an die Versuchsauswertungen der Versuche aus AP 3-5 sei hier erneut auf den problemlosen Geräteaustausch und Inbetriebnahme eines 100 Vol.-% H₂ Gerätes hingewiesen. Vorausgesetzt, dass unmittelbar am Gerät bereits 100 % H₂ oder alternativ ein H₂/N₂-Gemisch ansteht, geht das getestete Gerät nach den erforderlichen Spülvorgängen und Zündversuchen schließlich in einen stationären Betrieb über. Die Zeit zur erfolgreichen Inbetriebnahme hängt direkt von der H₂-Konzentration ab. Die Auswertungen der einzelnen Lastbereichsmessungen geben einen guten Überblick über die geringen Abgasemissionen bezüglich NO_x und H₂. Zwar ist die Diversität der Messergebnisse dadurch stark beschränkt, dass hier nur ein Gerät eines Herstellers vermessen wurde, dennoch wurden unabhängig vom Betriebszustand auch bei wiederholten Messungen grundsätzlich unkritische Werte gemessen. Sicherheitsrelevante Prüfungen, wie Flammenrückschlag oder Abheben der Flamme, werden in diesem Zusammenhang nicht betrachtet und finden im jeweiligen Zertifizierungsprogramm ihre Berücksichtigung. Unabhängig von den durchgeführten Baumuster- und Zertifizierungsprüfungen oder vergleichbaren Verfahren zeigten die Geräte im direkten Vergleich zu analogen, erdgasbetriebenen Brennwertgeräten keine signifikanten Abweichungen im Betriebsverhalten. Als sichtbares, konkretes Unterscheidungsmerkmal zwischen den Geräten weist das

Typenschild auf den Wasserstoffbetrieb hin. Die Installation, die Inbetriebnahme sowie der Betrieb der Geräte deckt sich weitestgehend mit den bekannten Geräten. In der Endanwendung ergeben sich also für den Kunden keine nennenswerten Anpassungen.

Stellt man den Direktaustausch, abgebildet in Versuch AP 3-1 und AP 3-2, der Inertisierung in Versuch AP 3-3 und AP 3-4 gegenüber, lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen. Durch letztere (indirekte Spülung mit Stickstoff) wird in den betrachteten Fällen sichergestellt, dass es erstens nicht zu unzulässigen und undefinierten Erdgas-Wasserstoffgemischen kommt. Zweitens befindet sich zum Zeitpunkt des Gerätetauschs/Umrüstkitinstallation kein zündfähiges Gemisch in der Zuleitung. Diese Sicherheit wird allerdings durch den Umstand erkauft, dass das Erdgas-Stickstoffgemisch nicht mehr zündfähig ist und somit gerätetechnisch nicht verbrannt werden kann. Unweigerlich würde diese Methode sowohl einen zeitlichen als auch einen finanziellen Nachteil gegenüber eines Direktaustauschs von Erdgas gegen H₂ darstellen. Letzterer verzichtet auf einen Zwischenschritt und tauscht die Gase unmittelbar gegeneinander aus. Hier sei erneut der Hinweis gegeben, dass ein solcher Austausch gegebenenfalls zu undefinierten Mischkonzentrationen an kritischen Netzpunkten führen kann.

Unter Berücksichtigung der während der Versuche registrierten Flammenrückschläge beim Gaswechsel, der dadurch initiierten Vibrationen im Gerät und als Ergebnis nicht mehr prüfungsfrei festzustellenden Betriebssicherheit, ist von der Methode eines Direktaustauschs des Brenngases mit Bestandsgeräten dringend abzuraten. Anzuregen wäre indessen, ob eine alternative Methode zum Abfackeln des Leitungsgases bis hin zum reinen Wasserstoffgas so weit erprobt werden kann, dass daraus eine sichere und regelwerkskonforme Vorgehensweise entsteht. Dies würde wahlweise eine adaptive Brennerlösung in den Gasgeräten oder einer definierten Methodik zum Ablassen mit anschließendem Abfackeln des Leitungsgases erfordern.

Als Handlungsempfehlung sei hier ausdrücklich auf bestehendes Regelwerk verwiesen. Aus Zeitgründen wäre einem Direktaustausch des Leitungsgases von Erdgas auf Wasserstoff der Vorzug gegenüber einer Zwischeninertisierung mit Stickstoff zu geben. Sollten die technischen und sicherheitsrelevanten Voraussetzungen für ein sicheres Abfackeln/Ablassen von Erdgas, Wasserstoff sowie deren Gemische über eine Fackel oder ähnliches erfüllt sein, ist eine Inertisierung aus praktischer Sicht nicht zwingend erforderlich. Grundsätzlich kann es zu Szenarien kommen, welche hier bislang keine Beachtung gefunden haben, die Umsetzung eines Direktaustauschs jedoch limitieren. Es bleibt folglich zu klären, an welcher Stelle und mit welchem Aufwand die Gasumstellung von Erdgas auf Wasserstoff praktisch erfolgen kann. Es sollte angestrebt werden, so wenig Erdgas wie möglich unverbrannt in die Umwelt zu lassen.

Je nach vorgefundener Hausinstallation eignen sich eines der in AP 2 vorgestellten Spülkonzepte mehr als das andere. Die richtige Wahl trifft in letzter Konsequenz das geschulte Fachpersonal vor Ort. Dieses stellt sicher, dass der Gasaustausch an der korrekten Position der Hausinstallation erfolgt, das Gas nach Möglichkeit sicher verbrannt und die Hausinstallation nach Abschluss wieder dicht ist. Es gilt, dem Monteur die notwendigen Rahmenbedingungen und das bevorzugte Spülkonzept an die Hand zu geben.

4.2 Stand der Gasgerätetechnik

Die BDEW-Studie „Wie heizt Deutschland 2023?“ analysiert die Trends im Heizungsmarkt Deutschlands, fokussiert auf Heiztechnologien, deren Verbreitung und die Herausforderungen im Rahmen der Energiewende. Die nachfolgenden Zahlen sind dieser Studie entnommen.

Die derzeit am dominantesten vertretene Heizungstechnologie ist die Gasheizung mit einem Marktanteil in 2023 von 48,3 %. Es sind etwa 10,6 Millionen Gasheizgeräte installiert, was deren zentrale Rolle im Wärmemarkt zeigt.

Die Heizgeräte sind im Durchschnitt 16 Jahre alt, was zum einen die Notwendigkeit von Modernisierungen verdeutlicht, zum anderen aber auch die durchschnittliche Lebensdauer einer Gasheizung von deutlich über 20 Jahren aufzeigt.

Die BDEW-Studie identifiziert Wasserstoff als wichtigen Bestandteil der zukünftigen Energieversorgung äußert sich aber nicht zu Umsetzungszeiträumen und Herausforderungen.

Ein durchschnittliches Heizungsalter von momentan 16 Jahren (Bundesschnitt) legt nahe, dass eine komplette Erneuerung aller Heizgeräte (ohne äußeren Einfluss durch politische Änderungen) einen Zeitraum von mindestens 16, theoretisch betrachtet aber oberhalb von 20 Jahren bedarf. Dies bedeutet wiederum, dass Heizgeräte, welche im Jahr 2024 eingebaut werden, dafür vorgesehen sind, mindestens bis 2044 betrieben zu werden. Da viele der in den letzten Jahren installierten Heizgeräte nicht für 100 % Wasserstoff geeignet sind, wird ein möglicher Wasserstoffhochlauf dadurch weiter verlängert oder es müssen bei einer Umstellung verhältnismäßig neue Geräte getauscht werden.

Die in der BDEW-Studie gezeigten 10,6 Millionen Gas-Heizgeräte beziehen sich nur auf die Gerätekategorien Brennwertkessel, Umlaufwasserheizer und Heizkessel. Im deutschen Markt befinden sich allerdings noch deutlich mehr Endgeräte, welche unter die Kategorie Gas-Geräte fallen.

Neben den 10,6 Millionen Gas-Heizgeräten aus der BDEW-Studie lassen sich überschlägig für den deutschen Markt so folgende weitere Gerätezahlen grob abschätzen:¹⁹

- Kochgeräte (Großküchen, Gewerbe, privat) – 600.000 Stk.
- Gebläsebrenner < 1 MW in Heizkesseln – 450.000 Stk.
- Wasserheizer und Vorratswasserheizer – 3.000.000 Stk.
- Heizstrahler – 190.000 Stk.
- Raumheizer – 55.000 Stk.

Festzustellen ist also, dass neben den ca. 10,6 Mio. Gas-Heizgeräten auch weitere rund 4,5 Mio. anderer Gasgeräte von einer Wasserstoffumstellung betroffen sind. Die folgenden Abschnitte beleuchten hierbei nur die häufigsten.

Das Gebäudeenergiegesetz (GEG) erlaubt den Einbau neuer Heizungen nur, wenn sie mindestens 65 % erneuerbare Energien nutzen. Wasserstoffheizungen sind grundsätzlich zulässig, sofern sie mit klimaneutralem, also grünem Wasserstoff betrieben werden. Das Gesetz ist technologieoffen, stellt jedoch Anforderungen an die Herkunft des Wasserstoffs. Fossiler oder nur teilweise klimaneutraler Wasserstoff reicht nicht aus. Ob eine Wasserstoffheizung infrage kommt, hängt zudem oft von der kommunalen Wärmeplanung ab – etwa ob ein Wasserstoffnetz vorgesehen ist. Bestehende Heizungen sind von den neuen Vorgaben nicht betroffen, und es gelten Übergangsfristen für den Umstieg.

¹⁹ Abgleich mit Erhebungsdaten aus der MRU L-/H-Gas

DVGW-Zertifizierungsprogramme ergänzen die derzeit gültigen Gerätestandards um die Ergänzungsprüfung im Bereich Wasserstoff. Derzeit veröffentlicht sind folgende ZPs:

- ZP 1100 - Ergänzungsprüfungen für Haushaltskochgeräte für gasförmige Brennstoffe für einen Wasserstoffgehalt von bis zu 20 Vol.-%
- ZP 2100 - Ergänzungsprüfungen für Großküchengeräte für gasförmige Brennstoffe für einen Wasserstoffgehalt von bis zu 20 Vol.-%
- ZP 3100.20 - Zertifizierungsprogramm Ergänzungsprüfungen für Heizkessel für gasförmige Brennstoffe für einen Wasserstoffgehalt von bis zu 20 Vol.-%
- ZP 3100.100 - Zertifizierungsprogramm Prüfungen für Heizkessel für gasförmige Brennstoffe für einen Wasserstoffgehalt von 100 Vol.-%
- ZP 3411 - Ergänzungsprüfungen für Dunkelstrahler für gasförmige Brennstoffe mit einem Wasserstoffgehalt von 100 Vol.-%
- ZP 3502.20 - Zertifizierungsprogramm Ergänzungsprüfungen für Gebläsebrenner für gasförmige Brennstoffe für einen Wasserstoffgehalt von bis zu 20 Vol.-%

Die Zertifizierungsprogramme für 20 Vol.-% H₂ definieren Testmethoden, Materialverträglichkeiten und Prüfgasbedingungen, die spezifische Anforderungen an Dichtungen, Brenner und Sicherheitseinstellungen unter einem Wasserstoff-Erdgasgemisch beinhalten. Wichtig ist dabei, dass alle Geräte den stabilen Betrieb ohne Anpassungen an 100 % Erdgas ebenfalls sicherstellen müssen. Dies ermöglicht eine flexible Anpassung an variierende Wasserstoffanteile in der Erdgasversorgung, was perspektivisch für die Integration in zukünftige Energieinfrastrukturen von Bedeutung ist.

Die Zertifizierungsprogramme für 100 % H₂ ermöglichen die Prüfung und Zertifizierung von Gasgeräten für den Betrieb mit Wasserstoff oder sog. H₂-Ready-100 Gasgeräte, Geräte, die mit Erdgas betrieben werden können und in Verbindung mit einem Umrüstkit auf den Betrieb mit Wasserstoff umrüstbar sind.

Die DIN EN 16726 [43] wird derzeit aktualisiert und enthält nun Anforderungen, die zunehmend die Verwendung von Wasserstoff (bis 20 Vol.-% H₂) in Brennstoffsystemen berücksichtigen. Diese Norm vereinheitlicht die Gasbeschaffenheitsanforderungen für Erdgas der Gruppe H europaweit.

Auch Gebläsebrenner für **100 % Wasserstoff** sind technisch und auch hinsichtlich ihrer Emissionen gut umsetzbar. Erste Pilotanlagen und Prototypenbrenner sind auf dem Markt. Spezialentwicklungen in diesem Bereich gibt es bereits seit den 1960er Jahren. Derzeit ist die Marktsituation jedoch verhalten, da insbesondere im Bereich Bauteile-Zulassung wie auch hinsichtlich der zukünftig gelieferten Wasserstoffqualität noch Lücken bestehen.

4.3 Wasserstofffähige Gasgeräte

Wasserstoff-Heizungen gelten als vielversprechende klimafreundliche Alternative, die besonders für die Dekarbonisierung der Wärmeversorgung im Fokus steht. Der Einsatz von Wasserstoff kann entweder über H₂-Gasgeräte oder sogenannte "H₂-ready" Gasbrennwertgeräte sowie H₂-Brennstoffzellenheizungen erfolgen.

H2-Ready Gasgeräte:

Diese Heizgeräte können aktuell Erdgas-Wasserstoff-Gemische bis zu 20 Vol.-% Wasserstoffanteil nutzen. Solche Anlagen sind besonders attraktiv, da sie das bestehende Gasnetz nutzen und ohne größere Infrastrukturänderungen betrieben werden können. Diverse Hersteller bieten bereits Geräte an, die diesen Ansprüchen gerecht werden und eine Beimischung von Wasserstoff unterstützen, was langfristig die Möglichkeit bietet, die CO₂-Emissionen zu senken.

Da der Ausbau der Wasserstoff-Infrastruktur noch im Aufbau ist, ist der vollständige Betrieb dieser Systeme mit reinem Wasserstoff erst mittelfristig realisierbar. Dennoch bieten sie bereits jetzt eine zukunftsfähige Lösung für eine zunehmend emissionsarme Wärmeversorgung, die mit der weiteren Verfügbarkeit von grünem Wasserstoff an Bedeutung gewinnen wird.

Diverse Hersteller arbeiten derzeit an Heizgeräten, die für den Einsatz von Erdgas und Wasserstoff als Brennstoff geeignet sind, bzw. haben bereit zertifizierte Geräte marktverfügbar. Diese Heizgeräte können aktuell Erdgas-Wasserstoff-Gemische bis zu 20 Vol.-% Wasserstoffanteil nutzen und sind so konzipiert, dass sie auf einen Betrieb mit reinem Wasserstoff umgerüstet werden können.

DVGW Zertifizierungsprogramm ZP3100:

Das Zertifizierungsprogramm ZP 3100.20 wurde vom Deutschen Verein des Gas- und Wasserfaches (DVGW) entwickelt, um Heizgeräte und Komponenten für den Einsatz mit Gasen mit einem Wasserstoffanteil von bis zu 20% zu prüfen und zertifizieren. Ziel ist es, durch zusätzliche Tests zu gewährleisten, dass bestimmte Gasgeräte in bestehenden Erdgasnetzen sicher und effizient funktionieren, auch wenn bis zu 20% Wasserstoff beigemischt wird. Diese Tests umfassen spezifische Prüfungen der Verbrennungseigenschaften und Materialbeständigkeit, um sicherzustellen, dass sowohl die Sicherheit als auch die Leistungsfähigkeit der Geräte aufrecht erhalten bleiben.

Das ZP 3100 ist als Ergänzung zur DIN EN 15502 Norm für Gasbrennwert- und Heizwertgeräte konzipiert und beschreibt die Voraussetzungen, die Geräte erfüllen müssen, um mit dem Prüfsiegel „H2 20%“ zertifiziert zu werden. Erste Zertifikate wurden bereits 2020 vergeben, und verschiedene Hersteller wie die Wolf GmbH haben für ihre Geräte erfolgreich diese Zertifizierung erhalten. Dies ermöglicht auch, dass bestehende Heizungsanlagen in Pilotprojekten wie dem Modellprojekt „H2-20“²⁰ von DVGW und Avacon im Fläming getestet werden, um die Einsatzmöglichkeiten von Wasserstoff in realen Netzbedingungen zu erproben und die Akzeptanz für solche Technologien zu fördern.

Das Zertifizierungsprogramm ZP 3100.100 der DVGW CERT GmbH beschreibt die Prüfungen und Anforderungen für Heizkessel, die mit 100 Vol.-% Wasserstoff betrieben werden. Es ergänzt die Anforderungen der DIN EN 15502-1:2022 und DIN EN 15502-2-1:20221 für die Qualifizierung von Gasgeräten für 100 Vol.-% Wasserstoff. Es ist eine eigenständige Zertifizierung bzw. dient der Erweiterung einer bestehenden Zertifizierung von Neugeräten und Umbausätzen für bestehende Geräte.

²⁰ <https://www.dvgw.de/themen/forschung-und-innovation/forschungsprojekte/dvgw-forschungsprojekt-h2-20>

4.4 Pilotprojekte Gasgeräte mit 100 % H₂

H₂-Direkt^{21 22}

In Hohenwart hat Vaillant im Projekt „H2Direkt“ Heizgeräte für 100 % Wasserstoff geliefert. Im Rahmen dieses Projektes, das im September 2023 startete, wurden ein bestehendes kleines Gasnetz in einem Stadtviertel umgerüstet, um reinen Wasserstoff anstelle von Erdgas zu liefern. Das Projekt versorgt zehn Haushalte und ein kleines Unternehmen. Die Erdgas-Heizgeräte wurden durch neue Wasserstoff-Heizgeräte ersetzt.

H2HoWi²³

Das Projekt H2HoWi, eine Kooperation von E.ON und der Westnetz GmbH in Holzwickede, zielt darauf ab, eine nachhaltige Wasserstoffinfrastruktur als praktischen Bestandteil der Energiewende in Deutschland zu etablieren. Im Rahmen des Pilotprojekts wird Wasserstoff an mehrere gewerbliche Kunden geliefert, die ihn mit Hilfe von wasserstofftauglichen Heizungsanlagen zum Heizen nutzen. Dieser hochreine Wasserstoff ersetzt den bisherigen Einsatz von Erdgas vollständig, wobei die Auswirkungen auf die Materialien, die Sicherheit und die betriebliche Machbarkeit wissenschaftlich begleitet werden. In Betrieb befinden sich hier 4 Wasserstoff-Heizgeräte der Firma Remeha.

4.5 Workshop mit Geräteherstellern

Im Rahmen des Projektes wurden Gerätehersteller zu einem gemeinsamen Workshop eingeladen. Dieser wurde online durchgeführt und behandelte aktuelle Fragen um das Thema Umstellung aus Herstellersicht. Das Projekt wurde vorgestellt, die durchgeführten Versuche im Bereich der Hausinstallationsvorbereitung erläutert und die Diskussion auf die herstellerseitig vorgesehenen Anforderungen gelenkt. Seitens des versuchsdurchführenden Instituts konnten die verschiedenen Szenarien mit resultierenden Messwerten vorgestellt werden.

Es herrschte im Wesentlichen darüber Einigkeit, dass zum Zeitpunkt der Gasgeräteumstellung eine Gasqualität analog zum geltenden Regelwerk G 260 für die 5. Gasfamilie am Gerät anzuliegen hat. Erdgas-Wasserstoffgemische außerhalb dieser Vorgaben werden aller Voraussicht nach nicht verbrannt werden können. Auf die verschiedenen Möglichkeiten zum Spülen und Begasen innerhalb der Leitung wurde weniger eingegangen. Vermehrt wurde sich für eine möglichst kurze Spülzeit der Leitung zum Erreichen der geforderten Gasqualität ausgesprochen. Daraus abgeleitet ergibt sich als empfohlene Spülposition die Gasgeräteverschraubung oberhalb des Gerätehahns. Ob das Erdgas im Ergebnis Gefahrenfrei ins Freie abgeleitet oder abgebrannt werden soll, wurde nicht vertieft behandelt. Bei örtlichen Gegebenheiten, die das Abfackeln des Erdgases unter einzuhaltenden Sicherheitsrichtlinien ermöglichen, könnte dies bevorzugt durchgeführt werden. Ergeben sich jedoch Einschränkungen oder potenzielle Gefährdungen im Zuge eines Abfackelns, sollte dem sicheren Ablassen ins Freie des Methans in die Umwelt der Vorzug gegeben werden. In Anlehnung an die geforderte Gasqualität, wurde erörtert, ob eine Odorierung des Wasserstoffs zu gerätetechnischen Problemen führen könnte. Diese Frage wurde verneint und die Odorierung als ein wesentlicher Sicherheitsaspekt angeführt.

²¹ <https://www.vaillant.de/heizung/klima-foerderung/heizen-mit-wasserstoff/>

²² <https://www.energienetze-bayern.de/h2direkt>

²³ <https://www.westenergie.de/de/landingpage/wasserstoff/h2howi.html>

Klar befürwortet wurde die Anforderung, den kompletten Umstellungsprozess zeitlich zu verschlanken und mögliche Einsparpotentiale unter Berücksichtigung aller sicherheitsrelevanter Faktoren zu nutzen.

Einheitlich wurde die Frage nach möglichem Schulungsbedarf fürs Handwerk bzw. Umstellunternehmen positiv beantwortet. Herstellerunabhängig sahen die Workshopteilnehmer das Erfordernis, die wasserstoffspezifischen Besonderheiten für diejenigen, welche an den Gasgeräten und Leitungsanlagen arbeiten werden, herauszuarbeiten. Ein möglicher Hintergrund, um die Schulungsinhalte zu definieren, wurde in Form der zurzeit umgesetzten G 655 (M) genannt. Vereinheitlicht könnte so ein national gültiges Anforderungsportfolio für das Handwerk definiert werden. In Kapitel 7.4 wurden aus den Workshops hervorgehende mögliche Schulungsinhalte zusammengestellt.

4.6 Umstellung von industriellen Gasanwendungen

Im Rahmen der Vorfeldanalyse sind nach DVGW 655 industrielle Anwendungen durch den Betreiber der Anlagen separat zu erfassen und gemäß G 680 ist der Betreiber der Anlagen durch den Netzbetreiber über eine anstehende Umstellung und dessen Pflichten im Rahmen der Umstellung aufzuklären. Die Eignung und Umrüstung der Prozesse sind durch den Betreiber der Anlagen zu überprüfen [G 655] und dem Netzbetreiber mitzuteilen [G 680]. Die Umstellung von industriellen Gasanwendungen und Thermoprozessanlagen ist grundsätzlich Betreiberverantwortung und ggf. intensiv mit den Herstellern der Bauteile und insbesondere Brennertechnik abzustimmen. Die notwendigen Überprüfungen der Leitungsanlage und Sicherheitstechnik sind in 3.5 und 3.6 dargestellt.

5 Gesamtprozess der Umstellung

Dieses Kapitel fasst die einzelnen Aspekte der Umstellung aus den vorherigen Kapiteln zu einem Gesamtprozess zusammen.

5.1 Workshop mit Gasnetzbetreibern

Im Zuge der Projektbearbeitung wurde ein Workshop mit ausgewählten Gasnetzbetreibern durchgeführt, welche bereits Erfahrungen mit der Umstellung von Netzen auf 20 Vol.-% und 100 % Wasserstoff haben. Kernpunkt waren die Erfahrungen innerhalb der Projekte in Bezug auf die Gasgeräteerhebung und Möglichkeiten einer vereinfachten Geräteerfassung bei Einspeisungen bis zu 20 % H₂. Bei den Projekten wurden auch Hausanschlussleitungen, Hausdruckregler sowie die Komponenten der Leitungsanlagen und Gasgeräte in den Gebäuden erfasst. Im Nachfolgenden sind diese Erfahrungen kurz zusammengefasst.

5.1.1 Vorgestellte Referenzprojekte

Avacon - H₂-20 (DVGW-Projektnummer: G 201902):

Im Projekt H₂-20% in Schoppsdorf wurde die Verträglichkeit der Beimischung von bis zu 20 Volumenprozent Wasserstoff in das Erdgasnetz untersucht und eine umfassende Akzeptanzkommunikation durchgeführt, um die Kunden über die Beimischung von Wasserstoff ins Erdgasnetz zu informieren und ihre Bedenken zu adressieren. Das Ziel des Projekts war der Nachweis der Verträglichkeit der H₂-Beimischung bis zu 20 Volumenprozent für Bestandsgeräte, ohne dass Änderungen an den Gasgeräten erforderlich sind. Das Projekt lief von 2019 bis 2023.

Im Rahmen des Projekts wurden 352 Geräte von 30 Herstellern untersucht. Es traten keine Störungen auf, und über 355 Stichproben wurden keine sicherheitsrelevanten Mängel festgestellt. Regionale Installateure und Schornsteinfeger wurden durch Anschreiben und Informationsveranstaltungen einbezogen, um sicherzustellen, dass sie über das Projekt informiert sind und ihre Unterstützung anbieten können.

Akzeptanzkommunikation

Die Akzeptanz der Wasserstoffbeimischung ist entscheidend für die erfolgreiche Transformation des Gasnetzes. Es wurden verschiedene Kommunikationsmaßnahmen durchgeführt, darunter:

- Informationsabende für Bürgermeister der beteiligten Gemeinden.
- Anschreiben und Informationsveranstaltungen für regionale Installateure und Schornsteinfeger.
- Anschreiben, Flyer, Projektwebseite, Film, Bürgerinformationsveranstaltungen und Infomobil für Gaskunden im Netzabschnitt.

Herausforderungen und Bedenken

Es gab verschiedene Herausforderungen und Bedenken seitens der Bürger, darunter:

- Sorge vor Langzeitfolgen und Haftung: Bürger befürchten, dass sie mit kaputten Heizungen zurückbleiben könnten.
- Fragen zur Notwendigkeit des Projekts: Bürger fragen sich, warum das Projekt in ihrer Region umgesetzt wird.
- Desinteresse und Skepsis gegenüber der Technik und Angst vor Wasserstoff.

Um die Geräteeerhebung zu optimieren und zu vereinfachen, wurden folgende Ideen auf Basis der Ergebnisse in Schoppsdorf vorgeschlagen:

- Abfrage der Geräte: Es wurde vorgeschlagen, die Geräte mittels Brief, QR-Code oder E-Mail durch die Bürger selbst abfragen zu lassen.
- Einbindung von Schornsteinfegern und Installateuren: Diese Fachleute sollten stärker eingebunden werden, um die Datenerfassung zu unterstützen.
- Kurzerhebungen in Ausnahmefällen: In speziellen Fällen sollten kurze Erhebungen durchgeführt werden.
- Datenerfassung im Zuge der HA-Kontrollen bzw. Zählerwechsel: Die Datenerfassung sollte im Rahmen der Hausanschlusskontrollen (Strom/Gas) erfolgen.
- Verpflichtung zur Mitarbeit der Bürger: Bürger sollten im Rahmen der kommunalen Wärmeplanung (KWP) zur Mitarbeit verpflichtet werden. Im Rahmen der KWP besteht für die Kommunen die Möglichkeit anonymisierte Daten über die Schornsteinfeger zu bekommen.

Netze BW – H₂-Insel Öhringen

Grundlegendes:

- Einspeisung bis zu 30 Vol.-%
- 32 Gasgeräte von 10 Herstellern, bis zu 30 Jahre alt
- Nennleistung von 4,8 bis 300 kW
- Austausch von 6 Geräten vor Einspeisstart (nachfolgende Laboruntersuchungen bestätigten den Betrieb bis 30 Vol.-% H₂)
- Austausch von 2 Geräten wg. Defekt während Einspeisung (kein H₂ spezifischer Hintergrund)

Die Erhebung der Gerätedaten wurde in mehreren Schritten durchgeführt. Auf Basis der Adressdaten der Anschlussnehmer fand ein Abgleich mit dem Elektronischen Kkehrbuch statt. Im Anschluss wurden die Daten mit den Kunden validiert und die Teilnahme-Erklärung gezeichnet. Anschließend wurden an den Geräten Wartungen durchgeführt und die genauen Daten der Geräte erhoben. Dies ist schematisch in Abbildung 5.1 dargestellt.

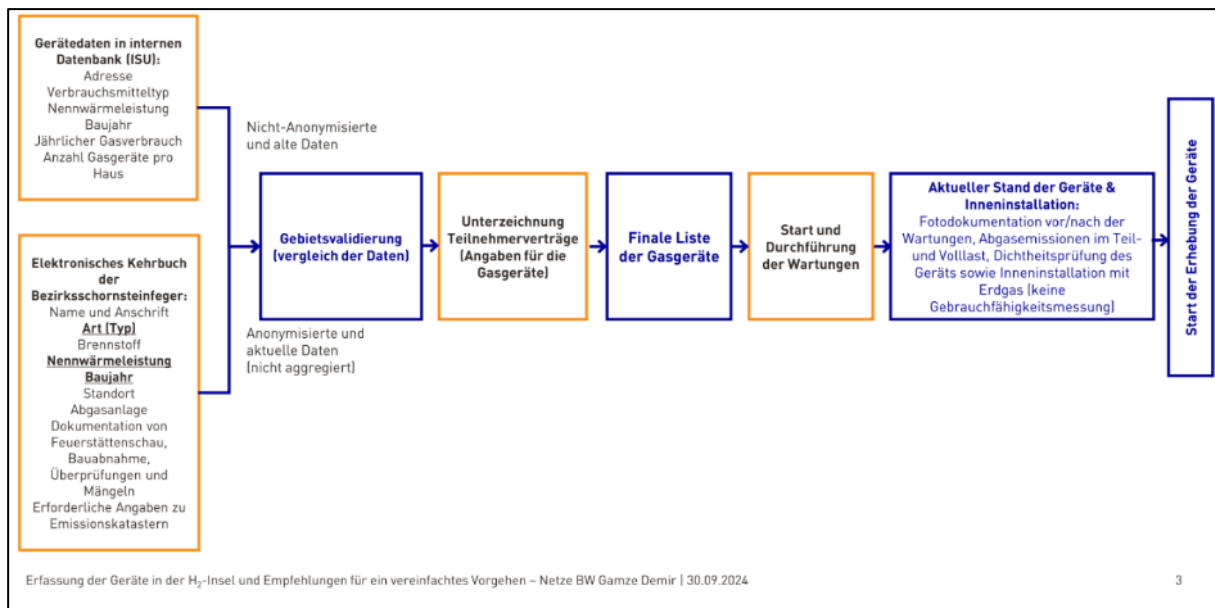


Abbildung 5.1: Vorgehen bei der Geräteerhebung im Umstellprojekt H2-Insel Öhringen

Vor Umstellung wurden verschiedene Schritte durchlaufen, um ein gleichwertiges Sicherheitsniveau zum Betrieb mit Erdgas zu erhalten. Diese Schritte sind in Abbildung 5.2 zu sehen.



Abbildung 5.2: Vorgehen bei der Umstellung im Umstellprojekt H2-Insel Öhringen

Hohenwarth - H2Direkt

Im Projekt wird Wasserstoff direkt in das Verteilnetz eingespeist. Die verschiedenen Planungs- und Bauphasen umfassten dabei:

- Gefährdungsbeurteilungen und Betriebsanweisungen
- Betriebsvorbereitungen und Schulungen
- Freigabe des Umstellprozesses durch Sachverständige, Prüfstellen und Energieaufsicht sowie Bauaufsicht

- Tiefbauarbeiten und Errichtung der Anlagen
- Inbetriebnahme der Einspeiseanlage
- Umstellung von Netz, Hausanschluss und TRGI-Anlagen
- Austausch der Gasgeräte inklusive Abgasanlagen gegen 100 % H₂-Gasgeräte
- Kompletteinbetriebnahme H₂Direkt

Der Bereich TRGI wurde mittels Hausschauen erhoben. Der Hausanschluss sowie Die TRGI-Anlagen wurden durch Netzbetreiber, Fachfirmen und Prüfinstitute komplett erfasst und Eignungsbestätigungen für alle Komponenten eingeholt.

Holzwickede – H₂HoWi

Im Rahmen des Projekts H₂HoWi wurden Erkenntnisse für den Aufbau und Betrieb einer Wasserstoff-Infrastruktur gewonnen. Seit Oktober 2022 wurden alle Elemente der H₂-Infrastruktur ohne wesentliche technische Mängel oder betriebliche Auffälligkeiten betrieben. Die ersten Ergebnisse der Permeationsmessungen bestätigten die Eignung der ehemaligen Erdgas-Infrastrukturelemente für Wasserstoff. Es wurde festgestellt, dass im Vergleich zu Erdgas teilweise andere Betriebsmittel wie Messgeräte und Werkzeuge genutzt werden müssen. Für Netzbetreiber und Installateure ist eine frühzeitige technische und organisatorische Integration von Wasserstoff in Schulungen und Betriebsanweisungen erforderlich.

Neben der Umstellung der Erdgasleitung waren auch Anpassungen bei den drei beteiligten Kunden erforderlich. Es wurden neu entwickelte, wasserstofftaugliche Brennwertgeräte des Unternehmens Remeha installiert. Diese haben eine Leistung von 24 Kilowatt. Die Bestandsinstallation wurde weiterhin verwendet.

Hamburg – H₂Switch (in Vorbereitung)

Im Pilotgebiet liegen 16 Haus- und Gewerbeanschlüsse, die zukünftig testweise mit Wasserstoff-Brennwertgeräten und -BHKWs ihre Gebäudewärme erzeugen sollen.

In der Kooperation des städtischen Gasnetzbetreibers mit dem DBI ist ein wichtiger Fokus, wie sich Gas-Innenanlagen für den Umstieg von Erdgas auf Wasserstoff eignen.

Die Untersuchung der Inneninstallationen zielt darauf ab, die Eignung aller Komponenten und Leitungsabschnitte für 100 % Wasserstoff zu bewerten und notwendige technische Maßnahmen für einen sicheren Betrieb zu identifizieren. Das Umstellgebiet umfasst 14 Wohnhäuser, einen Sportvereinskomplex und einen Gewerbekomplex mit inhomogener Bausubstanz aus verschiedenen Baujahren. Fachleute von Gasnetz Hamburg haben alle Leitungsanlagen dokumentiert und Gebrauchsfähigkeitsprüfungen durchgeführt. Die Leitungsabschnitte wurden in Hausanschlussleitung + Hauptabsperreinrichtung und Gasdruckregelgerät, Leitungsanlage im Gebäude und Geräteanschluss unterteilt. Vorwiegend verwendete Werkstoffe sind Kupfer und Stahl, mit verschiedenen Verbindungsarten wie Press-, Lot- und Gewindeverbindungen. Alle Anlagen werden durch Niederdruckregler versorgt und sind uneingeschränkt gebrauchsfähig. Die höchste gemessene Leckrate betrug 0,2 l/h.

Um die Eignung der Gasinstallationen für 100 % Wasserstoff zu überprüfen, wurden mehrere Schritte durchgeführt. Zunächst muss nachgewiesen werden, dass die verwendeten Werkstoffe und Dichtungen keine negativen Wechselwirkungen mit Wasserstoff haben. Dies wurde

bereits in mehreren Projekten untersucht und die Ergebnisse in G 655 (M) übernommen. Außerdem müssen die installierten Komponenten wie Zähler, Regler, Absperrarmaturen, Gasströmungswächter und thermische Absperreinrichtungen für den Betrieb mit Wasserstoff geeignet sein.

Die Auslegung des Balgengaszähler ist zu überprüfen, da bei Wasserstoff ein dreifacher Volumenstrom zu erwarten ist und damit der Messbereich des Gaszählers überschritten werden kann. Die Überprüfung der Materialien und Komponenten erfolgt auf Basis bestehender Erdgaszulassungen und Herstellererklärungen sowie den vorliegenden F&E-Ergebnissen.

Die Funktion von Gasdruckregelgeräten, Gasströmungswächtern und Balgengaszählern unter Wasserstoff wurde bereits in mehreren Projekten nachgewiesen. Technische Mängel, welche auch bei Erdgas zu beseitigen sind, wurden nur wenige gefunden und sollen vor der geplanten Wasserstoffeinspeisung behoben werden.

Für die Projektlaufzeit wird ein Gasgerätehersteller gesucht, der 100 % wasserstofffähige Gasgeräte anbietet. Diese Geräte werden während der Pilotphase bei den Kundinnen und Kunden eingebaut. Da die bestehenden Abgasanlagen in der Regel weder als separate bauaufsichtliche Zulassung noch als Systemzertifizierung mit dem H₂-Gasgerät zur Abführung der Verbrennungsgase aus H₂-Anlagen zertifiziert sind, müssen diese zusammen mit dem Gasgerät gegen wasserstofftaugliche Abgasanlagen ausgetauscht werden. Zukünftig ist dies über eine Systemzertifizierung von Gasgerät und Abgasanlage oder über separate Zulassungen von bauaufsichtlich separat zugelassenen Abgasanlagen zu realisieren.

Das Sicherheitskonzept der Wasserstoffversorgung sieht eine Odorierung des eingespeisten Wasserstoffs vor, um im Ausnahmefall austretendes Gas durch den typischen Warngeruch weit vor Gefahrdrohenden Mengen erkennbar zu machen. Über das, auch bei Wasserstoffinstallationen akzeptierte Schutzkonzept hinaus, werden zusätzlich die Inneninstallationen der Kundinnen und Kunden mit Gaswarnsystemen ausgestattet, die bei Gasaustritt automatisch die Gaszufuhr unterbrechen. Die Überprüfung des erdverlegten Rohrnetzes wird während der Pilotphase verstärkt durchgeführt, um Undichtigkeiten frühzeitig zu erkennen.

5.1.2 Kernaussagen des Workshops mit den Gasnetzbetreibern

Im Zuge der Bearbeitung des Projektes wurde ein Workshop mit Gasnetzbetreibern, DVGW, EBI, GWI und DBI in Bezug auf die Gasgeräteerfassung bei Wasserstoff-Einspeiseprojekten durchgeführt. Dabei wurden auch Thematiken, welche für eine Umstellung auf 100 % H₂ relevant sein können, angesprochen. Nachfolgend sind die wichtigsten Inhalte des Workshops zusammengefasst.

Im Rahmen einer geplanten Umstellung auf Wasserstoff (H₂) ist eine Gasgeräteerhebung gemäß G 680 erforderlich. Für die Einspeisung bis 20 % H₂ wird dies als zu aufwendig eingeschätzt, es wurden Möglichkeiten einer vereinfachten Geräteerfassung diskutiert, da bei einer Einspeisung bis 20 % H₂ keine Änderung der Gasart erfolgt und man sich innerhalb der Toleranzen der Erdgasgruppen L bzw. H bewegt.

Bei den Netzbetreibern sind bereits verschiedene Daten vorhanden, darunter Adressdaten, Zählerdaten und GDR-Daten sowie Anschlussleistung. Es ist jedoch unklar, ob detaillierte Daten der Gasgeräte wie Hersteller, Modell, Typ oder Geräteleistung vorliegen. Weitere relevante Daten umfassen die Anzahl der Gasgeräte pro Haus, insbesondere auch A-Geräte. Die Erfassungsmöglichkeiten der Netzbetreiber beinhalten Neuanlagen, Gerätetausch, Zählerwechsel,

Hausanschlusskontrollen (innenliegende Teile) sowie die Prüfung der Anlage gemäß § 15 NDAV.

Zusätzlich werden spezifische Daten benötigt, darunter Hersteller, Herstellnummern/Seriennummern/Produkt-ID-Nummern, Gerätetyp und -leistung, Baujahr sowie die Gerätekategorie.

Anonymisierte Daten des Schornsteinfegerhandwerks (SF) können hilfreich sein, um Datenschutzerfordernungen zu erfüllen. Es ist jedoch zu beachten, dass A-Geräte bei den Schornsteinfegern nicht erfasst werden. Die Qualität der Daten und die Stichprobe müssen überprüft werden, um sicherzustellen, dass die Daten valide und repräsentativ sind. Für den Datenaustausch mit SF ist eine Austauschseite oder Schnittstelle erforderlich, die den Datenschutzbeauftragten von SF einbindet. Diese Schnittstelle muss sicherstellen, dass alle datenschutzrechtlichen Anforderungen gemäß DSGVO erfüllt werden.

Die Kommunikation zur Beimischung von Wasserstoff erfordert die Einbindung des Fachhandwerks, insbesondere VIU (Installateure) und SF, durch Informationsveranstaltungen wie Installateurausschüsse. Bürgerinformationen sollten sowohl per Flyer als auch in Präsenzveranstaltungen erfolgen. Der Austausch von bestehenden Gasgeräten im Bestand muss erfasst werden, wobei der Prozessablauf durch NB bzw. zukünftig regulativ über NDAV geregelt wird. Einige im Projekt diskutierte Punkte sind bereits mit dem heutigen Gesetzesrahmen möglich und werden derzeit in der Überarbeitung der G 655 aufgegriffen.

Die Einbindung der Kunden bei der Gerätedatenerfassung könnte durch Fotos des Typenschildes erfolgen, was jedoch kritisch ist, da Laien möglicherweise die Haube des Geräts entfernen müssen.

Wenn Wasserstoff eine Erfüllungsoption nach KWP darstellt, wäre ein Datenaustausch zwischen der Kommune, welche die KWP durchführt und NB denkbar, wofür eine regulative Regelung notwendig wäre. Es ist angedacht, einen Leitfaden zur vereinfachten Erfassung für Wasserstoffeinspeisungen bis 20 Vol.-% zu entwickeln, um verschiedene Möglichkeiten als Beispiele aufzuzeigen. Ein einheitliches Erfassungssystem zum Abgleich der Gerätedaten zur H₂-Eignung bis 20 Vol.-% für NB könnte über DVGW implementiert werden. Gewisse Vereinfachungen und Abgrenzungen sind möglich, z. B. für junge Netze oder Netze nach MRU.

In Gebieten, welche zukünftig nach GEG/KWP eine Wasserstoffwärmeversorgung angedacht ist, wird empfohlen, selbstadaptierende Geräte einzubauen, wie in Veröffentlichungen von Vaillant und Viessmann beschrieben. Diese Geräte sind H₂-Ready für 20 Vol.-% Wasserstoff und können ab 2026 mit einem Umstellkit auf 100 % Wasserstoff umgerüstet werden.

Das Dokument "Diskussionsstand zur Geräteerfassung in DVGW-Gremien" (G-PK-2-2-9) behandelt den aktuellen Stand der Erfassung von Gerätedaten in einzelnen DVGW-Projektkreisen, insbesondere im Hinblick auf die Einspeisung bis 20 Vol.-%. Es werden Empfehlungen zur Erfassung von Gerätedaten gegeben, einschließlich Pflichtfeldern und Methoden zur Befüllung. Zu den wichtigen Feldern gehören das Abschlussdatum bzw. Inbetriebnahmedatum, das bei Gasgerätewechseln erfasst wird. Die Anschlussstelle (PLZ, Ort, Ortsteil, Straße, Hausnummer) wird bei Zählerwechseln, Arbeiten vor Ort, Leitungsanlagenprüfungen und Abgasmessungen erfasst. Zudem werden Gerätedetails wie Fabrikat, Typ, Kategorie, Nennleistung, Nennbelastung, Inverkehrbringungsjahr, Seriennummer, Produktidentifikationsnummer, Zustand und Einstellung erfasst.

Das Dokument vergleicht Methoden der Datenerhebung nach G 680 mit vereinfachten Ansätzen bei Einspeiseprojekten. Zu den wichtigen Aktivitäten gehören die Bereitstellung von Zählerdaten, um sicherzustellen, dass Informationen darüber vorliegen, wo Gasgeräte installiert sind, sowie die Datenübertragung in Erfassungssysteme mittels mobiler Datenerfassungsgeräte. Vor-Ort-Datenabgleiche umfassen Sichtprüfungen auf Geräte- und Abgasanschlussmängel. Sicherheitsüberprüfungen beinhalten die Überwachung der Flammen und der Aufstellbedingungen.

Weiterhin beschreibt das Arbeitsdokument Datenerfassungsaktivitäten sowie Anpassungstätigkeiten, wie die Aufnahme von Gerätedaten (Hersteller, Typ, Seriennummer, Kategorie, Baujahr, Nennleistung, Belastung und Gerätezulassung) sowie Abgasmessungen und die Geräteeinregulierung, einschließlich der Überprüfung des Geräteanschlussdrucks und der Kennzeichnung der Geräte entsprechend G 680.

5.2 Möglicher Umstellprozess auf 100 % Wasserstoff

Aus den Vorgaben von technischen Normen und Regeln, insbesondere G 680 und G 655, sowie den Erkenntnissen der Referenzprojekte und den durchgeführten Workshops wurden folgende notwendige Schritte für die Umstellung von Gasinstallationen und Gasgeräten auf Wasserstoff identifiziert, dieser weicht in Details vom aktuellen Regelwerk ab.

5.2.1 Handlungsempfehlung für einen möglichen zur Umstellung auf Wasserstoff

1. Klassifizierung der angeschlossenen Endverbraucher²⁴

- Einfamilienhäuser: Einzelne Haushalte mit geringem Energiebedarf.
- Mehrfamilienhäuser: Gebäude mit mehreren Wohneinheiten und mittlerem Energiebedarf.
- Gewerbe: Kleine bis mittlere Unternehmen mit spezifischen Energieanforderungen.
- Industrie: Große Unternehmen mit hohem Energiebedarf und speziellen Anforderungen an die Gasversorgung. Erdgas-Kraftwerke
- Tankstellen
- Einspeiseanlagen

2. Kontaktaufnahme Endkunde²⁵

- Informationsschreiben: Versand von Informationsmaterialien (Flyer, Broschüren) an alle betroffenen Endkunden.
- Informationsveranstaltungen: Organisation von Veranstaltungen zur Aufklärung über die Umstellung und deren Auswirkungen.
- Hotline und Infotelefon: Einrichtung einer Hotline für Fragen und Unterstützung.

²⁴ G 680, Abschnitt 4.1

²⁵ G 680, Abschnitt 4.2

3. (Stichprobenartige) Überprüfung des Hausanschlusses und der Leitungsanlagen im Gebäude

- Erhebung und Bewertung der installierten Komponenten:
- Dokumentation: Erfassung aller installierten Komponenten (Zähler, Regler, Absperrarmaturen, Gasgeräte).
- Bewertung der Installation: Überprüfung der Eignung für Wasserstoff.
- Identifizierung nicht wasserstofftauglicher Komponenten:
 - Regler ohne Herstellererklärung: Austausch oder Nachrüstung.
 - BGZ (Balgengaszähler): Überprüfung und ggf. Austausch.
 - GS (Gasströmungswächter (innen)): Überprüfung und ggf. Austausch.
 - Gasgeräte: Überprüfung und ggf. Austausch.
- Gebrauchsfähigkeitsprüfung/ Durchführung von Tests zur Sicherstellung der Dichtheit und Funktionsfähigkeit. Eine Alternativ würde die Stoßodorierung darstellen.
- Mängelkarte: Erstellung einer Mängelkarte bei nicht bestandener Überprüfung und Planung der notwendigen Maßnahmen durch den Kunden.

4. Entwicklung eines generellen Sicherheitskonzeptes für den Netzabschnitt

- Gefährdungsbeurteilungen: Durchführung von Gefährdungsbeurteilungen für alle relevanten Bereiche.
- Betriebsanweisungen: Erstellung und Verteilung von Betriebsanweisungen für den sicheren Umgang mit Wasserstoff.
- Odorierung: Sicherstellung der Odorierung des Wasserstoffs zur Erkennung von Leckagen.

5. Prüfung/Implementierung eines Abrechnungskonzeptes

- Abrechnungssystem: Anpassung des bestehenden Abrechnungssystems an die neuen Anforderungen.
- Tarifgestaltung: Entwicklung neuer Tarife für die Wasserstoffversorgung.
- Kundens Schulung: Information / Schulung der Kunden zur Nutzung des neuen Abrechnungssystems.

6. Notwendige Vorbereitungen für Endgeräte (siehe auch G 680)

- Komponentenaustausch: Austausch nicht geeigneter Komponenten.
- Schulungen: Schulung des technischen Personals zur Handhabung und Wartung der neuen Anlagen.

7. Vorbereitende Schritte der Einspeisung

- Tiefbauarbeiten: Durchführung notwendiger Tiefbauarbeiten zur Errichtung der Einspeiseanlage.
- Inbetriebnahme der Einspeiseanlage: Technische Vorbereitung und Testläufe.
- Koordination: Abstimmung mit allen beteiligten Parteien (Netzbetreiber, Rohrleitungsbauer, Gas-Rohrnetzüberprüfungsunternehmen, Installateure, Schornsteinfeger, Kunden).

8. Umstellarbeiten an Leitungsanlagen und Endgeräten

- Umstellung der Leitungsanlagen: Anpassung der Leitungsanlagen an die neuen Anforderungen, siehe G 655 bzw. Regelwerke für Infrastruktur (G 221, G 407, G 408).
- Direkte Spülung/Begasung oder indirekte Spülung/Inertisierung/Begasung der Leitungsanlage bis zum Gasgerät / industrielle Gasanwendung
- Umstellung der Endgeräte: Umstellung mit Umstellkit ²⁶ oder Austausch bei nicht H₂-geeigneten Gasgeräten.
- Wiederinbetriebnahme der Leitungsanlage unter Wasserstoff
- Abnahmeprüfung: Durchführung von Abnahmeprüfungen zur Sicherstellung der Funktionsfähigkeit. (Dichtheits- oder Gebrauchsfähigkeitsprüfung); Alternativ Stoßodorierung
- Start und Inbetriebnahme des Gasgeräts ²⁷
- Abgasmessung und Dokumentation des störungsfreien Betriebs

9. Einrichtung eines Monitoring-Konzeptes und von Anlaufstellen im Fall von Problemen²⁸

- Monitoring-System: Einrichtung eines Systems zur kontinuierlichen Überwachung der Gasversorgung.
- Anlaufstellen: Einrichtung von Anlaufstellen für Kunden im Fall von Problemen oder Fragen.
- Feedback-Schleifen: Regelmäßige Sammlung und Auswertung von Feedback zur kontinuierlichen Verbesserung des Prozesses.

Die Handlungsempfehlungen sollen sicherstellen, dass die Umstellung auf Wasserstoff reibungslos und sicher verläuft, unter Berücksichtigung aller relevanten technischen und organisatorischen Aspekte.

5.2.2 Schulungskonzepte

Insbesondere die Schulung von Fachpersonal zur Umstellung von Netzen und Hausanschluss sowie Gasinstallationen und industriellen Gasanwendungen ist ein wichtiger Aspekt für die

²⁶ G 680, Abschnitt 5.4

²⁷ G 680, Abschnitt 5.5

²⁸ G 680, 5.7, G 695

Umstellung wie auch die Kundenkommunikation mit Fachhandwerk, Kommunen und Endkunden. Schulungsinhalte könnten in folgender Art gestaltet werden:

Für die Umstellung auf Wasserstoff sind umfassende Schulungen für das Personal erforderlich, um sicherzustellen, dass alle technischen und sicherheitsrelevanten Aspekte abgedeckt sind. Hier sind die wichtigsten Schulungsinhalte:

1. Grundlagen der Wasserstofftechnologie

- Eigenschaften von Wasserstoff: Physikalische und chemische Eigenschaften, Unterschiede zu Erdgas.
- Sicherheitsaspekte: Explosionsgrenzen, Zündquellen, Odorierung, Umgang mit Leckagen.

2. Technische Schulungen

- Materialkunde: Eignung von Werkstoffen und Dichtungen für Wasserstoff.
- Komponenten: Funktionsweise und Anforderungen an Zähler, Regler, Absperrarmaturen, Gasströmungswächter und thermische Absperreinrichtungen.
- Leitungsdimensionierung: Berechnung und Anpassung der Leitungen für den dreifachen Betriebsvolumenstrom.

3. Installations- und Wartungsschulungen

- Installation von Wasserstoffgeräten: Einbau und Inbetriebnahme von wasserstofftauglichen Gasgeräten und Abgasanlagen.
- Wartung und Inspektion: Regelmäßige Wartung und Inspektion der Wasserstoffanlagen, Erkennung und Behebung von Mängeln.

4. Sicherheits- und Notfallmanagement

- Gefährdungsbeurteilungen: Durchführung und Dokumentation von Gefährdungsbeurteilungen.
- Notfallmaßnahmen: Vorgehensweise bei Leckagen, Bränden und anderen Notfällen.
- Gaswarnsysteme: Installation und Wartung von Gaswarnsystemen, Schulung im Umgang mit Alarmen.

5. Kundenkommunikation

- Informationsweitergabe: Vermittlung von Informationen an Kunden über die Umstellung und deren Auswirkungen.
- Umgang mit Kundenanfragen: Beantwortung von Fragen und Bedenken der Kunden, Durchführung von Informationsveranstaltungen.

6. Rechtliche und regulatorische Schulungen

- Regelwerke und Normen: Kenntnis der relevanten DVGW-Regelwerke und gesetzlichen Vorgaben.
- Datenschutz: Einhaltung der Datenschutzbestimmungen bei der Erfassung und Verarbeitung von Kundendaten.

7. Praktische Übungen und Simulationen

- Praktische Installationen: Durchführung von Installationen und Umstellungen unter Anleitung.
- Simulationen: Übung von Notfallszenarien und Reaktionsmaßnahmen.

Diese Schulungen sollten regelmäßig aktualisiert und wiederholt werden, um sicherzustellen, dass das Personal stets auf dem neuesten Stand der Technik und Sicherheitsanforderungen ist.

Die Inhalte sind teilweise bereits über vorhandene Schulungsinhalte z. B. der Beruflichen Bildung des DVGW abgedeckt. Siehe hierzu:

- [DVGW Website Berufliche Bildung: Wasserstoff](#)
- [DVGW Website Berufliche Bildung: Direktsuche](#) (Fachkraft für die Gasgeräteanpassung zur L-H-Marktraumumstellung)

5.2.3 Technisch zu klärende Punkte

Derzeit besteht noch Klärungsbedarf an folgenden Punkten

1. Ist eine Inertisierung der Leitungsanlage beim Kunden notwendig? Auf Grund des geringen Leitungsinhalts, insbesondere in der häuslichen Installation, und der kurzen zu erwartenden Zeiten, zu denen die Leitungsanlage gegen die Atmosphäre geöffnet ist, wird die Notwendigkeit der Inertisierung derzeit in Frage gestellt. Hier soll das Projekt HyVent weitere Erkenntnisse liefern.
2. Für das Freispülen der Leitungsanlage (mit Stickstoff oder Wasserstoff) muss ein einheitliches Vorgehen definiert werden. Dies muss beinhalten:
 - a. Ausblasen oder Abfackeln? Fällt der Umstellprozess in den Geltungsbereich der EU-Methanverordnung?
 - b. An welcher Öffnung wird gespült? Die Spülöffnung muss möglichst dicht am Gasgerät liegen.
 - c. Welche Bedingungen sind an einen Abfackelprozess geknüpft?
 - d. Besteht die Möglichkeit, für neue Gasgeräte einen definierten Spülanschluss als Ende der Leitungsanlage oder Bestandteil des Gasgerätes zu beschreiben, beispielsweise über entsprechende Bauteil-Normung und eine Ergänzung in der G 655 oder TRGI zu standardisieren?
3. Ist nach der Umstellung des jeweiligen Leitungsabschnitts beim Kunden (Inbetriebnahme) eine Dichtheitsprüfung notwendig oder kann die Überprüfung aufgrund

bestehender Instandhaltungsvorgaben (z. B. Rohrnetzüberprüfung oder Gebrauchsfähigkeitsprüfung) entfallen?

5.3 Prozessablaufdiagramme zum Umstellprozess

Im Rahmen dieses Projekts wurde untersucht, wie ein standardisiertes Konzept zur Umstellung eines Netzgebiets, inkl. der angeschlossenen Leitungsanlagen der Kunden, auf Wasserstoff aussehen kann. Aufbauend auf den durchgeführten Literaturrecherchen, Experten-Workshops, der am GWI aufgebauten Versuchsinfrastruktur und unter Berücksichtigung der bestehenden gesetzlichen Vorschriften und DVGW-Regelwerks wurden Prozessablaufdiagramme für den Umstellprozess auf Wasserstoff erarbeitet. Auf einer hohen Flugebene wird der Gesamtprozess der Umstellung von Erdgas auf Wasserstoff abgebildet (Ebene 1) und anschließend mit Hilfe weiterer Prozessbilder der Umstellprozess in den Bereichen Gasverteilnetze (inklusive Hausanschluss), Gashausinstallationen und Gasanwendungen detaillierter dargestellt (Ebene 2).

Dabei wird aufgezeigt, wie diese Bereiche zeitlich ineinandergreifen, wo die jeweiligen Verantwortlichkeiten liegen, welche technischen Regeln beachtet werden müssen und an welchen Stellen Schnittstellen bestehen. Die zeitliche Komponente wird abgebildet, indem sich die Prozessbilder in die drei übergeordneten Phasen:

- vorbereitende Analysen und Konzeptionierung,
- Anpassungsmaßnahmen und
- Durchführung der Umstellung

aufteilen und die durchzuführenden Schritte jeweils darunter zugeordnet sind (siehe auch farbliche Abgrenzung).

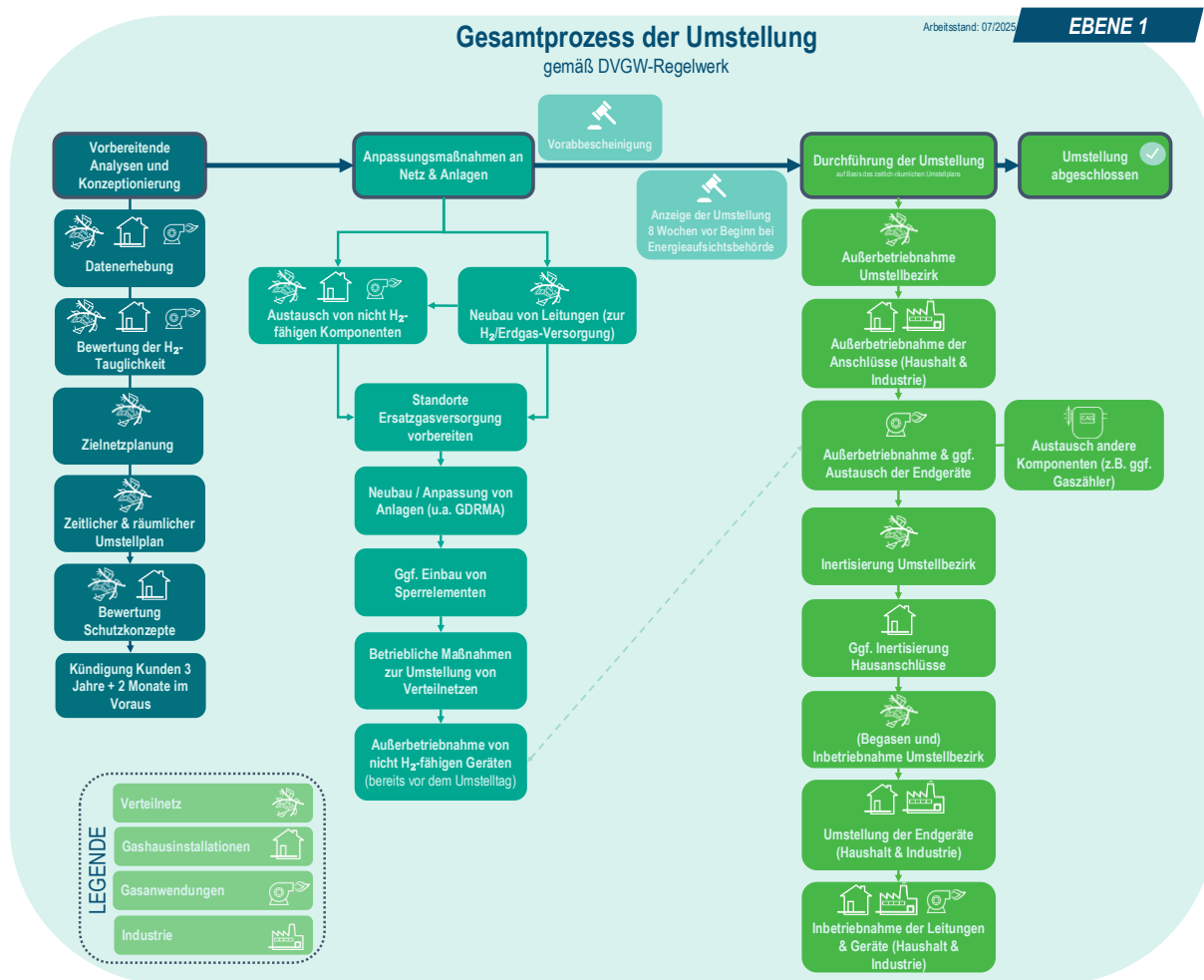


Abbildung 5.3: Gesamtprozess der Umstellung, laut DVGW-Regelwerk (eigene Darstellung DBI)

In Abbildung 5.3 ist der **Gesamtprozess** der Umstellung für Gasverteilnetze, Hausanschlüsse, Gashaushaltsinstallationen und Gasanwendungen abgebildet (Ebene 1). Die Symbole zeigen, worauf sich die jeweilige Maßnahme bezieht: Verteilnetz, Gashaushaltsinstallationen oder/und Gasanwendungen (siehe Legende). Die Phase „Vorbereitende Analysen und Konzeptionierung“ bildet den Startpunkt der Umstellung und beinhaltet die aufgelisteten Schritte, die zum Teil parallel durchgeführt werden können und keiner festgelegten Reihenfolge bedürfen. Die zweite Phase umfasst die technischen Anpassungsmaßnahmen und Vorbereitungen vor der tatsächlichen Umstellung. In dieser Phase sollten alle möglichen Vorbereitungen getroffen werden, damit am tatsächlichen „Umstellungstag“ alles so reibungslos und effektiv wie möglich abläuft. Sobald die Vorbereitungen umgesetzt sind und das Umstellvorhaben rechtzeitig bei der Behörde angezeigt worden ist, kann die Umstellung vollzogen werden. Auf Basis des zeitlich-räumlichen Umstellfahrplans sind die aufgezeigten Schritte je Umstellbezirk zu durchlaufen.

Folgende **generelle Hinweise** gelten für alle nachfolgenden Prozessablaufdiagramme der zweiten Ebene (Abbildung 5.4 bis Abbildung 8.2):

- Die grauen Felder  zeigen die Schnittstellen zu anderen Bereichen (Gashaushaltsinstallationen bzw. Gasanwendungen) an.
- Das Piktogramm einer Fachkraft mit Schutzhelm  symbolisiert die Schnittstelle zu einer wechselnden Verantwortlichkeit.

- Das Piktogramm eines technischen Arbeitsdokuments symbolisiert den Bezug zu geltenden Regelwerken und Vorgaben, die im jeweiligen Umsetzungsschritt zu berücksichtigen sind.

Abbildung 5.4 zeigt eine detaillierte Darstellung des Umstellprozesses für **Gasverteilnetze** gemäß dem derzeitigen Stand des DVGW-Regelwerks – also eine Ebene tiefer als das vorherige Schaubild (Ebene 2).

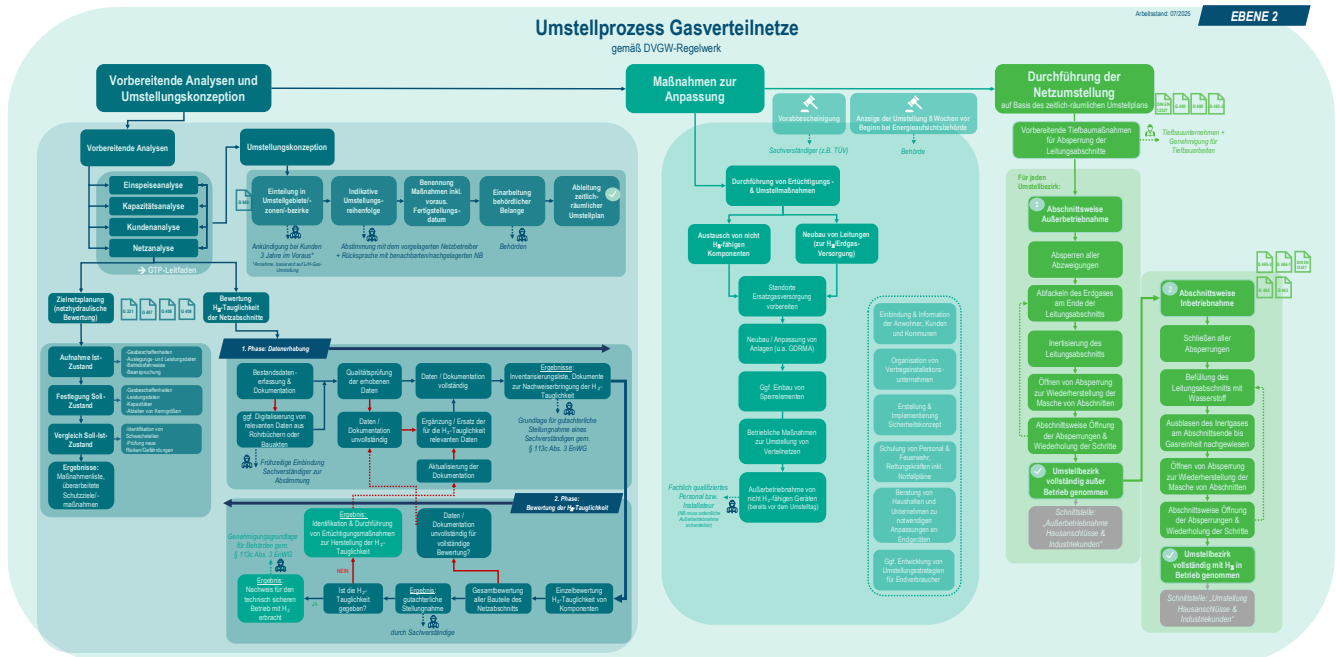


Abbildung 5.4: Umstellprozess Gasverteilnetze, laut DVGW-Regelwerk (eigene Darstellung DBI)

Das Prozessablaufdiagramm (Abbildung 5.4) zeigt, wie systematisch und stufenweise eine Umstellung von Erdgas auf Wasserstoff im **Gasverteilnetz** erfolgen muss – inklusive technischer Prüfung, Anpassung, Einbindung aller Beteiligten und konkreter Durchführung. Der Umstellprozess startet mit der systematischen Erhebung und Analyse der vorhandenen Netz- und Kundendaten (wie auch im GTP-Leitfaden beschrieben). Eine detaillierte Beschreibung der ‚vorbereitenden Analysen‘ ist in Kapitel 2.1 zu finden. Besonders hervorzuheben ist, dass die Ergebnisse der vorbereitenden Analysen unmittelbar in die Prozessphase ‚Maßnahmen zur Anpassung‘ einfließen. Sie bilden dort eine wesentliche Grundlage für die Ableitung konkreter Anpassungserfordernisse. Die einzelnen Maßnahmen zur Anpassung sind in 2.3 näher beschrieben. Die im Bereich ‚Maßnahmen zur Anpassung‘ separat dargestellten Elemente sind prozessbegleitende, organisatorische und kommunikative Maßnahmen, die nicht zwingend in einer festen Reihenfolge verlaufen und sich von den rein technischen bzw. baulichen Schritten des Umstellprozesses unterscheiden. Durch die abgesetzte Darstellung in helltürkisgrün mit gestrichelter Umrandung wird ihre Querschnittsfunktion im Gesamtprozess betont. Die letzte Prozessphase zur ‚Durchführung der Netzumstellung‘ ist ausführlich in Kapitel 2.5 beschrieben. Wie bereits im Gesamtablauf (Abbildung 5.3) dargestellt, ist zu beachten, dass die aufgeführten Schritte für jeden einzelnen Umstellbezirk vollständig durchzuführen sind. Darüber hinaus müssen bestimmte Teilschritte für jeden betroffenen Leitungsabschnitt wiederholt werden – dies wird durch den gestrichelten Rückwärtspfeil symbolisiert, der auf einen vorherigen Schritt verweist.

Abbildung 5.5 zeigt eine detaillierte Darstellung des Umstellprozesses für **Gashausinstallati-onen** und Gasgeräte gemäß dem derzeitigen Stand des DVGW-Regelwerks. Es beschreibt den Ablauf für die technische und sicherheitsrelevante Umstellung von Erdgas auf Wasserstoff in Gebäuden – also bei den Endkundeninstallationen. Eine detaillierte Beschreibung der hier aufgezeigten Schritte ist in Kapitel 3.3 zu finden.

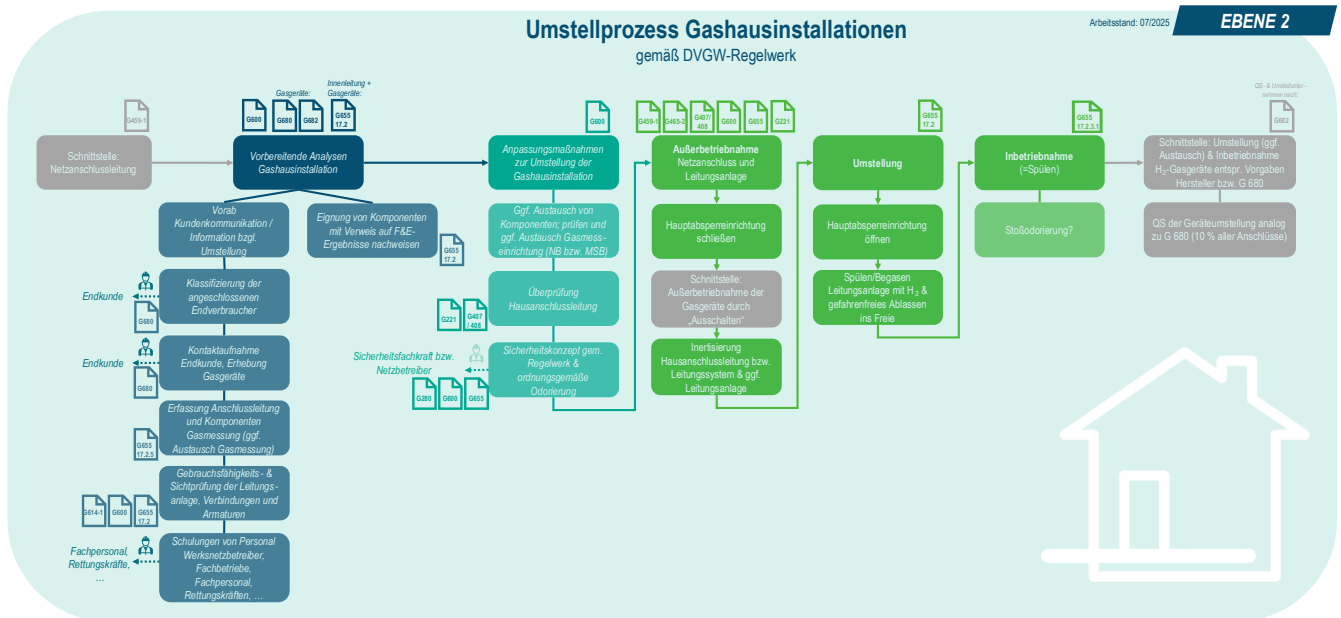


Abbildung 5.5: Umstellprozess Gashausinstallationen, laut DVGW-Regelwerk (eigene Darstellung DBI)

Abbildung 5.6 zeigt eine detaillierte Darstellung des Umstellprozesses für **industrielle Gasanwendungen** – also Leitungsanlagen und Gasanwendungen wie Thermoprozessanlagen, Großkesselanlagen, -Heizkessel, usw., die mit Wasserstoff betrieben werden sollen. Es beschreibt in kompakter Form den Ablauf der technischen Umstellung und Inbetriebnahme dieser Leitungsanlagen und Gasanwendungen. Eine detaillierte Beschreibung der hier aufgezeigten Schritte ist in Kapitel 3.5 und 4 zu finden.

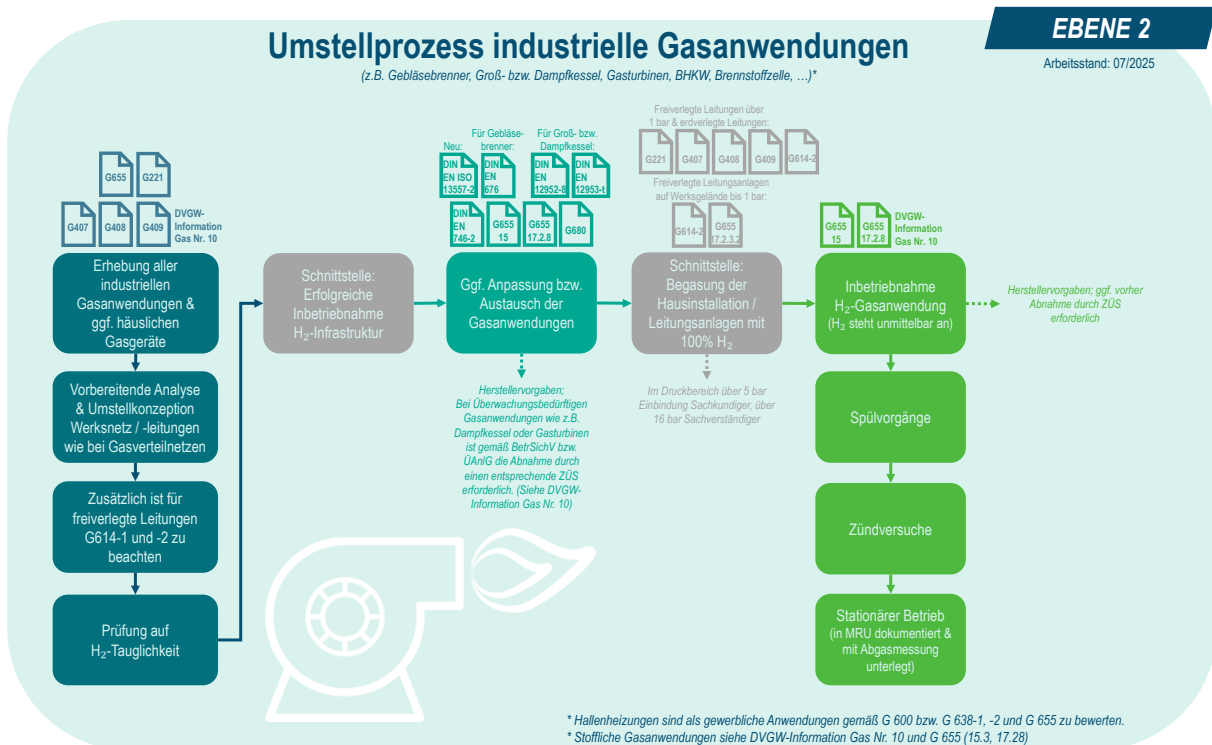


Abbildung 5.6: Umstellprozess industrielle Gasanwendungen (eigene Darstellung DBI)

6 H₂-Reinheit bzw. Verunreinigungen

Die Umstellung des Gasnetzes auf Wasserstoff erfordert Anpassungen der Infrastruktur sowie eine Gewährleistung der Gasqualität. Basierend darauf wurde Wasserstoff als eine neue, 5. Gasfamilie mit zwei Qualitätsstufen (Gruppe A: ≥ 98 Mol-% und Gruppe D: $\geq 99,97$ Mol-%) in das Arbeitsblatt des DVGW [44] integriert. Im Folgenden werden die erforderlichen Maßnahmen zur Reinigung des Netzes und der Gasaufbereitung sowie die damit verbundenen technischen Herausforderungen dargestellt. Das Ziel ist die effiziente und nachhaltige Integration von Wasserstoff in das bestehende Gasnetz. Die detailreiche Ausarbeitung ist im Anhang zu finden.

6.1 Qualitätsanforderungen an Wasserstoff in Gasnetzen

Die DVGW G 260 (2021) definiert die Verunreinigungen und legt deren Grenzwerte für die Wasserstoff-Gruppen A und D fest. In dieser Norm ist die Gruppe A der neuen 5. Gasfamilie von Relevanz, mit einem Mindestgehalt an Wasserstoff von 98 %. Diese Qualität ist für den Großteil der Wasserstoffanwendungen, wie beispielsweise als Reduktionsmittel in der Stahlproduktion oder als Brennstoff zur Erzeugung von Prozesswärme, ausreichend. Dabei wird berücksichtigt, dass sich möglicherweise noch in umgestellten Erdgasleitungen befindliche Kohlenwasserstoffe zu Beginn in dem Wasserstoffgemisch befinden können. Erste Untersuchungen zeigen, dass die Wasserstoffqualität von diesen Reststoffen nur minimal beeinträchtigt wird. Einige Endverbraucher, wie beispielsweise die Elektronik- und Brennstoffzellenindustrie, benötigen die hochreine Wasserstoffqualität der Gruppe D. Für diese Endverbraucher ist die Bereitstellung von Wasserstoff über Pipelines und Gasnetze besonders herausfordernd, da sehr hohe Reinheitsanforderungen erfüllt werden müssen. Die hohe Nachfrage nach ultrareinem Wasserstoff erschwert den Transport über die bestehende Infrastruktur und erfordert zusätzliche Reinigungsmaßnahmen oder alternative Versorgungsmethoden [45].

6.2 Verunreinigungen im Netz

Bei der Umstellung von Erdgasnetzen auf Wasserstoff ist eine genaue Analyse der bestehenden Verunreinigungen erforderlich, da diese die Wasserstoffqualität beeinträchtigen können. Verunreinigungen wie Staub, Flüssigkeiten und gasförmige Begleitstoffe aus den Netzen müssen entfernt werden, um die Gasqualität zu gewährleisten. Es wird erwartet, dass während der Umstellung manche Verunreinigungen durch den Wasserstoff ausgetragen werden. Es sollten, wenn möglich, Maßnahmen wie Molchung und Filterwechsel getroffen werden, um die Konzentration von Verunreinigungen zu reduzieren. Schwefelverbindungen und Permanentgase sollten möglichst vermieden werden. Der Einsatz von ölfreien Kompressoren und Gasfiltern kann helfen, Verunreinigungen zu verhindern. In neuen Wasserstoffnetzen müssen mögliche unbekannte Verunreinigungen berücksichtigt werden, doch die Bereitstellung von Wasserstoff der Gruppe A ist auch hier möglich [46].

Folgende Hintergründe hat die Farbdarstellung in folgender Tabelle 6.3:

- **Rot:** Es ist ziemlich sicher anzunehmen, dass Verunreinigungen auftreten können und möglicherweise die Erreichung der Qualitätsstandards der Gruppe A oder D beeinträchtigen könnten

- **Gelb:** Aufgrund von Unsicherheiten, insbesondere hinsichtlich fehlender absichernder Kenntnisse über die zeitliche Entwicklung der Konzentration der betroffenen Komponente, ist es schwierig, genaue Vorhersagen zu treffen.
- **Grün:** Es werden keine Probleme erwartet

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Verteilung von Wasserstoff in der Qualitätsstufe A im Verteilnetz grundsätzlich machbar ist [44].

Tabelle 6.3: Mögliche Verunreinigungen im Verteilnetz während und nach der Umstellungsphase (Eigene Darstellung unter Berücksichtigung von DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH) [44]

		Erdgaseinführung regional unterschiedlich - zwischen '70iger bis '90iger davor Stadtgas		Gasnetz (Bestand); Erdgas+ weitere Komponenten (Odorierung, Biogas)		Neubau ohne vorgelagertes Netz	
		Grenzwert Grade A	Grenzwert Grade D	Grenzwert Grade A	Grenzwert Grade D	Grenzwert Grade A	Grenzwert Grade D
Material		Stahl		Kunststoff, Stahl		Kunststoff	
Relevante Stoffgruppen vor Umstellung	Kohlenwasserstoff						
	Wasser						
	Schwefelverbindungen						
	Inertgase + O ₂						
	CO, CO ₂ , Methan						
	Sonstiges						
Relevante Stoffgruppen nach Gleichgewichtseinstellung nach Umstellung	Kohlenwasserstoff						
	Wasser						
	Schwefelverbindungen						
	Inertgase + O ₂						
	CO, CO ₂ , Methan						
	Sonstiges						

6.3 Maßnahmen zur Reinigung

6.3.1 Entfernung von Verunreinigungen aus dem Netz

Um Wasserstoff in der geforderten Gasqualität zu transportieren, müssen netzspezifische Verunreinigungen entfernt werden. Die Abtrennung von Permanentgasen (N_2 , O_2 , CO , CO_2) ist schwierig und sollte bereits bei der Erzeugung erfolgen. Kohlenwasserstoffe (C_1 - C_{40}) können effizient durch Adsorption an Aktivkohle entfernt werden. Auch die Gastrocknung ist durch Molekularsiebe und Zeolithe gut umsetzbar. Schwefelverbindungen erfordern aufwändigere Reinigung, da Aktivkohle nur begrenzt wirksam ist. Hier sind chemisorptive Aktivkohlen oder katalytische Verfahren notwendig, die jedoch höhere Kosten und technische Herausforderungen mit sich bringen. Die Gasaufbereitung kann im Laufe der Zeit möglicherweise reduziert werden [46].

6.3.2 Reinigungsmaßnahmen bei Wasserstoffnetzen

Reinigungsmaßnahmen wie Molchungen werden regelmäßig durchgeführt, um Ablagerungen und Kondensate zu entfernen. Bei der Umstellung von Gastransportleitungen auf Wasserstoff werden Molchungen zur Standardprozedur. Während das Transportnetz durch Molchung gereinigt werden kann, ist dies im Verteilnetz aufgrund der Gegebenheiten oft nicht möglich [44].

6.3.3 Reinigen von Rohrleitungen und Möglichkeiten zur Wiederherstellung der geforderten H_2 -Reinheit

Eine Entmolchung sollte – sofern technisch und wirtschaftlich sinnvoll – möglichst bereits vor der Umstellung auf Wasserstoff erfolgen. Eine Versuchsreihe zur Bewertung der Wasserstoffgasqualität in umgewidmeten Leitungen umfasste drei Schritte: 1) Analyse der Rohrwand auf Ablagerungen, 2) Zeitstandversuch mit Wasserstoffdruck über zwei Wochen, 3) Strömungsdynamischer Versuch mit Wasserstoff. Für die Analyse wurden Methoden wie Gaschromatographie, Röntgenspektroskopie und Röntgendiffraktometrie eingesetzt. Der Versuchsaufbau folgte den Richtlinien der EN ISO 10715 für Erdgas [47].

Zur Reinigung von Verteilnetzleitungen kommen mehrere Verfahren zum Einsatz, um Verunreinigungen wie Staub, Feuchtigkeit und Rückstände zuverlässig zu entfernen und die Leitungen für den Transport von beispielsweise Wasserstoff vorzubereiten. Ein gängiges Verfahren ist das Spülverfahren, bei dem die Leitungen mit einem geeigneten Gas – häufig Stickstoff – durchströmt werden, um lose Partikel, Feuchtigkeit und Restgase auszutreiben. Nach der chemischen Behandlung werden die Rückstände gründlich ausgespült. Abschließend folgt eine Trocknung, die essenziell ist, um verbleibende Feuchtigkeit zu entfernen, da diese die Reinheit und Qualität des transportierten Mediums – insbesondere bei Wasserstoff – negativ beeinflussen kann. Die Trocknung kann durch die Verwendung geeigneter Trocknungsgase oder durch das Evakuieren der Leitungen erfolgen [45]. Dieses sehr aufwendige Verfahren erscheint als eher nicht umsetzbar, so dass eine höhere Verunreinigung kurz nach der Umstellung in Erwägung gezogen werden sollte. Ferner ist anzumerken, dass nur empfindliche Endgeräte wie z.B. Brennstoffzellen davon beeinträchtigt werden würden. Diese müssten jedoch auch nach einer Reinigung durch eine Aufreinigung geschützt werden.

Nach derzeitigem Kenntnisstand ist anzunehmen, dass die Wasserstoffqualität der Gruppe D nicht über vorhandene Leitungen verteilt werden kann. Diese Unsicherheit betrifft insbesondere die direkte Belieferung von Wasserstoff-Tankstellen über bereits existierende Leitungen. Verteilnetzbetreiber hätten grundsätzlich die Möglichkeit, wie auch die Tankstellenbetreiber,

die Wasserstoffqualität der Gruppe D vor der Übergabe an den Kunden selbst zu erzeugen. Bisher ist eine Regelung der Verantwortlichkeit für die Herstellung der Reinheit noch nicht festgelegt. Dabei müssen Komponenten entfernt werden, die (zeitlich begrenzt) von der Pipeline wandung einer bestehenden Pipeline in den Wasserstoff abgegeben werden. In der nachfolgenden Tabelle sind diese potenziellen Komponenten aufgeführt. Die Tabelle zeigt, dass eine Reinigung grundsätzlich möglich erscheint. Die erforderlichen Konzentrationen sind jedoch so gering, dass Erfahrungen zur Adsorptionskapazität und dem Durchbruchverhalten in diesem Spurenbereich noch fehlen. Dies wird Gegenstand von Projekten in den kommenden Jahren sein, unter anderem im Rahmen des Projekts „Energiepark Bad Lauchstädt – EnergieparkBL“ [48].

Tabelle 6.4: Mögliche Komponenten von Rohrleitungssystemen und die Entfernung von Komponenten [48]

Komponente	Aufbereitungsverfahren	Bemerkungen
Kurzkettige Kohlenwasserstoffe (Ethan, Propan, Butane..)	Adsorber (Aktivkohle)	
langkettige Kohlenwasserstoffe (um C14, Verdichteröle)	Adsorber (Aktivkohle)	Glykole analog
Schwefelwasserstoff H ₂ S, Schwefel	Adsorber	Spezialadsorbentz
Odoriermittel	Adsorber	Adsorptionsmittel wählbar in Abhängigkeit vom Odoriermittel

6.4 Fazit

Studien zur Wasserstoffqualität in umgewidmeten Pipelines zeigen Unsicherheiten hinsichtlich des Transports von hochreinem Wasserstoff, insbesondere für Tankstellen. Daher wurde Wasserstoff in den DVGW-Arbeitsblatt G 260 als 5. Gasfamilie mit zwei definierten Qualitätsstufen klassifiziert: Gruppe A (≥ 98 Mol-%) und Gruppe D ($\geq 99,97$ Mol-%). Während der Transport über Pipelines für Verbraucher der Gruppe A möglich ist, stellt die Erreichung der für Gruppe D erforderlichen Reinheit über bestehende Gasnetze eine erhebliche Herausforderung dar. Wasserstoff der Gruppe A, der einen geringeren Reinheitsgrad aufweist, eignet sich für Verbrennungsanwendungen und verträgt einen höheren Grad an Verunreinigungen, so dass er leichter eingesetzt werden kann. Wasserstoff der Gruppe D hingegen, der einen höheren Reinheitsgrad aufweist, erfordert strenge Reinigungsverfahren und eignet sich am besten für empfindliche Anwendungen wie Brennstoffzellen und hocheffiziente Systeme.

Das Kapitel untersucht die Herausforderungen der Umstellung bestehender Gasnetze auf Wasserstoff (H₂) unter Wahrung der Gasqualität und Minimierung potenzieller Kontaminationsrisiken für Endverbraucher. Dieser Prozess erfordert Anpassungen der Infrastruktur sowie eine strikte Aufrechterhaltung der H₂-Reinheit, um Materialschäden bei der Anwendung auf Endnutzerebene zu verhindern. Verunreinigungen wie Staub, Flüssigkeiten und Restgase in Gasleitungen können die Wasserstoffqualität beeinträchtigen, weshalb Filtrations- und Reinigungsverfahren wie Molchung und Filterwechsel unerlässlich sind. Die vollständigen Details zur Wasserstoffqualität finden Sie im Anhang.

7 Fachkräftebedarf und zeitliche Anforderungen

Die deutsche Regierung strebt durch die Nationale Wasserstoffstrategie an, Deutschland als führenden Industriestandort der Zukunft zu etablieren. Ihr Ziel ist es, mithilfe von grünem Wasserstoff die Wettbewerbsfähigkeit zu stärken, Klimaziele zu erreichen und neue Marktchancen zu erschließen. Zu diesem Zweck unterstützt die Bundesregierung Initiativen und realitätsnahe Testumgebungen (Reallabore) und hat ein eigenes nationales Innovationsprogramm speziell für den Verkehrssektor ins Leben gerufen. Ergänzend hat sie die Lotsenstelle Wasserstoff eingerichtet, die Interessierte bei der Suche nach geeigneten Fördermöglichkeiten für ihre Projekte unterstützt [49].

Ein herausforderndes Problem im Wasserstoffbereich ist der Mangel an Fachkräften. Das Thema Fachkräfte ist in allen Bereichen relevant, nicht nur im Wasserstoffsektor. Der Energiesektor, insbesondere die Wasserstofftechnologie, zeichnet sich jedoch dadurch aus, dass andere Branchen bereits über etablierte Aus- und Weiterbildungssysteme verfügen, so dass eine ausreichende Anzahl an Fachkräften grundsätzlich ausgebildet werden kann. Im Gegensatz dazu steht die Entwicklung solcher Systeme spezifisch für die Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie noch ganz am Anfang. Die Ausbildungsstrukturen für Erdgas können jedoch zum Großteil übernommen und wurden durch Wasserstoff erweitert, so dass im Bereich der Gasversorgung eine schnelle Ausbildung ermöglicht wurde. Da der Markt für Elektrolyseure und Brennstoffzellenanwendungen noch in den Kinderschuhen steckt, besteht ein Bedarf an der Ausbildung von Fachkräften, die diese neuen Produkte bauen, installieren, warten und reparieren können [49]. Erste ausführliche Schlussfolgerungen zu den zu erwartenden Beschäftigungseffekten der Wasserstoffwertschöpfungskette wurden von STEEG ET AL. (2022) im Rahmen eines "BIBB Discussion Paper" gezogen. Dabei wurde betont, dass zunächst ein Beschäftigungsaufbau in Bereichen wie der technischen Forschung, dem Maschinenbau, der Chemie sowie der Elektro- und Energietechnik zu erwarten ist. Es wurde jedoch auch darauf hingewiesen, dass noch erheblicher Forschungsbedarf in Bezug auf Vorleistungsfragen, Personalbedarfe und Arbeitsproduktivität in einer zukünftigen Wasserstoffwirtschaft besteht [50].

Analog zu den entwickelten Roadmaps für die Dimensionen Politik, Technologie, Markt und F&E im Hinblick auf den Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft haben KRICHEWSKY-WEGENER ET AL. (2020) diese Dimensionen um den Bereich Skills erweitert. Dabei wird der Bedarf an Qualifizierung in der Wasserstoffwirtschaft prognostiziert (siehe Abbildung 7.1).



Abbildung 7.1: Prognose des Bedarfs an Qualifizierung in der Wasserstoffwirtschaft (Quelle: Krichewsky-Wegener et al. 2020, S.3) [50]

Wie aus Abbildung 7.1 hervorgeht, benötigt Deutschland im Bereich der Wasserstoffwirtschaft künftig sowohl im Ausbildungs- als auch im akademischen Bereich mehr qualifiziertes Personal.

Dies erfordert die Schaffung geeigneter Ausbildungswege und die Einstellung kompetenter Ausbilder, die den zukünftigen Technikern das notwendige Wissen vermitteln. Zu den wichtigen Profilen der zukünftig benötigten Fachkräfte gehören technische Systemplaner, Anlagenmechaniker, Mechatroniker, Chemikanten, Elektroniker für Automatisierungstechnik sowie Fachkräfte für Schutz und Sicherheit. Diese Fachkräfte sind entscheidend für die Entwicklung, den Bau, die Prüfung und die Inbetriebnahme von Wasserstoff-Erzeugungsanlagen. Darüber hinaus sind sie für den Betrieb, die Wartung und die Überwachung der Anlagen verantwortlich [49]. Darüber hinaus werden Fachkräfte für die Verteilung, den Transport und die Umstellung der Gasbeschaffenheit für die Endnutzer benötigt. Dazu zählen unter anderem Netzingenieure, Schweißer und Schweißfachingenieure, Gas-Installationsfirmen, Umstellunternehmen, Rohrbauer, Planungsingenieure, Tiefbauer und andere spezialisierte Berufe [51]. Der Prozess beginnt jedoch bereits früher, indem Entscheider, Fachkräfte und Verantwortliche breit über das Thema Wasserstoff und seine Bedeutung für das Unternehmen informiert bzw. geschult werden. Dies ist entscheidend, damit sie die Potenziale und Herausforderungen individuell einschätzen können. Hierbei spielen Politik, Wirtschaft, Verbände und Bildungsinstitutionen eine wichtige Rolle, indem sie zunächst Kompetenzen aufbauen. Denn es gibt noch nicht genügend Wissensträger, die das erforderliche Know-how weitergeben können. Ein Beispiel für diesen notwendigen Kompetenzaufbau zeigt die IHK Lüneburg-Wolfsburg, die den Weiterbildungsbedarf im Bereich Wasserstoff systematisch erfasst hat. Ein zentrales Ergebnis dieser Analyse ist, dass eine ausreichende Qualifizierung von Fachkräften entscheidend ist, um den Marktstart des Wasserstoffsektors erfolgreich zu gestalten. Daher sollten bereits jetzt Weiterbildungskapazitäten geschaffen werden, um einem möglichen Fachkräftemangel entgegenzuwirken. Im Rahmen der Vorbereitung auf den Marktstart sollten außerdem Standards entwickelt werden, und auch das Thema Arbeitssicherheit sollte berücksichtigt werden [49].

Übergreifende Themen wie gesellschaftliche Akzeptanz, angewandte Forschung und die Ausbildung von **Fachkräften** bilden die Grundlage für eine erfolgreiche Umsetzung der Wasserstoffwirtschaft und müssen konsequent verfolgt werden [52]. Die gute Nachricht ist, dass Organisationen wie der DVGW und andere wesentlicher Akteure diese wichtige Aufgabe bereits angehen. Zahlreiche Schulungsseminare sind schon etabliert und H₂-Akademien und Brennstoffzellen-Seminare werden derzeit bundesweit aufgebaut.

7.1 Fachkräfte in der Wasserstoffwertschöpfungskette

Die Bedienung von gasbetriebenen Anlagen mit einer Schnittstelle zwischen Gas und Strom ist in Deutschland nicht neu. Fachkräfte, die an solchen Anlagen arbeiten, verfügen in der Regel über Kenntnisse in beiden Bereichen. Jedoch sind sie oft noch nicht ausreichend mit den spezifischen chemischen und physikalischen Eigenschaften von Wasserstoff vertraut. Dies ist von Bedeutung, da besondere Vorsichtsmaßnahmen erforderlich sind, insbesondere im Hinblick auf den Explosionsschutz im Bereich elektrischer Anlagen [53].

Die Breite der zuvor genannten Bereiche verdeutlicht die Komplexität des Wandels in der Arbeitswelt. Ein Blick auf die Wasserstoffwertschöpfungskette verdeutlicht, dass noch weitere Bereiche und somit zahlreiche Berufsgruppen mit den Veränderungen konfrontiert werden (siehe

Tabelle 7.5).

Tabelle 7.5: Übersicht über die Bereiche der Wasserstoffwertschöpfungskette [53]

Erzeugung	Infrastruktur und Systemintegration	Anwendung/Nutzung	Sicherheit, nachhaltige Markteinführung
Elektrolyse	Gesamtsystemintegration	Stahlindustrie	sicherheitstechnische Fragestellungen
fotoelektronisch	nicht leitungsgebundene Infrastruktur	Chemieindustrie	Geschäftsmodelle
fotobiologisch	leitungsgebundene Infrastruktur	Prozesswärme	Nachhaltigkeit von H ₂
Biomasse	mittel- und großskalige Speicher	stationäre Anwendung (Turbine, Motoren, Brennstoffzelle)	
Wasserstoff über CCS und CCU		Straßenverkehr	
Pyrolyse		Schienenverkehr	
geologische Vorkommen		Schiffsverkehr	
synthetische Kraftstoffe		Luftverkehr	
		weitere Industrien (z. B. Papier)	

7.1.1 Infrastruktur und Gesamtsystemintegration

In der Gesamtsystemintegration geht es darum, alle Energieanlagen wie Elektrolyseure und Brennstoffzellen passgenau in die bestehenden Systeme für Strom und Gas zu integrieren. Daher bestehen bei den in Tabelle 7.6 genannten Berufsgruppen Verbindungen zu den dort aufgeführten Querschnittsthemen. Für den Bereich der leitungsgebundenen Infrastruktur bietet Tabelle 7.7 eine Übersicht über die entsprechenden Berührungspunkte.

Tabelle 7.6: Gesamtsystemintegration [51]

Involvierte Berufsgruppen	Querschnittsthemen
Infrastruktur Planer*in / Projektierer*in	Regionale nachhaltige Funktionalität
Anlagenbauer*in / Netzbauer*in (Strom und Gas)	- Überregionale Zusammenhänge (Rolle des Wasserstoffes weltweit, Importbedingungen etc.)
Mitarbeitende in Verwaltungsorganen	- Fokus Bedarfsplanung und Bilanzierung
Elektrotechnik Ingenieur*in	- Wirtschaftlichkeit und Marktzusammenhänge
Ingenieur*in für Versorgungstechnik	Strom
Maschinenbau Ingenieur*in	- Projektierung (erneuerbare Energien, gekoppelt an Elektrolyseure inkl. Speichereinheit und Rückverstromung)
(Netz-)Meister*in	- Stromnetzkapazität
Berufsspezialist*in für Verteilernetztechnik	- Netzüberwachung
	Gas
	- Projektierung inkl. lokale Wasserstoffbedarfe
	- Netzberechnung (Transport- und Verteilnetz)
	- Gasspeicherkapazität
	Wasser
	- Wasserverfügbarkeit
	- Wassermanagement allgemein

Involvierte Berufsgruppen	Querschnittsthemen
	Kommunikationsinfrastruktur
	- Standortvoraussetzungen – Stichwort Smart Grid
	- Cybersicherheit
	Verwaltung
	- Rechtsrahmen
	- Genehmigungsvorgänge/Zulassungsvorgänge
	Weitere
	- Geologie
	- Geografie

Tabelle 7.7: Leitungsgebundene Infrastruktur [51]

Involvierte Berufsgruppen	Querschnittsthemen
Netzingenieur*in	Gas
Schweißfachingenieur*in	- Materialkunde
Anlagentechniker*in / Anlagenmechaniker*in für Rohrsystemtechnik	- Verbindungstechnik und Armaturentechnik
Netzmeister*in	- Verdichtertechnik, Verdichterstationen, Gasdruckregelung
Berufsspezialist*in für Verteilnetztechnik	- Netzberechnung
Rohrleitungsbauer*in	- Speicher
Schweißer*in	- Odorierung
Rohrnetzüberprüfungsunternehmen	- Netzanschluss
	- Schweißen
	Kommunikation
	- Überwachung/Sensorik (Lecküberwachung und Leckortung)
	- Mengenmessung, Eichung, Kalibrierung
	Weitere
	- Geologie
	- Geografie

7.1.2 Anwendung und Nutzung

Im Bereich der stationären Anwendungen, insbesondere Kraft-Wärme-Kopplung und Brennstoffzellen mit Wasserstoff, können die in Tabelle 7.8 aufgeführten Berufsgruppen mit den genannten Querschnittsthemen in Kontakt kommen. Die Studie von France Hydrogène verdeutlicht, dass es bei insgesamt 55 Berufsgruppen Berührungspunkte mit stationären Wasserstoffanwendungen gibt – insbesondere im Zusammenhang mit Kraft-Wärme-Kopplung und Brennstoffzellentechnologien [51].

Tabelle 7.8: Stationäre Anwendungen [51]

Involvierte Berufsgruppen	Querschnittsthemen
Anlagenbauer*in	Strom
Planer*in	- Netzanschlussbedingungen
Bauingenieur*in	- Projektierung/Auslegung (Strom- und Wärmebedarf)
Installateur*in	- Stromerzeugungsanlagen, insbesondere erneuerbare Energieanlagen (Fokus Strombezug und -verfügbarkeit)
Anlagenbetreiber*in	Gas
Rohrleitungsbauer	- Netzanschluss Gasnetz (Gasdruckregelung, Gasströmungswächter, Odorierung); Hausinstallationen, Gas- bzw. Wasserstoffgerätetechnik; industrielle Wasserstoffleitungen
	- Materialkunde
	- Transporttechnologien allgemein (Anlieferung von H ₂)
	- Aufwände (Transportaufwand, Energiebedarf)
	- Gasqualität
	Wirtschaftlichkeit
	- Wasserstoffhandel
	- Strommärkte/Energiemärkte allgemein
	- Rechtliche Rahmenbedingungen

Das DLR-Institut für Luftverkehr prognostiziert, dass ab dem nächsten Jahrzehnt erste Kurzstreckenflüge mit Wasserstoffantrieb möglich sein könnten. Bis 2050 könnten in Hamburg 60 % der Abflüge mit Wasserstoffflugzeugen erfolgen, was einen jährlichen Bedarf von 60.000 Tonnen Wasserstoff und eine deutliche Reduktion der CO₂-Emissionen bedeuten würde. Bis etwa 2040 wird Wasserstoff in geringen Mengen per Tankfahrzeug geliefert, während ab 2050 ein Pipeline-Anschluss erforderlich wäre, um den steigenden Bedarf zu decken und den Transport von etwa 40 Lkw pro Tag zu vermeiden [54].

Da Flugzeuge langfristig auf flüssigen Wasserstoff angewiesen sein werden, wäre der Bau einer Verflüssigungsanlage erforderlich, die jedoch sowohl erhebliche Investitionen als auch qualifizierte Fachkräfte erfordert.

7.2 Fachkräfte in der Wasserstoffwirtschaft: Aktueller Bestand, Zukünftiger Bedarf und Wirtschaftliche Effekte

Laut dem Impulspapier des Verbands der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik (VDE) und DVGW waren im Jahr 2020 mehr als 1,5 Millionen Beschäftigte in den Mitgliedsunternehmen des Deutschen Wasserstoff-Verband (DWV) tätig. Die Prognose des DWV aus dem Jahr 2018 geht davon aus, dass bis **2030 weitere 70.000 Arbeitsplätze** in der **Wasserstoffbranche** entstehen könnten. Die Publikation des Instituts für Arbeitsmarkt- und Berufsforschung (IAB) der Bundesagentur für Arbeit aus dem Jahr 2021 betont jedoch, dass der Arbeitsmarkt der Wasserstoffbranche noch nicht ausreichend erfasst ist. Bereits heute werden Stellen in mit Wasserstoffbezug verschiedenen Berufsfeldern wie Forschung und Entwicklung, Maschinenbau- und Betriebstechnik, Elektrotechnik, Chemie, Energietechnik, Einkauf und Vertrieb sowie Unternehmensstrategieentwicklung ausgeschrieben [55].

In [56] wurde eine Untersuchung durchgeführt, um den zukünftigen Arbeitskräftebedarf für zwei verschiedene Szenarien von 2025 bis 2040 abzuschätzen. Das Referenzszenario bietet

einen Einblick in die voraussichtliche Entwicklung des deutschen Arbeitsmarktes bis 2040. Es zeigt erhebliche Verwerfungen auf, die durch Engpässe gekennzeichnet sind, die durch Ressourcenknappheit aufgrund der COVID-19-Pandemie und des Konflikts in der Ukraine verschärft werden und zu Preiserhöhungen führen. Ein Mangel an Fachkräften hemmt das langfristige Beschäftigungswachstum, und drohende Engpässe sind vor allem im Baugewerbe sowie in den Bereichen Gesundheitswesen, IT und Technik zu erwarten. Trotz des beschleunigten Ausbaus erneuerbarer Energien bleibt es eine Herausforderung, die Klimaziele im vorgegebenen Zeitrahmen zu erreichen. Im Referenzszenario ist kein Übergang zu einer grünen Wasserstoffwirtschaft vorgesehen. Dieses Szenario berücksichtigt keine Ziele der Nationalen Wasserstoffstrategie, wie die ausreichende Verfügbarkeit von Wasserstoff, den Aufbau einer H₂-Infrastruktur, die Etablierung von H₂-Anwendungen und die Schaffung guter Rahmenbedingungen.

Im Gegensatz dazu untersucht das alternative Szenario verschiedene Entwicklungen. Dabei werden auch Investitionsanforderungen, Kostenfolgen struktureller Veränderungen, Verschiebungen in internationalen Handelsströmen und Technologieanforderungen berücksichtigt. Mithilfe einer detaillierten Branchenmodellierung auf der Grundlage von Input-Output-Berechnungen des Statistischen Bundesamtes wird eine differenzierte Darstellung über 63 Wirtschaftszweige, 144 Berufe und vier Qualifikationsniveaus ermöglicht. Dies erlaubt eine umfassende Darstellung von Veränderungen in Produktionsmethoden, Berufsstrukturen und Qualifikationsanforderungen auf Branchenebene [56]. So wird auch der Aufbau der Wasserstoffwirtschaft beschrieben und die Fachkräftelücke abgeleitet (siehe Abbildung 7.2). In den Jahren 2025 und 2030 werden sich Fachkräftelücken von etwa 13.000 bzw. 12.000 Personen beobachten lassen. Es wird deutlich, dass ab 2035 eine signifikante Zunahme des Fachkräftebedarfs und somit die Ausbildung einer Fachkräftelücke zu erkennen ist, und im Jahr 2040 erreicht die Fachkräftelücke mehr als 40.000 Personen [56].

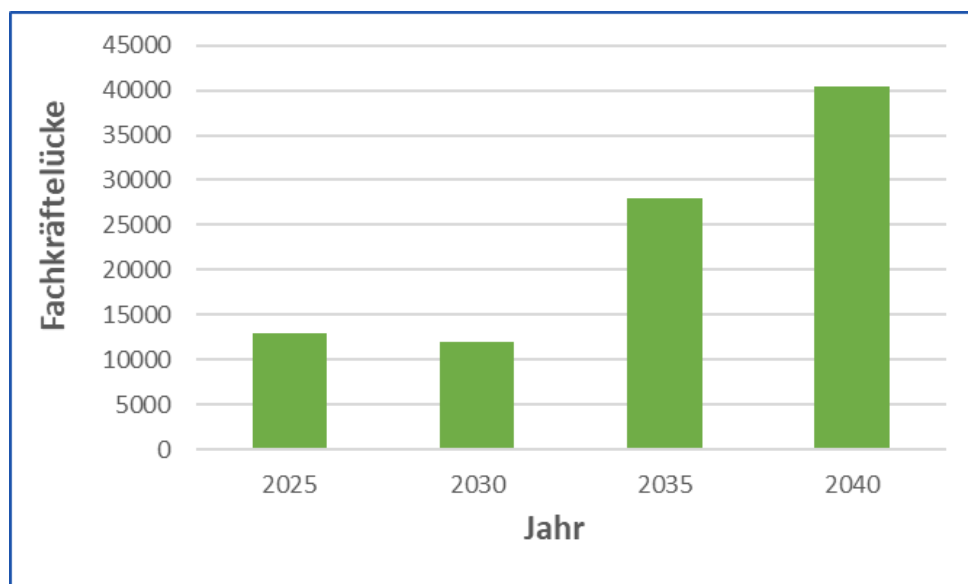


Abbildung 7.2: Fachkräftelücke in einer grünen Wasserstoffwirtschaft – eigene Anpassung basierend auf [56]

Die ökonomischen Effekte von grünem Wasserstoff lassen sich nach ihren direkten, indirekten oder induzierten Auswirkungen durch die Transformation klassifizieren. Hierbei werden nur Wirtschaftsbereiche berücksichtigt, deren Beschäftigtenzahlen vom Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft profitieren werden. Verluste in einzelnen Wirtschaftsbereichen sind minimal und gehören nicht zu den zehn Branchen mit den größten absoluten Abweichungen [56].

Die Effekte auf Branchenebene können in direkte, indirekte und induzierte Effekte unterteilt werden. Direkte Effekte sind unmittelbare Auswirkungen, die direkt aus den zugrunde liegenden Annahmen hervorgehen. Zum Beispiel führt die Annahme einer gesteigerten Exportmöglichkeit von Elektrolyseuren unmittelbar zu positiven Auswirkungen auf die exportorientierten Branchen Maschinenbau und Elektrotechnik. Indirekte Effekte sind Folgeeffekte, die durch die direkten Effekte bedingt sind. Beispielsweise führt der Bau eines Elektrolyseurs für den Export zur verstärkten Nachfrage nach Metallerzeugnissen oder Stahlrohren als Zuliefermaterial. Induzierte Effekte ergeben sich wiederum aus einer Kombination der direkten und indirekten Effekte [56]. Ein Anstieg der direkten und indirekten Nachfrage kann in der Folge zu einem erhöhten Bedarf an Fachkräften in diesen Bereichen führen.

In absoluten Zahlen wird vor allem das **Baugewerbe** und die **Technologiebranche** einen erhöhten Bedarf an Arbeitskräften verzeichnen. Dies ist hauptsächlich auf die zusätzlichen Bauinvestitionen in die Wasserstoffinfrastruktur und den verstärkten Ausbau der erneuerbaren Energien zurückzuführen. Der Anstieg im Bildungssektor resultiert unter anderem aus dem Bedarf an Weiterbildung zur Förderung des Aufbaus der Wasserstoffwirtschaft. Dies stellt einen positiven indirekten Effekt für die Wasserstoffwirtschaft dar [56].

Laut einer Studie, die vom Wasserstoff Kompass durchgeführt wurde, werden im Wasserstoff-Szenario bis **2030** am meisten Fachkräfte (Facharbeiter und Techniker) benötigt, gefolgt von Experten und Spezialisten im Bereich Ingenieurwesen und Wissenschaften (Mathematik, Informatik, Naturwissenschaften) [57].

Um die sichere Versorgung mit Wasserstoff für künftige industrielle und private Anwendungen zu gewährleisten, ist der Auf- und Umbau von Transport- und Verteilungsnetzen unerlässlich. Wie bereits in der Einleitung erwähnt, erfordert der Transport von Wasserstoff durch Pipelines jedoch erhebliche Investitionen, qualifizierte Arbeitskräfte und viel Zeit für die Umstellung von Erdgas auf Wasserstoff. Studien über die notwendigen Schritte für die Umstellung der Pipelines von Erdgas auf Wasserstoff sollen hier kurz erörtert werden.

7.2.1 Umstellung des Fernleitungsnetzes von Erdgas auf Wasserstoff

Im Rahmen der Diskussion über den Zeitaufwand und den Fachkräftebedarf im Zuge der flächendeckenden Umstellung von Erdgas- auf Wasserstoffinfrastruktur ist es unerlässlich, sowohl das Transport- als auch das Verteilnetz in den Blick zu nehmen. Da personelle und zeitliche Ressourcen auf beide Bereiche verteilt werden müssen, ergänzt der folgende Abschnitt die bisherige Betrachtung des Verteilnetzes um die Perspektive des Transportnetzes.

7.2.1.1 Planungs- und Genehmigungsverfahren für Wasserstoff-Neubauprojekte im Fernleitungsbereich

Laut Fernleitungsnetzbetreiber (FNB) müssen bis Ende 2032 insgesamt 9040 Kilometer Transportnetz vorbereitet werden. Davon entfallen etwa 5424 Kilometer auf umgestellte Erdgasleitungen, während die restlichen 3616 Kilometer aus neuen Leitungen bestehen [23].

Für Wasserstoff-Neubauprojekte wird in einem nächsten Schritt für die Genehmigung der Trasse ein Raumordnungsverfahren durchgeführt. Nach Angaben des Umweltbundesamtes dauert das eigentliche Raumordnungsverfahren in der Regel bis zu **9 Monate**. Allerdings kann die Vorbereitung der Antragsunterlagen für Raumordnungsverfahren bis zu **12 Monate** dauern. Einschließlich vorbereitender Machbarkeitsstudien und Raumwiderstandsanalysen ist eher von einem Zeitbedarf von **26 Monaten** auszugehen [58].

Insgesamt zieht sich die Umsetzung eines Leitungsneubaus damit nach der Aufnahme in den NEP sich ca. **6 Jahre** hin. Dies ist als ein Richtwert zu sehen, der durch politische Maßnahmen oder Bündelung von Verwaltungen gestrafft werden kann. Die Hauptschritte der Planungs- und Genehmigungsverfahren für Wasserstoff-Neubauprojekte sind in der Abbildung 7.3 entlang der Zeitachse dargestellt [58].

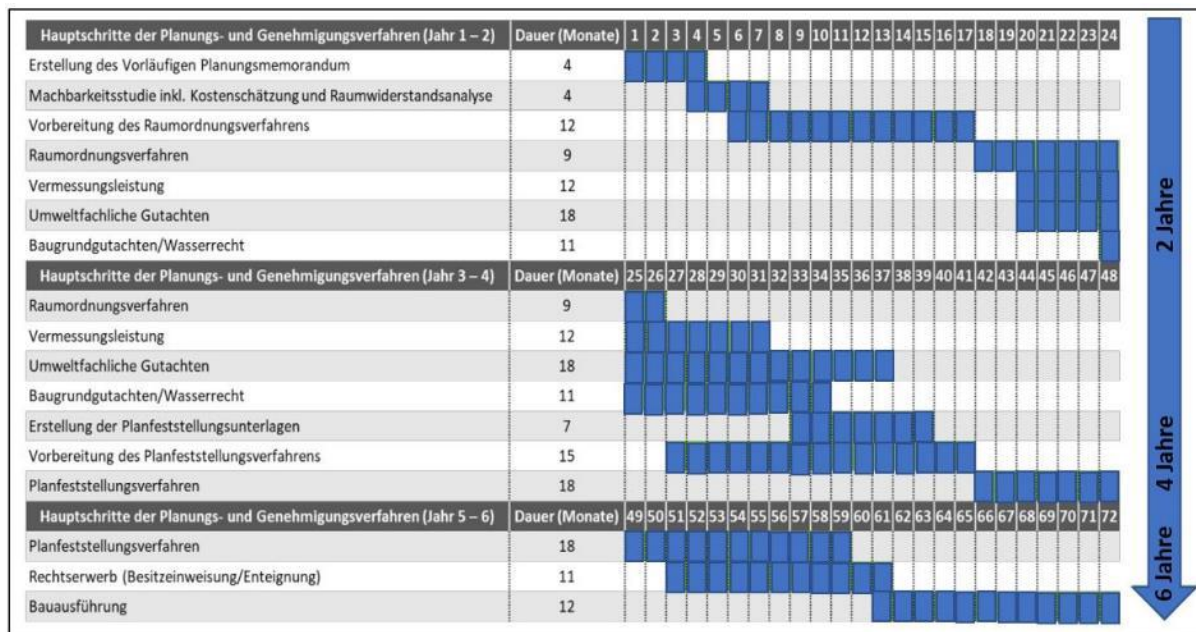


Abbildung 7.3: Planungs- und Genehmigungsverfahren für Wasserstoff-Neubauprojekte im Fernleitungsnetzbereich [58]

7.2.1.2 Planungs- und Genehmigungsverfahren für Wasserstoff-Umstellungsprojekte im Fernleitungsnetzbereich

Die Umstellung bereits vorhandener Gasversorgungsleitungen zum Zwecke des Wasserstofftransportes wird in der Fachöffentlichkeit als Alternative zum kostenintensiven Neubau reiner Wasserstoffleitungen als prioritär angesehen. Anhand §113c EnWG sollen die behördlichen Genehmigungen für die Errichtung und den Betrieb einer Erdgasleitung auch für den Transport von Wasserstoff gelten. Die Hauptschritte der Planungs- und Genehmigungsverfahren für Wasserstoff-Umstellungsprojekte im Fernleitungsnetzbereich sind in der Abbildung 7.4 entlang der Zeitachse dargestellt [58].



Abbildung 7.4: Planungs- und Genehmigungsverfahren für Wasserstoff-Umstellungsprojekte im Fernleitungsnetzbereich [58]

Bei der Umsetzung der Umstellung müssen ferner weitere Aspekte beachtet werden. Vor und nach der Umstellung auf Wasserstoff können potenzielle **Verunreinigungen** identifiziert werden. Im **Transportnetz** können verschiedene Kohlenwasserstoffe, Wasser, und Schwefelverbindungen vorhanden sein. Durch Undichtigkeiten könnten auch Sauerstoffspuren im Wasserstoff auftreten. Kohlenwasserstoffe beinhalten unter anderem Verdichteröle, Erdgaskondensate und Glykol. Daher müssen die Rohrleitungen vor der Umstellung von Erdgas auf Wasserstoff gereinigt werden. Darüber hinaus müssen bei der Umstellung von Erdgas auf Wasserstoff weitere Komponenten im **Transportnetz** wie **Verdichterstationen** und **Druckregelstationen** geändert werden [59].

Sowohl die Umrüstung bestehender Gaspipelines als auch der Bau neuer Wasserstofftransportnetze erfordern viel Personal und Fachwissen. Die Umstellung erfordert umfangreiche technische Bewertungen und behördliche Genehmigungen, während der Bau neuer Netze Machbarkeitsstudien, Umweltprüfungen und die Abstimmung mit den Behörden umfasst. In beiden Fällen ist eine große Zahl qualifizierter Fachleute erforderlich, um den erfolgreichen und rechtzeitigen Übergang zur Wasserstoffinfrastruktur zu gewährleisten.

7.2.2 Umstellung des Verteilnetzes von Erdgas auf Wasserstoff

Die Verteilung und der Anschluss eines Großteils von Kunden und Erzeugern erfolgt durch die Verteilnetze (siehe Abbildung 7.5). Die überwiegende Anzahl zukünftiger Wasserstoffkunden, -erzeuger und einige Speicher werden dementsprechend durch das Verteilnetz angeschlossen. Damit hat das Verteilnetz eine essenzielle Rolle mit Blick auf die Planungssicherheit der Kunden und den erfolgreichen Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft für alle Kunden [60].

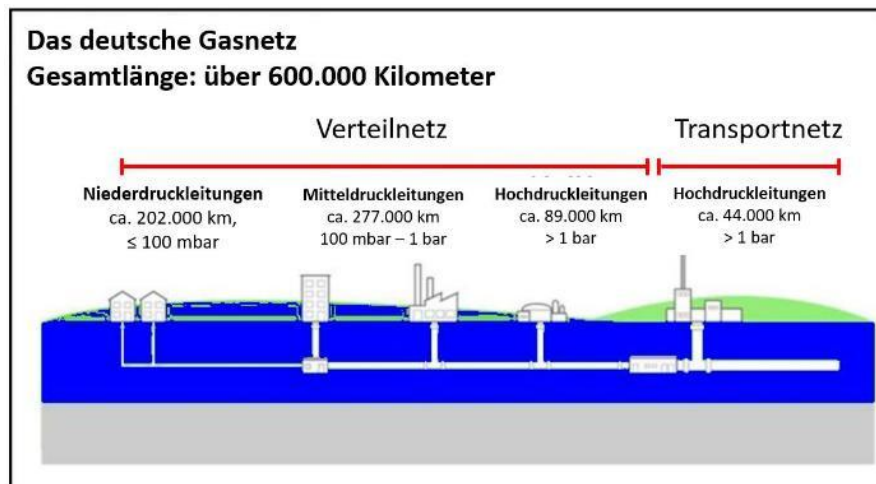


Abbildung 7.5: Die Gesamtlänge der deutschen Transport- und Verteilungsleitungen [60]

Es ist davon auszugehen, dass im ersten Schritt der Errichtung des Kernnetzes nur wenige Verteilernetzbetreiber (VNB) konkrete Leitungsabschnitte bereits umstellen werden. Für den Anschluss von Kunden an Leitungen, die nicht direkt mit dem Kernnetz verbunden sind, muss auch die Möglichkeit einer Anbindung an das Wasserstoffnetz geschaffen werden. Die Realisierung dieser konkreten Umstellprojekte wird für Kunden, die vergleichsweise nah am Kernnetz liegen, durch den VNB schneller zu realisieren sein, als die Umstellung eines Kunden, der weiter entfernt liegt und bei dem ggf. weitere Umstellbedarfe im Verteilnetz zu berücksichtigen sind [60]. Dies ist erforderlich, damit eine schnelle und durchgängig gemeinsame Entwicklung der Wasserstoffinfrastrukturen erfolgen kann.

7.2.3 Fachkräfteeinschätzung für den Umbau/Austausch von Geräten bei der Umstellung von Erdgas auf Wasserstoff im Haushalt

Die Umstellung der meisten Häuser auf Wasserstoff kann relativ einfach sein, sofern die gesetzlichen Möglichkeiten für den Einsatz von Wasserstoff im Wärmemarkt – wie sie etwa im Gebäudeenergiegesetz (GEG) und im Energiewirtschaftsgesetz (EnWG) vorgesehen sind – konsequent umgesetzt werden und das Vorbereiten des Gasnetzes korrekt entsprechend G 680 durchgeführt wurde [61].

In diesem Kapitel werden Schätzungen zum benötigten Fachkräfteaufwand für den Umstellung von Geräten von Erdgas auf Wasserstoff in deutschen Haushalten vorgestellt. Die richtige Einschätzung des Fachkräftemangels im Zuge der Umstellung von Erdgas auf Wasserstoff hängt von verschiedenen Parametern ab. Dabei spielen sowohl organisatorische und wirtschaftliche Faktoren als auch Aspekte wie akademische Ausbildung, Digitalisierung und die Zuwanderung qualifizierter Fachkräfte aus dem Ausland eine zentrale Rolle. Besonders entscheidend ist die Rolle der Ausbildung, da sie maßgeblich bestimmt, wie schnell und effektiv benötigte Kompetenzen aufgebaut werden können. Diese Einschätzung soll ein Bewusstsein für den erforderlichen Zeitaufwand schaffen und zur Sensibilisierung für die damit verbundenen Herausforderungen beitragen.

7.2.3.1 Gashausanschluss

Um die Haushalte an das Wasserstoffnetz anschließen zu können, sind Umstellarbeiten an den Hausanschlüssen notwendig. Nach Angaben des Bundesverbandes der Energie- und Wasserwirtschaft gibt es in Deutschland rund 19,5 Millionen Wohngebäude [62]. Davon verfügen 38,8 % über Gaszentralheizungen und 6,7 % über Gasetagenheizungen. Geht man von

einer durchschnittlichen Gebäudehöhe von 3, 5 und 7 Stockwerken für Gebäude mit Fußbodenheizung aus, so ergibt sich eine geschätzte Anzahl von Gasanschlüssen, die umgestellt werden müssen, von 11,6 Millionen bis 14,2 Millionen, möglicherweise sogar bis zu 16,8 Millionen. Laut Expertenmeinung beträgt die Zeit für die Umstellung (Außerbetriebnahme, Spülen (Inertisieren), Begasen/Wiederinbetriebnahme des Hausanschlusses durchschnittlich etwa 2 Stunden. Die Umstellung (Außerbetriebnahme, Spülen, Begasen/Wiederinbetriebnahme) der Leitungen im Gebäude nimmt ebenfalls etwa 2 Stunden pro Monteur in Anspruch. Das bedeutet, dass jede Gashaushaltsanschlussumstellung inklusive Leitung im Gebäude insgesamt circa 4 Stunden dauert. Auf der Grundlage der obigen Informationen ist es möglich, die Anzahl der Fachkräfte und den Zeitaufwand für die Umstellung von Gasanschlüssen und Gasinstallationsleitungen in Deutschland zu schätzen.

Abbildung 7.6 visualisiert diese Schätzungen unter Berücksichtigung verschiedener Heizungsarten und Gebäudeszenarien. Die Berechnung basiert auf einer Arbeitszeit von 8 Stunden pro Tag und 20 Arbeitstagen pro Monat.

Die Daten zeigen, dass es in Deutschland **etwa 7,57 Millionen Gas-Zentralheizungsanschlüsse** und **1,31 Millionen Gas-Einzelheizungsanschlüsse** gibt. Zudem wird angenommen, dass **50 % der Gaseinzelöfen** an das Gasnetz angeschlossen sind. Die Berechnungen zeigen eine inverse Beziehung zwischen der Anzahl der Monteure und der Dauer der Umstellung. Beispielsweise dauert die Umstellung von neuen Gasanschlüssen mit **1.000 Monteuren 290 Monate bei einer durchschnittlichen Gebäudehöhe von 3 Stockwerken, 355 Monate bei 5 Stockwerken und 421 Monate bei 7 Stockwerken**. Erhöht sich die Anzahl der Monteure auf **2.000**, reduziert sich die Dauer nahezu um die Hälfte auf **145, 178 bzw. 210 Monate** für die jeweiligen Szenarien. Bei einer maximalen Kapazität von **12.000 Monteuren** sinkt die benötigte Zeit auf **24, 30 bzw. 35 Monate**. Diese Entwicklung verdeutlicht den erheblichen Effizienzgewinn, der durch eine größere Belegschaft erzielt werden kann.

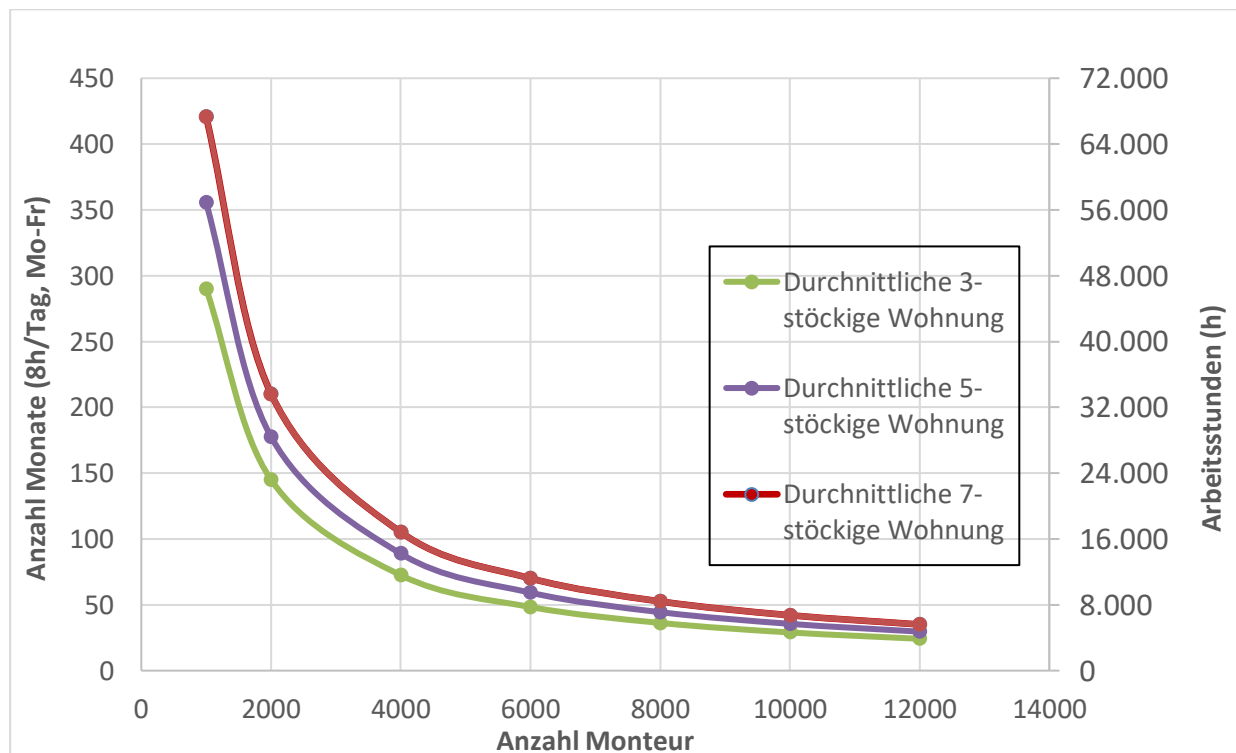


Abbildung 7.6: Geschätzter Zeitaufwand für die Umstellung von Gashaushaltsanschlüssen und Gasinstallationsleitungen im Vergleich zu Monteuren in Deutschland

Bei dieser Bewertung werden die Anfahrtszeit der Arbeitskräfte zum Arbeitsort der Gasheizung und die Reisezeit für den Wechsel von einem Haus zum anderen nicht berücksichtigt.

7.2.3.2 Gaszähler

Es gibt verschiedene Arten von Gaszählern mit unterschiedlichen Funktionen, z. B. Ultraschallzähler, Turbinenradgaszähler, Quantometer, Drehkolbenzähler, Balgengaszähler und andere. Die Balgengaszähler werden üblicherweise in Ein- und Zweifamilienhäuser bzw. in Anlagen bis Erdgas 637 kW (Wasserstoff 247 kW) eingesetzt. Im Rahmen des Projekts H2-Messrichtigkeit vom DVGW wurden diese auf H2-Eignung untersucht [58]. Aus den Anforderungen der G 655 ergibt sich, dass in Abhängigkeit von der Nennbelastung der Gasgeräte ggf. ein Austausch des Gaszählers erforderlich wird, um die Eichrechtlichen Vorgaben zur Volumenstrommessung einzuhalten.

Andere Beispiele sind die Ultraschallgaszähler, die für Gase mit Schallgeschwindigkeiten zwischen 300 m/s und 475 m/s ausgelegt werden. Wasserstoff hat eine Schallgeschwindigkeit von 1290 m/s. Außerdem wird der Wasserstoff-Volumenstrom etwa dreimal so hoch sein wie der derzeitige Erdgasbedarf. Dies bedeutet, dass diese Gaszähler bei der Umstellung von Erdgas auf Wasserstoff ausgetauscht werden müssen [61].

Die Schätzung in diesem Abschnitt erfolgt auf Grundlage eines Worst-Case-Szenarios für den Austausch des Gaszählers, bei dem die maximal erforderliche Zeit berücksichtigt wird. Im Durchschnitt dauert der Austausch eines Gaszählers gegen einen neuen etwa eine Stunde, wenn er von einem erfahrenen Techniker durchgeführt wird. Ein unerfahrener Techniker benötigt in der Regel etwa zwei Stunden [63].

Laut dem Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft gibt es in Deutschland etwa 19,5 Millionen Wohngebäude [62]. Davon verfügen 38,8 % über zentrale Gasheizsysteme und 6,7 % über Gas-Etagenheizsysteme. Unter der Annahme einer durchschnittlichen Gebäudehöhe von 3, 5 und 7 Etagen für Gebäude mit Etagenheizung können wir den geschätzten Bedarf an Wasserstoffzählern auf **11,6 Millionen** bis **14,2 Millionen** und sogar bis zu **16,8 Millionen** ermitteln.

Abbildung 7.7, Abbildung 7.8 und Abbildung 7.9 präsentieren eine Einschätzung des zeitlichen Aufwands im Verhältnis zur Anzahl der Arbeitskräfte für ganz Deutschland. Dabei basiert Abbildung 7.7 auf der Annahme von Gebäuden mit Etagenheizung und im Durchschnitt 3 Stockwerken (**11,6 Millionen Wasserstoffzählern**), Abbildung 7.8 auf der Annahme von 5 Stockwerken (**14,2 Millionen Wasserstoffzählern**) und Abbildung 7.9 auf der Annahme von 7 Stockwerken (**16,8 Millionen Wasserstoffzählern**). Die Berechnung basiert auf einer Arbeitszeit von 8 Stunden pro Tag und 20 Arbeitstagen pro Monat.

Laut Abbildung 7.7, hängt die benötigte Zeit für den Austausch der Gaszähler in Deutschland stark von der Anzahl der Monteure sowie von der durchschnittlichen Gebäudehöhe ab. Im Szenario mit 3 Stockwerken dauert der Austausch mit 1000 Monteuren für erfahrene Fachkräfte etwa 72,5 Monate, während unerfahrene Monteure 145 Monate benötigen. Erhöht sich die Monteuranzahl auf 12000, sinkt die benötigte Zeit auf etwa 6 Monate für erfahrene und 12 Monate für unerfahrene Monteure. Im 5-Stockwerke-Szenario (Abbildung 7.8) verlängert sich die benötigte Zeit aufgrund des höheren Gaszählerbedarfs. Hier dauert der Austausch bei 1000 Monteuren 89 Monate für erfahrene und 178 Monate für unerfahrene Monteure. Bei 12000 Monteuren reduziert sich die Zeit auf 7 bzw. 14 Monate. Das 7-Stockwerke-Szenario (Abbildung 7.9) erfordert die längste Zeit, da mehr Gaszähler pro Gebäude zu wechseln sind. Mit 1000 Monteuren beträgt die Dauer 105 Monate für erfahrene und 210 Monate für

unerfahrene Monteure. Steigt die Monteuranzahl auf 12000, sinkt der Zeitbedarf auf 9 bzw. 18 Monate. Insgesamt zeigt sich, dass mit zunehmender Gebäudehöhe die Austauschdauer erheblich ansteigt, während eine höhere Anzahl an Monteuren den Prozess deutlich beschleunigt. Erfahrene Monteure sind dabei stets doppelt so effizient wie unerfahrene, was insbesondere bei niedriger Monteuranzahl einen entscheidenden Einfluss hat.

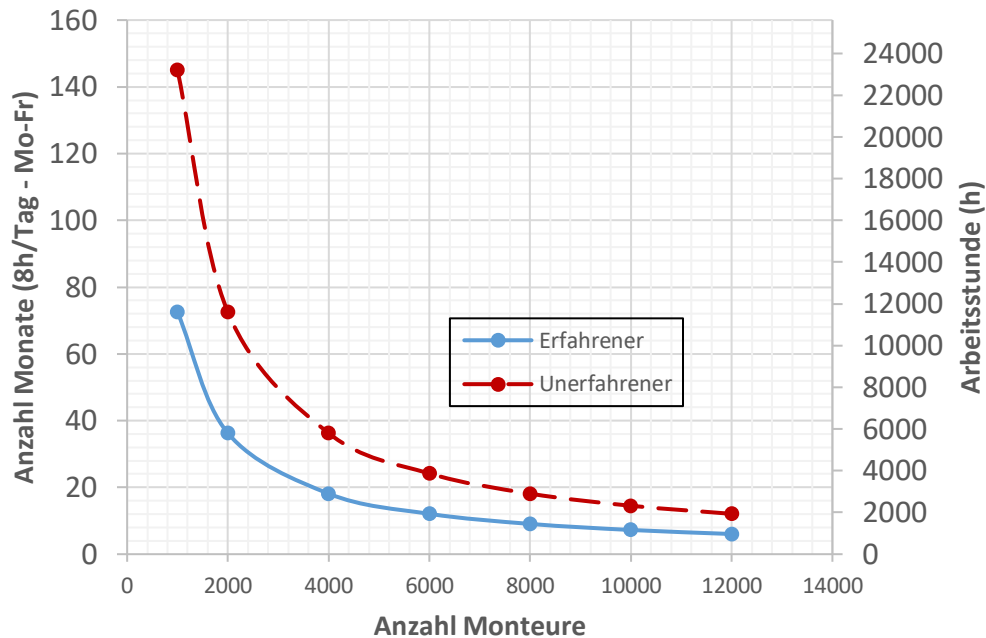


Abbildung 7.7: Schätzung der benötigten Zeit im Vergleich zu Monteur für ganz Deutschland (Etagenheizung mit Durchschnitt 3 Stockwerken)

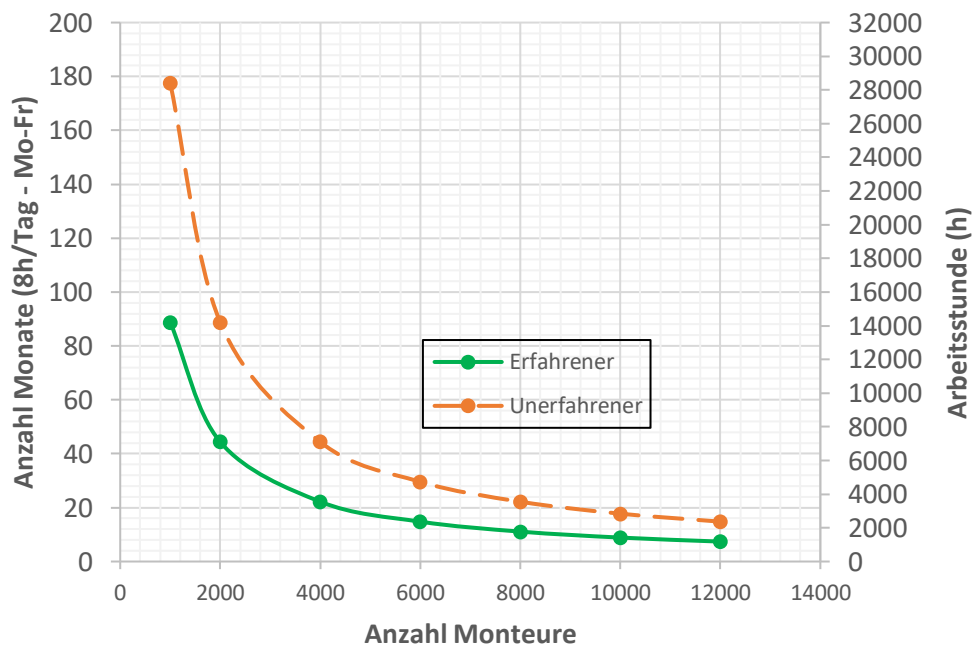


Abbildung 7.8: Schätzung der benötigten Zeit im Vergleich zu Monteur für ganz Deutschland (Etagenheizung mit Durchschnitt 5 Stockwerken)

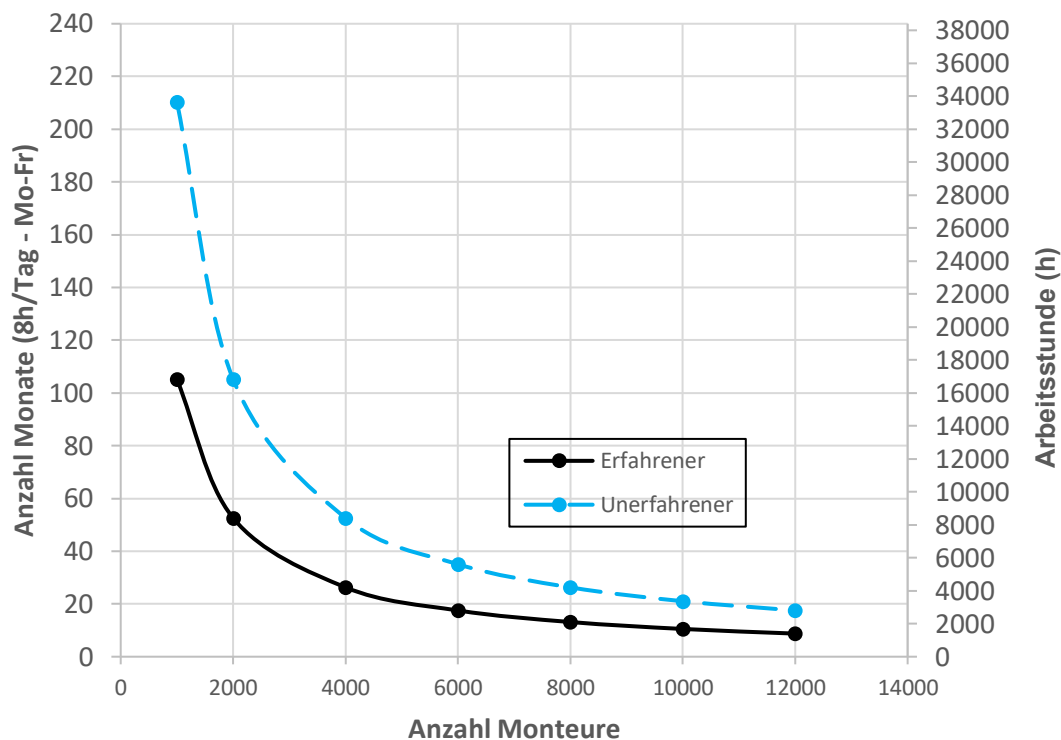


Abbildung 7.9: Schätzung der benötigten Zeit im Vergleich zu Monteur für ganz Deutschland (Etagenheizung mit Durchschnitt 7 Stockwerken)

Gemäß diesem Worst-Case-Szenario gibt es derzeit nur wenige Unternehmen, die Wasserstoffzähler entwickeln und herstellen. Sollten Wasserstoffzähler für ganz Deutschland in einer Menge von 11,6 bis 16,8 Millionen Stück geliefert werden, ist eine hohe Produktionskapazität notwendig, um den Bedarf zu erfüllen. Der Austausch von Zählern sollte im Zuge der Umstellung der Gasinstallationsleitung vorwiegend außerhalb der Heizperiode erfolgen. Der temporäre gesteigerte Bedarf an Monteuren führt zu temporären Stellen für Fachkräfte, was die Attraktivität dieser Branche für Arbeitnehmer mindert. Andererseits führt der Mangel an Fachkräften für den Austausch von Wasserstoffzählern zu längeren Umstellungszeiten und verzögert somit die Einführung von Wasserstoff als Energieträger.

Bei dieser Bewertung werden die Anfahrtszeit der Arbeitskräfte zum Austauschort der Gasheizung und die Reisezeit für den Austausch von einem Haus zum anderen nicht berücksichtigt.

7.2.3.3 Gasgeräte

In dieser Einschätzung wurde ausschließlich der zeitliche Aufwand für den Austausch der Gasgeräte betrachtet. Aspekte wie Eigentumsverhältnisse, logistische Rahmenbedingungen oder individuelle Kundenwünsche wurden nicht einbezogen. Ziel war es, eine überschlägige Einschätzung des reinen Gerätewechsels vorzunehmen. Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass bei bestimmten Gasfeuerungsanlagen auch die Abgasanlagen für den Betrieb mit Wasserstoff angepasst werden müssen. Gemäß Erhebungen des Schornsteinfegerhandwerk müssten mit Stand 2023 in Deutschland etwa **15,1 Millionen Gasgeräte** ausgetauscht werden. Anzumerken ist, dass zukünftig nicht wasserstofftaugliche im Regeltum durch wasserstofftaugliche Gasgeräte ausgetauscht werden und sich somit die Anzahl deutlich verringern wird. Der Großteil davon (**92 %**) besteht aus raumluftabhängigen und raumluftunabhängigen

Gasheizungen, sowohl mit als auch ohne Gebläse. Der verbleibende Anteil umfasst raumluftabhängige und raumluftunabhängige Gas-Warmwasserbereiter sowie Gas-Raumheizer [64]. Ein Techniker benötigt etwa **eine Stunde**, um einen Gas-Warmwasserbereiter oder einen Gas-Raumheizer auszutauschen. Für den Austausch von raumluftabhängigen und raumluftunabhängigen Gasheizungen werden hingegen zwei Techniker benötigt, die insgesamt **drei Stunden** dafür einplanen müssen [61]. Zwei Techniker sind erforderlich, da der Kessel zu schwer ist, um von einer einzelnen Person getragen zu werden.

Aus Abbildung 7.10 ist ersichtlich, dass die Erhöhung der Anzahl der Techniker die Übergangszeit des Austauschs der Gasgeräte von Erdgas auf Wasserstoff erheblich verkürzt. Laut dieser Schätzung würden etwa **12.000 Monteure** mehr als **5 Jahre im Worstcase** benötigen, um alle Gasgeräte in Deutschland von Erdgas auf Wasserstoff umzurüsten. Aufgrund der Heizperiode kann nicht das gesamte Jahr für den Austausch benutzt werden, daher wurde eine maximale Dauer von **8 Monaten pro Jahr** für die Berechnung berücksichtigt. Die Berechnung basiert auf einer Arbeitszeit von 8 Stunden pro Tag und 20 Arbeitstagen pro Monat.

In der vorliegenden Analyse wurde ein Worst-Case-Szenario angenommen, bei dem sämtliche bestehenden Gasgeräte durch wasserstofftaugliche Geräte ersetzt werden müssten. Diese Annahme dient dazu, den maximal möglichen Aufwand sowie den Ressourcenbedarf für eine flächendeckende Umstellung abzuschätzen. In der Realität ist jedoch davon auszugehen, dass nicht alle Gerätetypen durch H₂-geeignete Systeme ersetzt werden können oder sollen. Vielmehr ist in vielen Fällen mit einem Technologiewechsel hin zu alternativen Wärmeerzeugern – wie etwa elektrischen Wärmepumpen – zu rechnen.

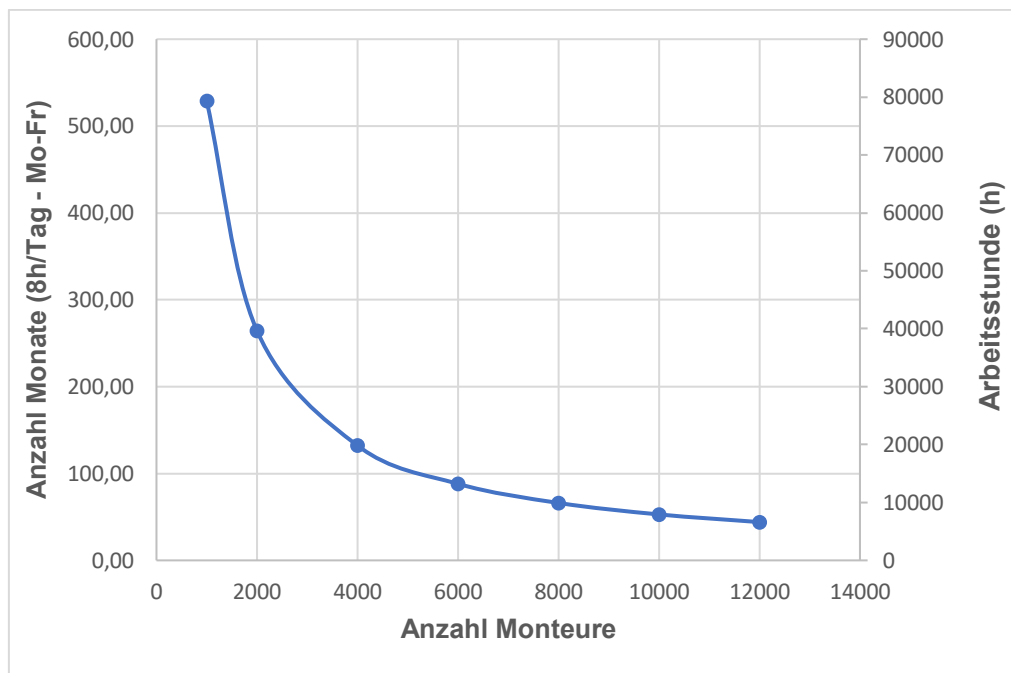


Abbildung 7.10: Schätzung der durchschnittlichen Zeit, die in Deutschland für den Austausch von Gasfeuerungsanlagen zur Umstellung von Erdgas auf Wasserstoff benötigt wird

Bei dieser Bewertung werden die Anfahrtszeit der Arbeitskräfte zum Austauschort der Gasheizung und die Reisezeit für den Austausch von einem Haus zum anderen nicht berücksichtigt.

Natürlich führt der Fachkräftemangel zu Verzögerungen bei der Umsetzung. Andererseits würde eine schnelle Umsetzung bedeuten, dass die Monteurstellen aufgrund des temporären

Effekts weniger attraktiv wären. Der temporäre Effekt tritt auf, weil nach der Umstellung auf Wasserstoff weniger Monteure in diesem Umfang benötigt werden (was zu Stellenabbau führen könnte).

7.3 Auswirkungen der Massenproduktion von Umrechnungsgeräten wie Wasserstoffzählern und Kesseln auf den Fachkräftemangel

Falls alle bestehenden Gasgeräte entweder durch wasserstofftaugliche Geräte ersetzt oder im Zuge eines Technologiewechsels durch alternative Wärmeerzeuger wie elektrische Wärmepumpen ersetzt werden, wäre angesichts des bestehenden Fachkräftemangels mit erheblichen Herausforderungen zu rechnen. Sowohl die Produktion als auch die Installation einer großen Anzahl an Wasserstoffzählern, -kesseln oder anderen Wärmeerzeugungstechnologien würde eine erhebliche Zahl qualifizierter Fachkräfte erfordern. Dieser Engpass könnte sich spürbar auf weitere Bereiche der Energiewende auswirken – etwa auf den Ausbau der Transport- und Verteilnetze sowie auf die Umrüstung bestehender Infrastrukturen. Da in diesen Bereichen bereits heute ein Fachkräftemangel besteht, würde eine flächendeckende Umsetzung zusätzlicher Technologien die Situation weiter verschärfen.

7.4 Schulungs- und Weiterbildungsmöglichkeiten, um den Bedarf an Fachkräften im Bereich Wasserstoff zu decken

In diesem Kapitel werden Schulungs- und Weiterbildungsmöglichkeiten sowie die Qualifizierungsanforderungen im akademischen und außerakademischen Bildungskontext sowie aus Sicht der Experten unterteilt und erläutert.

7.4.1 Wasserstofftechnologien im akademischen Bildungskontext

Für die strukturierte Analyse und Zusammenfassung der Bildungsangebote sowie für eine vergleichbare Auswertung der inhaltlichen Ausrichtung wurde die Methode der Quantitativen Inhaltsanalyse nach FRÜH (2001) angewendet. Dabei wurden formale und inhaltliche Kategorien verwendet. Formale Kategorien umfassen feststehende Variablen wie Ansprechperson, Kontaktdaten, Institution, Name des Angebots, Bundesland, Ort, Kosten, Dauer und Praxisbezug. Die inhaltlichen Kategorien sind direkt mit den Untersuchungsfragen verbunden und spiegeln die Schwerpunkte entlang der Wasserstoffwertschöpfungskette wider. Da die Wasserstoffindustrie ganzheitlich betrachtet werden muss und eine Einzelbetrachtung bestimmter Industriezweige und Anwendungsfelder im Hinblick auf die Sektorenkopplung nicht zielführend ist, wurden die Anwendungen in der Interpretation der Daten als ein Bereich zusammengefasst. Somit ergeben sich sechs thematische Unterkategorien: Erzeugung, Speicherung, Transport, Anwendung, Sicherheit und Management. Studiengänge werden getrennt von beruflichen Weiterbildungsangeboten betrachtet. In der Darstellung der Studiengänge wird die thematische Kategorie der Berufsbereiche aufgeführt. Diese Berufsgruppen oder Berufsbereiche wurden innerhalb der Inhalte des Studiengangs erwähnt oder waren sogar in der Bezeichnung des Studiengangs impliziert. Dabei ergaben sich folgende Einordnungen:

- Energietechnik → Die Fachgebiete der Informationstechnik, der Mess-, Regelungs- und Automatisierungstechnik sowie der Automatisierung sind inbegriffen
- Chemietechnik
- Elektrotechnik
- Gebäudetechnik

- Maschinenbau → Die Fachgebiete der Betriebs- und Fahrzeugtechnik sind impliziert
- Umwelttechnik
- Verfahrenstechnik → Impliziert das Fachgebiet der Prozesstechnik
- Sicherheitstechnik
- Wirtschaftswissenschaft

Eine Möglichkeit besteht darin, die Lehrpläne der genannten Studiengänge an Universitäten oder Hochschulen um die Inhalte der Wasserstofftechnologie zu ergänzen [50].

7.4.2 Wasserstofftechnologien im außerakademischen Bildungskontext

Das berufliche Weiterbildungsangebot mit Fokus auf Wasserstoff befindet sich in einem kontinuierlichen Wachstum, und die regionalen Ausrichtungen dieser Angebote werden fortlaufend erweitert. Die in dem Kategoriensystem aufgeführten Rechercheergebnisse repräsentieren den zum Zeitpunkt der Erhebung ermittelten Ist-Zustand aller deutschlandweiten Online-Weiterbildungsangebote sowie der Vor-Ort-Angebote in den neuen Bundesländern [50]. Ein bereits etabliertes Beispiel ist das Weiterbildungsangebot des DVGW im Bereich Wasserstoff, das über die DVGW zur beruflichen Bildung zugänglich ist. Die Bildungsangebote sollten verschiedene Schwerpunkte im Bereich Wasserstoff abdecken, einschließlich:

- Erzeugung
- Speicherung
- Transport
- Anwendung
- Sicherheit
- Management

7.4.3 Qualifizierungsanforderungen aus Sicht der Experten

Kleine und mittlere Unternehmen bevorzugen zunächst bereits treffend ausgebildetes Personal und schulen nur bei Bedarf im Rahmen von Weiterbildungen nach. Modulare Weiterbildungen werden besonders von Kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) den dualen Studiengängen vorgezogen. Es ist zu berücksichtigen, dass Betriebe aufgrund der geringen Anzahl an Fachkräften oft wenig Kapazitäten haben, um sie langwierig zu schulen. Daher bevorzugen sie Bildungsformate mit einem kurzen Umfang.

Neben den Unternehmen, die Wasserstofftechnologien bereitstellen und anwenden, müssen auch die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der Zulassungs- und Aufsichtsbehörden für die neuen Gegebenheiten geschult werden. Ein anerkannter Regelsetzer, dessen Formate ebenfalls in der Übersicht der Weiterbildungsangebote auftauchen, setzt den Fokus auf Normierungsfragen. Auch in diesem Zusammenhang ist eine koordinierte Zusammenarbeit zwischen Behörden und Bildungseinrichtungen erforderlich, um international agieren zu können, insbesondere im Hinblick auf mögliche Importe und Kooperationen [50].

Die Zielgruppen der Weiterbildungen reichten von strategischen Entscheidungsträgern, die sich einen Überblick über das Thema Wasserstoff und Sektorenkopplung verschaffen wollen, über Mitarbeiter, die mit Wasserstoffanlagen umgehen, bis hin zu technischen Fachkräften und Ingenieuren. Diese Vielfalt der Zielgruppen ergab sich auch aus der differenzierten Ausgestaltung der Weiterbildungsformate.

Ein Format einer Forschungseinrichtung konzentrierte sich intensiv auf die Wasserstoffsysteme Brennstoffzelle und Elektrolyseur und richtete sich somit an Fach- und Führungskräfte aus den Bereichen Projektierung, Produktionsplanung, Forschung und Entwicklung. Es kombinierte Grundkenntnisse über Wasserstoffsysteme mit umfassendem Wissen über Produktionstechnologien und wirtschaftliche Potenziale, um einen Transfer in die industrielle Anwendung zu fördern.

Wie bereits bei der Analyse der Wertschöpfungskette und der Betrachtung der Weiterbildungen hervorgehoben wurde, birgt der Umgang mit Wasserstoff spezifische Gefahren und Risiken, was auch von den technischen Prüfvereinen und ähnlichen Organisationen wie dem DVGW hervorgehoben wird. Fachkräfte müssen daher entsprechend dieser sicherheitsspezifischen Aspekte qualifiziert und geschult werden. Die detaillierte Untersuchung des Qualifizierungsangebots verdeutlicht, dass sowohl die akademischen als auch schulischen Angebote in Bezug auf Themenschwerpunkte, Intensität und insbesondere bei den beruflichen Weiterbildungen sehr unterschiedlich sind. Es wurde bereits festgestellt, dass eine grundlegende Ausbildung in technisch etablierten Lehrbereichen das Fundament für eine Spezialisierung im Bereich Wasserstofftechnologie bilden sollte.

Grundständige Studiengänge sowie Ausbildungsberufe, die zukünftig, wenn auch nur teilweise, Wasserstoffthemen integrieren, sollten durch spezifische, thematisch angepasste und modular anwählbare Inhalte die Möglichkeit zur Zusatzqualifikation bieten. Der Qualifikationsbaustein "Wasserstoff" kann somit als Ergänzung zum grundständigen Wissen dienen [50].

7.4.4 Allgemeine Empfehlungen an Bildungseinrichtungen (Hochschulen, Schulen und Weiterbildungseinrichtungen)

Die Querschnittsthemen innerhalb der Wasserstoffwertschöpfungskette sind vielfältig und in den einzelnen Bereichen präsent. In einigen Bereichen sind diese Schnittstellen bereits bekannt, wobei häufig lediglich die Erdgas-Komponente durch Wasserstoff ersetzt wird. Das erfordert ein fundiertes Verständnis der chemisch-physikalischen Eigenschaften von Wasserstoff. Einige Berufsgruppen erweitern daher ihren Fachbereich um zusätzliche Aspekte wie Wasserverfügbarkeit und umfassende Rahmenbedingungen der Systemintegration. Dies betrifft insbesondere Planer, Projektentwickler und Netztechniker. In anderen Berufsgruppen werden Technologien sukzessive ersetzt oder erweitert, wie beispielsweise im Bereich der Mobilität.

Andere Berufsgruppen entlang der Wertschöpfungskette erkennen den Bedarf an Weiterbildung möglicherweise erst zu einem späteren Zeitpunkt. Dies gilt beispielsweise für den Bereich stationärer Brennstoffzellen und die entsprechende Berufsgruppe der Installateure, da ihre Tätigkeiten von den Entscheidungen der Endkunden abhängen, welche wiederum von der Verfügbarkeit der Versorgungsinfrastruktur beeinflusst werden. Daher warten Installateure möglicherweise vorerst auf die Marktentwicklung, bedingt durch die derzeitige begrenzte Nachfrage nach Brennstoffzelleninstallationen. Dennoch behandeln Schulungen wie die "Technischen Regeln für Gasinstallationen" (TRGI-Schulung) bereits den Aspekt der "H₂-

Readiness". Dies geschieht vor dem Hintergrund, dass eine Vorbereitung auf Wasserstoff in Haushalten nunmehr relevant wird.

Die Beschreibung verdeutlicht, dass der unmittelbare Bedarf an Weiterbildung und Umschulung innerhalb einzelner Berufsgruppen und Branchen stark variieren kann. Zusätzlich benötigen auch Personen mit fachfremden Hintergründen spezifische Fertigkeiten, um Quereinstiege erfolgreich zu bewältigen. Umschulungen oder "Transition Trainings" sollten daher maßgeschneiderte Inhalte vermitteln, die den individuellen Anforderungen entsprechen. Derzeit gibt es ein breites Angebot an Weiterbildungs- oder Zusatzqualifikationsmöglichkeiten, um notwendige Fähigkeiten "on the Job" zu erwerben. Dabei ist es wichtig, genau zu prüfen, welche Schulungen zu welchem Bereich passen. Im besten Fall sind diese Schulungen sogar auf die spezifischen Bedürfnisse der Unternehmen zugeschnitten [51].

DVGW und VDE plädieren für die Entwicklung standardisierter Qualifikationszertifikate, die den Standard der Schulungen vergleichbar machen und das notwendige Wissen der Regelwerke beinhalten. Auch die Studie von IHK und HKW Lüneburg [65] schlussfolgert: „Kurse sollten möglichst mit einem Zertifikat abschließen, welches die Teilnehmenden zu bestimmten Aufgaben berechtigt. Allgemein werden konkrete Qualifikationsanforderungen seitens der Regelwerkssetzung an Mitarbeitende beim Umgang mit Wasserstoff gewünscht.“

Im Ausbildungsbereich ist es effektiver, keine neuen Ausbildungsgänge zu entwickeln, sondern bestehende Ausbildungen zu erweitern. In diesem Zusammenhang haben Berufsschulen, Handwerkskammern und Industrie- und Handelskammern bereits erste Versuche unternommen, Aufbaumodule einzuführen.

In Südthüringen wurde beispielsweise ein Grundlagenmodul entwickelt, das sich an Auszubildende in technischen Berufen richtet, wie etwa Mechatroniker und Elektroniker. Als ergänzende Säule zur etablierten dualen beruflichen Ausbildung sind Mechanismen erforderlich, die auch informell erworbene Fähigkeiten und Kenntnisse anerkennen und so einen Quereinstieg sowohl für fachfremde als auch für un- und angelernte Erwerbstätige ermöglichen.

Für Personen ohne formale Ausbildung werden Modelle für eine "kleine Berufsqualifikation" entwickelt, die einerseits den Einstieg in entsprechende Tätigkeitsfelder ermöglichen und andererseits eine Weiterqualifizierung hin zum regulären Abschluss einer dualen Ausbildung ermöglichen [51].

Viele Querschnittsthemen können auch durch die modulare und interdisziplinäre Erweiterung bestehender Studiengänge um Wasserstoff abgedeckt werden. Nach dem derzeitigen Stand des Wissens scheint es auch in diesem Zusammenhang nicht sinnvoll zu sein, explizit neue technische Studiengänge ausschließlich für Wasserstoff zu entwickeln [50].

Das DVGW-Angebot zu entsprechenden Schulungen ist unter [DVGW Website Berufliche Bildung: Wasserstoff](#) zu finden.

7.5 Lösungsansätze für den Fachkräftemangel in der grünen Wasserstoffwirtschaft und bei der Umstellung von Erdgas auf Wasserstoff

1. **Unterstützung der Ausbildungsreife und Berufseintritt für alle Jugendlichen:** Möglichst allen Jugendlichen zur Ausbildungsreife nach der Schule zu verhelfen und sie ins Berufsleben eintreten zu lassen [66].
2. **Verringerung des Anteils der Schulabgänger ohne Abschluss:** Zwischen 2009 und 2013 wurde der Anteil der Schulabgänger ohne Abschluss in Deutschland bereits um

ein Fünftel auf 5,7 Prozent gesenkt. Eine weitere Reduktion um 20 bis 40 Prozent bis zum Jahr 2030 hätte zur Folge, dass zusätzlich etwa 75.000 bis 150.000 junge Menschen einen Schulabschluss erwerben und somit zu Fachkräften ausgebildet werden könnten [66].

3. **Ausbildungsabbrüche reduzieren:** Jeder vierte neu abgeschlossene Ausbildungsvertrag wird vorzeitig beendet. Zwischen 2009 und 2014 ist dieser Anteil um mehr als ein Zehntel gestiegen. Durch eine Umkehrung dieses Trends und eine Reduzierung der aktuellen Abbruchquote um zehn bis 20 Prozent könnten bis zum Jahr 2030 etwa 70.000 bis 140.000 zusätzliche Fachkräfte gewonnen werden [66].
4. **Studienabbrüche reduzieren:** Fast 30 Prozent der Bachelorstudierenden in Deutschland brechen ihr Studium vorzeitig ab. Und seit 2009 ist die Abbruchquote unverändert geblieben. Eine Reduzierung der Abbrüche um zehn bis 20 Prozent könnte bis zum Jahr 2030 etwa 80.000 bis 160.000 zusätzliche Fachkräfte hervorbringen [66].
5. **Erwerbsbeteiligung und Arbeitszeitvolumen von Frauen erhöhen:** In den letzten Jahren ist die Erwerbstätigenquote der Frauen in Deutschland um mehr als vier Prozentpunkte auf 70 Prozent gestiegen. Wenn Deutschland bis 2030 das Niveau des EU-Spitzenreiters Schweden erreichen würde, könnten zusätzliche 510.000 Fachkräfte gewonnen werden. Selbst eine Halbierung des Abstands zu Schweden würde immer noch dazu führen, dass etwa 255.000 Fachkräfte gewonnen werden könnten. Außerdem besteht Potenzial zur Erhöhung der Wochenarbeitszeit teilzeitbeschäftigter Frauen. Mit durchschnittlich gut 19 Wochenstunden liegt Deutschland hier deutlich hinter dem EU-Spitzenwert von fast 24 Wochenstunden zurück. Eine vollständige Angleichung würde etwa 890.000 zusätzlichen Vollzeitäquivalenten entsprechen. Selbst bei einer Halbierung des Abstands bliebe ein Potenzial von rund 445.000 Fachkräften [66].
6. **Einwanderung von Fachkräften steuern:** Die Prognose zu Migrationsbewegungen gestaltet sich angesichts der jüngsten Entwicklungen bei den Flüchtlingszahlen als äußerst herausfordernd. Dennoch wird erwartet, dass der Wanderungssaldo bis zum Jahr 2030 voraussichtlich nicht auf dem derzeitigen hohen Niveau bleiben wird. Unter der Annahme, dass sich die Einwanderung bis 2030 mindestens auf einem ähnlichen Niveau wie im Durchschnitt der Jahre 2006 bis 2014 bewegt, könnte mit einer Nettomigration von etwa 200.000 Personen pro Jahr gerechnet werden. Dadurch könnte bis 2030 ein Zugewinn von etwa 900.000 Fachkräften möglich sein, wobei nicht alle Einwanderer über eine formelle Fachausbildung verfügen.
7. Das berechnete Potenzial könnte sich möglicherweise noch erhöhen, insbesondere angesichts der Unsicherheiten bezüglich der zukünftigen Entwicklung der Migration von Flüchtlingen. Eine genauere Prognose ist jedoch aufgrund der aktuellen Datenlage nicht möglich. Sollte die durchschnittliche jährliche Nettomigration bis 2030 jedoch signifikant zurückgehen, beispielsweise auf die Hälfte des historischen Werts im Zeitraum zwischen 2006 und 2014 (100.000 Personen pro Jahr), könnten bis zum Jahr 2030 etwa 450.000 Fachkräfte hinzukommen [66].
8. **Darstellung der Perspektiven und Attraktivität von Arbeitsplätzen im Wasserstoffsektor:** Eine Methode, um Schüler für eine Ausbildung in der Wasserstofftechnologie zu gewinnen, besteht darin, die ökologischen Vorteile von Wasserstoff hervorzuheben und die schädlichen Auswirkungen von CO₂-Emissionen und fossilen Brennstoffen auf den Planeten in Schulkursen und Medien aufzuzeigen. Darüber hinaus ist

es von entscheidender Bedeutung, künftige Beschäftigungsmöglichkeiten aufzuzeigen und zu betonen, dass die Wasserstoffwirtschaft vielversprechende Entwicklungen durchläuft, die zu einer hohen Nachfrage, Stabilität und ausgezeichneten Karriereaussichten für Arbeitnehmer führen.

9. **Digitalisierung:** Die Digitalisierung kann eine entscheidende Rolle bei der Bekämpfung des Fachkräftemangels spielen. Durch die Optimierung von Rekrutierungs- und Onboarding-Prozessen rationalisieren digitale Tools administrative Aufgaben und erleichtern die Suche und Integration neuer Talente. Die Automatisierung trägt auch dazu bei, den Bedarf an manueller Arbeit zu reduzieren, sodass sich Fachkräfte auf strategischere Aufgaben konzentrieren können. Darüber hinaus ermöglichen digitale Arbeitsplätze flexible Arbeitsorte, wodurch die Pendelzeit minimiert wird und die Mitarbeiter effektiv arbeiten können. Darüber hinaus bieten Lernplattformen schnellere Lernmöglichkeiten, was die Arbeitseffizienz steigert und den Mitarbeitern hilft, jeden Tag mehr Aufgaben zu erledigen [67].
10. **Attraktive Vergütung:** Um Fachkräfte zu gewinnen und zu halten, ist eine wettbewerbsfähige Bezahlung wichtig. Sie sollte nicht nur das Grundgehalt, sondern auch Zusatzleistungen wie Boni, Benefits und flexible Arbeitsmodelle umfassen. Laut der Arbeitsagentur verdienen Fachkräfte im Energiesektor derzeit durchschnittlich viel weniger als Experten in diesem Bereich. Die Arbeitskraftanalyse von 2023 zeigt jedoch, dass die Nachfrage nach Fachkräften in Energiesektor deutlich höher war als nach Experten mit langem Studium in Deutschland [68]. Eine gerechte Bezahlung könnte viele Jugendliche motivieren, statt eines langen Studiums eine Fachkräfteausbildung zu absolvieren und schnell auf den freien Markt zu kommen, um so den Fachkräftemangel zu mildern.
11. **Effizienter Einsatz von Personalressourcen:** Eine bessere Planung und Verwaltung der Personalressourcen kann dazu beitragen, den Fachkräftemangel zu verringern.

7.6 Fazit

Fachkräftemangel im Bereich Wasserstoff erstreckt sich über viele Bereiche und Berufsgruppen, von Planern, über Installateure, Anlagenbauer und Schweißer bis hin zu Elektrotechniker, Tiefbauer und Chemiker. Im obigen Kapitel gibt es unterschiedliche Meinungen, wie groß der Fachkräftemangel bis 2030 sein wird. Die Zahlen bewegen sich zwischen 12 000 bis 70 000 Fachkräften.

In den oben beschriebenen Szenarien wird deutlich, dass die Zahl eher am oberen Ende des Ranges liegen wird, zumindest kurzfristig, um z.B. die Umstellung in den Haushalten von Erdgas auf Wasserstoff zu bewerkstelligen. Und hier ist noch nicht die gesamte Umstellung des gesamten Gassystems in Deutschland betrachtet. Die Infrastruktur wie Transport- und Verteilnetz muss entsprechend vorher umgestellt sein und auch die Wasserstofferzeugung muss bewerkstelligt werden.

Je kürzer die Umstellung insgesamt auf Wasserstoff erfolgen soll, entsprechend mehr Fachkräfte werden benötigt.

Die Umstellungsdauer des Fernleitungsnetzes (Wasserstoffkernnetz) wird mit ca. sechs Jahren angenommen. Die Umstellung des Verteilnetzes und der Hausinstallationen ist sehr viel komplizierter, weil hier viele kleine Punkte wie Gasgeräteumstellung, Gaszähler, und

Gasanschlüsse umgestellt werden müssen. Gemäß der in dieser Studie vorgenommenen Schätzung würde es selbst bei einem Einsatz von insgesamt 36.000 Monteuren in Deutschland, also jeweils 12.000 Monteure für die Umstellung von Gasgeräten, 12.000 Monteure für Gaszähler und 12.000 Monteure für Gasanschlüsse, mehr als **10 Jahre** dauern, um alle konventionellen Komponenten auf wasserstofftaugliche umzustellen. Diese Berechnung berücksichtigt, dass die Arbeiten nur während 8 Monaten im Jahr durchgeführt werden können, da in den kalten Monaten die Energieversorgung der Haushalte nicht unterbrochen werden darf.

Die Umstellung von Erdgas auf Wasserstoff beinhaltet den Austausch von Millionen Gaskomponenten (Gasgeräte, Gashauseschlüsse und Gaszähler). Häufig führen logistische, rechtliche sowie bürokratische Hürden zu Verzögerungen. Zudem erschweren eine komplexe Kundenkoordination und schwierige bauliche Gegebenheiten den Ablauf. Unvorhergesehene technische Probleme tragen ebenfalls dazu bei, dass sich die Projektlaufzeit insgesamt verlängert und das Vorhaben länger als geplant dauert.

Die Weiter- und Ausbildung im Bereich Wasserstoff ist ein wichtiger Aspekt gegen den Fachkräftemangel. Wichtig ist, dass man hier die Zahl von Ausbildungs-/Studien-Abbrechern reduziert und mehr Menschen, besonders Frauen, in die „Mehrarbeit“ bringt. Attraktives Gehalt und finanzielle Zusatzleistungen bieten einen Anreiz, besonders für junge Menschen, sich für den Bereich Wasserstoff zu interessieren und können Fachkräfte aus dem Ausland anziehen. Hier ist es wichtig anzumerken, dass gerade am Anfang sprachliche Probleme auftreten können, so dass die Effizienz und die Kommunikation anfänglich schlechter sein können.

Unternehmen, die sich mit Wasserstofftechnologie befassen, wie z. B. die EnBW, beschäftigen Experten auf diesem Gebiet. Sie haben die Möglichkeit, Personal in der Wasserstofftechnologie auszubilden und so die Zahl der qualifizierten Auszubildenden zu erhöhen und den Ausbildungsprozess für wasserstoffbezogene Aufgaben zu beschleunigen.

Es ist wichtig, dass die politischen Entscheidungsträger Anreize für die Industrie schaffen, sich stärker in die Wasserstoffausbildung einzubringen, da die Industrie eine wichtige Rolle in der Ausbildung spielt. Darüber hinaus müssen die Handelskammern und Berufsschulen ihre Lehrpläne entsprechend der nationalen Wasserstoffstrategie anpassen, um den künftigen Bedarf an Fachkräften im Wasserstoffsektor zu decken.

8 Handlungsempfehlungen

Im Folgenden werden die Empfehlungen beschrieben, die im Rahmen der Projektbearbeitung abgeleitet wurden. Diese umfassen vor allem die Optimierung des eigentlichen Umstellprozesses und richten sich einerseits an den DVGW hinsichtlich Anpassungsbedarf im Regelwerk sowie Forschungsbedarf, darüber hinaus aber auch an die Netzbetreiber hinsichtlich der konkreten Ausgestaltung und Umsetzung der Umstellung, sowie an die Politik, mit Fokus auf dem für Durchführung und Finanzierung der Umstellung erforderlichen regulatorischen Rahmen.

8.1 Optimierungspotenziale im Umstellprozess

Im Rahmen der Erstellung der Prozessablaufdiagramme hat sich auf Grundlage der Literaturrecherchen, Experten-Workshops und der am GWI aufgebauten Versuchsinfrastruktur ergeben, dass ein paar der Prozessschritte technisch nicht unbedingt notwendig sind und Potenziale zur Optimierung des Umstellprozesses bieten. Diese Prozessschritte sind in den folgenden Abbildungen schraffiert ausgegraut dargestellt.

Für den Bereich **Gasverteilnetze** sind die Optimierungspotenziale in Abbildung 8.1 dargestellt. Diese Potenziale beziehen sich auf verschiedene Phasen des Prozesses und zeigen konkrete Ansatzpunkte, um Effizienz, Qualität und Wirtschaftlichkeit zu verbessern.

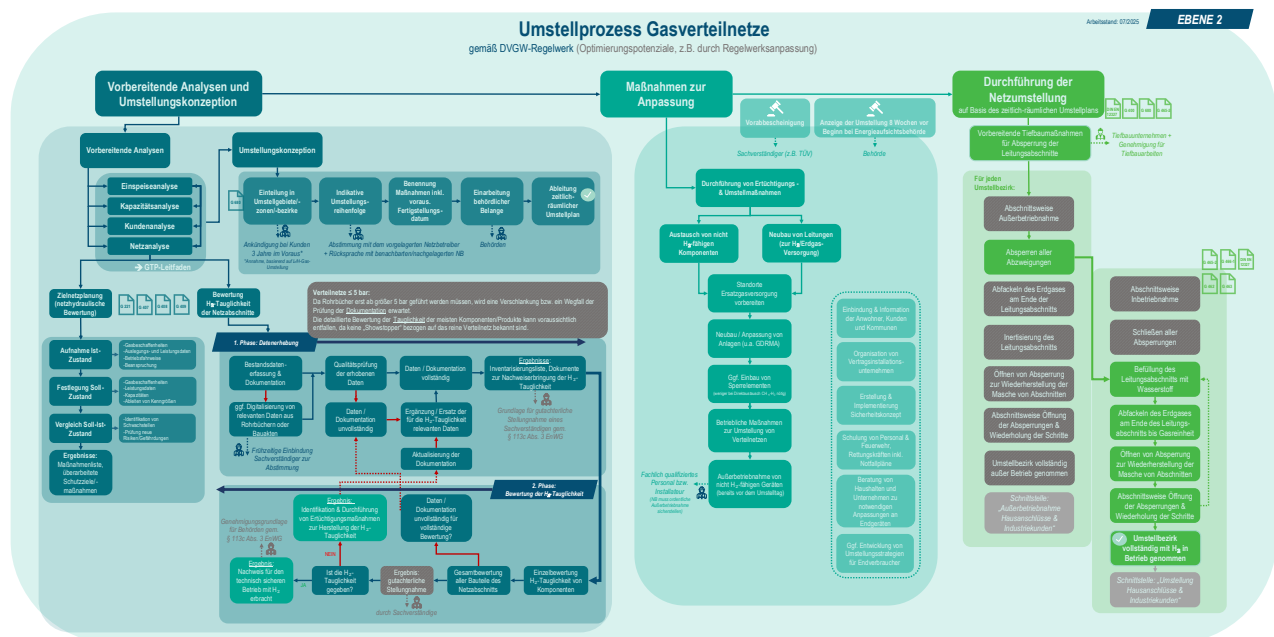


Abbildung 8.1: Umstellprozess Gasverteilnetze, Optimierungspotenziale (eigene Darstellung DBI)

In der Phase der vorbereitenden Analysen, insbesondere der Netzanalyse, kann zukünftig im Bereich der Verteilnetze kleiner gleich 5 bar die Dokumentation optimiert werden (vorausgesetzt, es liegen Dokumentationen für eine ordnungsgemäß durchgeführte Instandhaltungsmaßnahmen / Rohrnetzüberprüfungen vor). Da Rohrbücher erst ab größer 5 bar geführt werden müssen, wird eine Verschlinkung bzw. ein Wegfall der Prüfung der Dokumentation erwartet. Eine detaillierte Bewertung der Wasserstofftauglichkeit der meisten Komponenten/Produkte kann voraussichtlich entfallen, da keine „Showstopper“ bezogen auf das reine Verteilnetz bekannt sind.

Das DVGW-Projekt „BAG 464“ [2] konnte zudem den Nachweis erbringen, dass eine bruchmechanische Bewertung bei der Umstellung von Stahlrohrleitungen mit einem MOP bis 12 bar, unabhängig von der verwendeten Stahlgüte, nicht erforderlich ist, gleiches gilt für einen MOP 12 bis 16 bar und $\leq$ DN 200. Demnach kann bei einem Großteil der Stahlrohrleitungen im Verteilnetz auf eine bruchmechanische Bewertung gemäß DVGW-Merkblatt G 464 verzichtet werden. Für weitere Bauteile und Komponenten wurde die Eignung bis 5 bar über die Werkstoffmatrix aus „F&E für H₂“ nachgewiesen. Diese neuen Erkenntnisse sollen in die Überarbeitung der G 407 einfließen.

Außerdem könnte die Anzeige zur Umstellung bei der Energieaufsichtsbehörde nach § 113c Abs. 3 EnWG zukünftig gegebenenfalls wegfallen. Dieser Paragraph beinhaltet die Anzeigepflicht für die Umstellung von Erdgasleitungen auf den Transport von Wasserstoff – unabhängig von Länge und Druckstufe – acht Wochen vor der Umstellung bei der Energieaufsichtsbehörde. Zudem ist eine gutachterliche Stellungnahme eines Sachverständigen erforderlich. Hintergrund der Einführung von § 113c EnWG war die Gewährleistung eines sicheren Betriebs der Wasserstoffnetzinfrastruktur während der Übergangsphase bis zur vollständigen Ausarbeitung spezifischer technischer Regeln. Inzwischen sind diese technischen Regeln vom DVGW jedoch weitgehend erarbeitet, weshalb eine Streichung der Regelung empfohlen wird. Diese Empfehlung basiert unter anderem auf einer Stellungnahme des DVGW vom 5. Juni 2024²⁹. Zudem scheint die Anzeigepflicht für Wasserstoffleitungen aller Druckstufen als inhaltlich unverhältnismäßig, da dies im Erdgasbereich nur für Leitungen mit mehr als 16 bar gilt. Daneben gibt es ein praktisches Problem: Aufgrund der begrenzten Anzahl an Sachverständigen könnten Kapazitätsengpässe entstehen, die die Umsetzung der Umstellungen verzögern.

In der Phase der tatsächlichen Umstellung wäre ein Optimierungspotenzial der direkte Austausch von Erdgas mit Wasserstoff, ohne zwischendurch mit Stickstoff oder Inertgas zu inertisieren, was zu einer Aufwands- und Zeitersparnis führt. Dies wurde bei der Umstellung von Stadtgas auf Erdgas gemacht. Dieser Umstellprozess ist in Kapitel 2.5.3 beschrieben. Zudem würde dieses Vorgehen eine deutlich geringere Anzahl an Absperrungen benötigen, was, zusätzlich zum nicht benötigten Stickstoff, Zeit und Kosten einsparen kann. Es wäre nach derzeitigem Stand jedoch nicht regelwerkskonform. Für dieses vereinfachte Verfahren zur Umstellung müsste das DVGW-Regelwerk bzw. die entsprechenden DGUV Vorschriften entsprechend angepasst bzw. ergänzt werden.

²⁹ Stellungnahme vom 5. Juni 2024 zu § 113c Abs. 3 Energiewirtschaftsgesetz (EnWG) „Übergangsregelungen zu Sicherheitsanforderungen; Anzeigepflicht und Verfahren zur Prüfung von Umstellungsvorhaben“; DVGW.

Für den Bereich **Gashaushaltungen** inklusive der Gasgeräte sind die Optimierungspotenzial in Abbildung 8.2 dargestellt.



Abbildung 8.2: Umstellprozess Gashaushaltungen, Optimierungspotenziale (eigene Darstellung DBI)

Genau wie beim Gasverteilnetz könnte auch bei der Umstellung der Hausanschlussleitung bzw. den Leitungsanlagen in den Gebäuden die Inertisierung mit Stickstoff weggelassen, da dies insbesondere bei den hier vorliegenden „kleinen“ Rohrdurchmessern technisch nicht notwendig ist. Die Zeiten, in denen die Leitungsanlage zur Atmosphäre geöffnet wird, sind sehr kurz und der Prozess geschieht unter kontrollierten Bedingungen unter Aufsicht von Fachpersonal. Es muss sichergestellt sein, dass bei der Spülung des Hausanschlusses die eingesetzten Fachleute problemlos reinen Wasserstoff sowie Erdgas-Wasserstoffgemische von 0 bis 100% verarbeiten können und mit passenden Deflagrationssicherungen ausgestattet sind. Wird die DGUV Information 203-090 berücksichtigt, muss das Spülen des Erdgases weiteren Anforderungen genügen (z. B. einzuhaltende Fließgeschwindigkeiten). Bei einem Direktaustausch ist die Konzentrationsmessung des Wasserstoffgehalts im Brenngas ein zwingend erforderlicher, sicherheitsrelevanter Arbeitsschritt. Dies ist in Kapitel 3.1 beschrieben.

Für den Fall, dass beim Endkunden bereits wasserstofffähige Geräte installiert sind, welche nur mittels Umstellkit umgestellt werden, könnte die Entwicklung einer standardisierten Spülöffnung an der Geräteabsperrramatur³⁰ oder im Gasgerät eine technische Lösung sein, da ansonsten die Zugänglichkeit zu Spülöffnungen schwierig (über Anschlüsse im Gasgerät) oder der Durchsatz beim Spülen zu gering sind (Spülen über Druckmessöffnung im Gasgerät). Beispielsweise könnte zukünftig am Gerätehahn eine solche Spülöffnung implementiert werden. Würde ein entsprechendes Bauteil entwickelt und über eine Bauteilanforderung genormt werden, könnte dies über eine Fortschreibung zur G 655 bzw. zur TRGI G 600 durch den DVGW geregelt werden.

³⁰ Das Thema Manipulationsschutz nach TRGI wäre dabei auch zu beachten,

8.2 Empfehlungen für Netzbetreiber

Die Verteilnetzbetreiber müssen ihre Netze rechtzeitig vor Beginn der Umstellung analysieren, um Umstellzonen, Umstellbezirke, deren Aufteilung in Leitungsabschnitte sowie eine Umstellreihenfolge festzulegen. Dies sollte für jeden Umstellbezirk mittels strömungstechnischer Netzsimulation überprüft werden, um die Versorgungssicherheit während der Umstellung zu gewährleisten.

Im Bereich der Gasinstallation kann das Sicherheitskonzept wie unter Erdgas bestehen bleiben, zusätzliche Sicherheitsmaßnahmen sind nicht notwendig. Bei den Umstellarbeiten an den Leitungen wird, in Einklang zu G 655, die Nachrüstung eines Gasströmungswächters empfohlen.

Da der Umstellprozess, inkl. der erforderlichen Analysen, Planungen und Kommunikation ein langwieriger, mehrjähriger Prozess ist, sollte frühzeitig damit begonnen werden.

Es wird empfohlen, ein zentrales Dokumentations- und Bewertungsmanagement für sämtliche Netzbereiche aufzubauen. Dieses sollte ein GIS-gestütztes Leitungskataster integrieren, um die Datengrundlage systematisch zu erfassen, zu pflegen und für Transformationsentscheidungen verfügbar zu machen.

8.3 Empfehlungen für den DVGW

Verteilnetze

Das Regelwerk sollte hinsichtlich erlaubter Prozesse für die Umstellung von vermaschten Netzen auf Wasserstoff geprüft und überarbeitet / ergänzt werden. Nicht mehr gültige Regelwerke von der Umstellung von Stadtgas auf Erdgas, wie z.B. die TGL 190 356/09 können da als Vorlage dienen.

Forschungsbedarf besteht hier ggf. bei folgenden Fragestellungen.

- Lassen sich temporäre Absperrverfahren wie Blasensetzen oder Abquetschen nutzen, um Umstellbezirke oder Leitungsabschnitte während des gesamten Umstellzeitraums abzusperren? Oder müssen für jede notwendige Absperrung Absperrarmaturen eingebaut werden?
- Sind am Markt erhältliche Erdgasfackeln geeignet, um bei der direkten Umstellung von Erdgas auf Wasserstoff auch den reinen Wasserstoff und auftretende Erdgas-Wasserstoff-Gemische gefahrlos zu verbrennen?
- Welche Mindest-Spülgeschwindigkeiten sind im Verteilnetz erforderlich, um einen vollständigen Austausch von Erdgas mit Wasserstoff effizient zu erreichen?

Hausanschlüssen, Gasinstallation und Gasgeräte

Als problematisch hat sich im Projekt die Spülung der Hausanschlüsse dargestellt, da sich verschiedene Punkte nicht final festlegen ließen. Darunter fallen:

- Werden die Hausanschlüsse über das Netz gespült, erfordert dies eine hohe Gleichzeitigkeit der Arbeiten. Grundsätzlich sind Anschlussmöglichkeiten zur Spülung über den Installationsort des Gasdruckregelgerätes oder des Gaszählers gegeben.

- Werden Hausanschlüsse mit Flaschengas aus dem Hausanschluss gespült, bleibt ggf. die Anschlussleitung bis HEK und HAE ungespült.
- Für die Spülung des Hausanschlusses zusammen mit der Installationsleitung steht kein genormter Anschluss bereit, um möglichst zügig und einheitlich freispülen zu können. Hier wurden erste Gespräche zu einer genormten Gasgeräteabsperrarmatur geführt, an welchem bei gleichzeitiger Spülung der Gasinstallationsleitungen eine Spülöffnung vorgesehen werden könnte. Beim Tausch des Gasgeräts kann direkt über die Geräteverschraubung / die letzte Absperrarmatur vor dem Gasgerät gespült werden.
- Es wird davon ausgegangen, dass auch die Umstellung eines Netzabschnittes sowie des Hausanschlusses unter die [EU-Methanverordnung 2024/1787](#) fällt. Die verbliebenen Mengen sind, wo möglich, abzufackeln. Der oben benannte Gerätehahn könnte als standardisierter Anschluss für das Abfackeln dienen.
- Die Zwischeninertisierung mit Stickstoff konnte bisher nicht als notwendig nachgewiesen werden. Vorteile hinsichtlich Aufwand und Geschwindigkeit der Umstellung bestehen bei einem direkten Verdrängen des Erdgases mit Wasserstoff über das Netz. Hier muss beim Umstellvorgang überwacht werden, wann die notwendige Wasserstoffqualität an der Geräteverschraubung anliegt. Dafür sind beim Umsteller entsprechende Messgeräte notwendig. Die Einbettung dieses Prozesses in das Regelwerk sollte geprüft werden.

Gasqualität & Wasserstoffreinheit

- Bezüglich der Wasserstoffreinheit ist eine eindeutige Definition der erforderlichen Wasserstoffqualität für die jeweiligen Anwendungsbereiche notwendig. Nur so lässt sich eindeutig festlegen, welche Reinheitsanforderungen in den Anwendungen gelten. Auf dieser Grundlage kann beurteilt werden, ob der Wasserstofftransport über das Verteilnetz für die jeweilige Anwendung möglich ist. Sollte dies nicht der Fall sein, stellt sich die Frage, ob ein Transport dennoch erfolgen kann und ob eine Reinigung des Wasserstoffs vor Ort – also unmittelbar vor der Anwendung – realisierbar ist.

8.4 Empfehlungen für die Politik

- Der flächendeckende Austausch in den Haushalten von bis zu 15 Mio. Gasgeräten und 16 Mio. Zählern sollte durch ein national koordiniertes Programm mit regional abgestimmten Zeitplänen erfolgen. Voraussetzung für die Umsetzung ist jedoch eine Anpassung der regulatorischen Rahmenbedingungen in GEG, KWKG und EnWG – vergleichbar mit der L-H-Gas-Umstellung –, um Wasserstoffnetze auf allen Ebenen als ernsthafte technologische Option zu ermöglichen.
- Um die fristgerechte Umsetzung sicherzustellen, ist ein erheblicher Personaleinsatz erforderlich. Aufgrund des anhaltenden Fachkräftemangels ist es daher notwendig, die Ausbildung, in Zusammenarbeit mit z.B. den Verbänden, gezielt zu stärken.
- Die Akzeptanz in der Bevölkerung ist durch transparente Kommunikation und gezielte Beratung zu stärken.
- Es werden klare Rahmenbedingungen für Finanzierung / Anerkennung von Kosten der Transformation der Gasnetze benötigt.

9 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Analyse der methodischen Herangehensweise zur Umstellung von Gasnetzen (inkl. Gasinstallation und -anwendung) auf Wasserstoff zeigen sowohl die Komplexität der Prozesse als auch den organisatorischen und technischen Aufwand, der dafür erforderlich ist.

Hervorzuheben sind die Schnittstellen und Abstimmungsbedarfe zwischen den Arbeiten am Netz und Hausanschluss sowie denen im Bereich der Gasinstallation und -anwendung, die für eine effiziente Umstellung mit möglichst kurzen Versorgungsunterbrechungen erforderlich sind. Darüber hinaus ist die notwendige Kleinteiligkeit, insbesondere im Rahmen der Detailplanung und Umsetzung, die aufgrund der straßenzugsweisen Umstellung erforderlich ist, zu erwähnen. Ein weiterer wesentlicher Punkt betrifft die Vorlauf- und Umsetzungszeiten, hier definiert die dreijährige Frist zur Ankündigung der Umstellung bei den Kunden die Minstdauer zwischen Umstellkonzeption (Einteilung in Umstellgebiete/-zonen/-bezirke) und eigentliche Umstellung.

Sowohl die Gasverteilnetze als auch die Gasinstallation zeigt prinzipiell eine gute Eignung für die Umstellung auf Wasserstoff. Nicht geeignete Komponenten (z.B. Balgengaszähler auf Grund Volumetrik) sind bekannt und einfach zu tauschen. Größere Umbaumaßnahmen sind allerdings nicht zu erwarten, außer z.B. im Bereich der Gasinstallation, falls der Gaszähler ausgetauscht werden muss und dabei der Zählerplatz anzupassen ist.

Die für die Umstellung erforderlichen Regelwerke sind im Wesentlichen bereits vorhanden, so dass eine Umstellung grundsätzlich regelwerkskonform erfolgen kann. An verschiedenen Stellen sind jedoch Anpassungen sinnvoll, sowohl zur Optimierung des Prozesses als auch hinsichtlich z.B. einer Definition der „Umstellung“ an sich, z.B. angelehnt an die Begriffe aus G 680 und in Ergänzung zu bestehenden Begriffen wie Außer- und Inbetriebnahme.

Die Optimierungspotenziale betreffen unter anderem die Notwendigkeit der indirekten Spülung (Erdgas – Stickstoff – Wasserstoff) von Netzabschnitten und Leitungen der Gasinstallation im Gegensatz zur direkten Spülung mit Wasserstoff. Letzteres führt zu einer Reduzierung des Aufwands für die Umstellung, muss jedoch, vor allem im Kontext der Sicherheit, für den Gesamtprozess der Umstellung von Netzabschnitten und Leitungen der Gasinstallation bewertet werden. Weitere offene Fragen, die zeitnah untersucht werden sollten, zielen z.B. auf Mindestspülgeschwindigkeiten für kleinere Nennweiten im Verteilnetzbereich und der Gasinstallation bzw. industriellen Leitungsanlagen ab, mit denen ein sicherer und vollständiger Gasaustausch gewährleistet werden kann.

Die offenen Forschungsfragen und Optimierungspotenziale sowie der Umstellprozess an sich sollten im Rahmen von möglichst realitätsnahen Demonstrations- oder Pilotprojekten zur Umstellung von (Teil-)Netzen auf Wasserstoff untersucht werden. Hierzu laufen bereits Abstimmungen mit verschiedenen in Anbahnung befindlichen Vorhaben.

10 Literatur

- [1] M. Wupperfeld, J. Sperlich, M. Hoffmann, D. Schulz und J. Hüttenrauch, "Roadmap Gas 2050: Anpassungsbedarf für die Gasnetze hinsichtlich Struktur und Betrieb: Deliverable D 2.4" DVGW-Förderkennzeichen G 201824, DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH, Dez. 2022. Zugriff am: 23. August 2023.
- [2] M. Steiner und U. Marewski, "Begrenzung des Anwendungsbereiches für bruchmechanische Bewertung von Gasleitungen nach DVGW G464 (BAG 464)" DVGW-Förderkennzeichen G 202333, Okt. 2024.
- [3] *Berechnung von Gas und Wasserrohrnetzen: Teil 1: Hydraulische Grundlagen, Netzmodellierung und Berechnung*, DVGW GW 303-1, DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V., Bonn, Okt. 2006.
- [4] F. Feller, V. Bartsch und R. Stock, "Der Gasnetzgebietstransformationsplan: Ergebnisbericht 2024", Sep. 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.h2vorort.de/fileadmin/Redaktion/Bilder/Publikationen/Ergebnisbericht-2024-des-GTP.pdf>. Zugriff am: 15. Mai 2025.
- [5] Viessmann Deutschland GmbH, *Zukunftstechnologie: Heizen mit Wasserstoff: Wegweiser*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.viessmann.de/de/wohngebaeude/klimaneutral-heizen-mit-wasserstoff.html> (Zugriff am: 05.2022).
- [6] Viessmann Climate Solutions SE, Hg., "Wasserstoff im Wärmesektor: Das Potenzial regenerativer Gase für eine klimaneutrale Wärmeversorgung", Apr. 2021.
- [7] Florian Feller und Dr. Volker Bartsch, "H2 VOR ORT", *DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfachs e. V.*, 2020.
- [8] Sperlich, J., Hüttenrauch J., Pischko R., "H2-ready und klimaneutral bis 2045: Kosten und Aufwand für die H2-Umrüstung der deutschen Gasnetze (Update 2024)", Apr. 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.dvgw.de/themen/forschung-und-innovation/forschungsprojekte/dvgw-forschungsprojekt-netzentgelte>. Zugriff am: 11.2024.
- [9] F. Feller, V. Bartsch, P. Ginsberg, J. Grönner, R. Stock und I. Orland, "Der Gasnetzgebietstransformationsplan: Ergebnisbericht 2023", Sep. 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.h2vorort.de/fileadmin/Redaktion/Bilder/Publikationen/Ergebnisbericht-2023-des-GTP.pdf>.
- [10] M. Steiner, U. Marewski und H. Silcher, "DVGW-Projekt SyWeSt H2: Stichprobenhafte Überprüfung von Stahlwerkstoffen für Gasleitungen und Anlagen zur Bewertung auf Wasserstofftauglichkeit" DVGW-Förderkennzeichen G 202006, Jan. 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.dvgw.de/medien/dvgw/forschung/berichte/g202006-sywesth2-staehle.pdf>. Zugriff am: 30. März 2023.
- [11] J. Sperlich und J. Hüttenrauch, "Roadmap Gas 2050: Transformationspfade der deutschen Gasinfrastruktur inkl. Gasanwender: Deliverable D 2.3" DVGW-Förderkennzeichen G 201824, DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH, Juni 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.dvgw.de/medien/dvgw/forschung/berichte/g201824-rmg2050-d2.3-transformationspfade.pdf>. Zugriff am: 27. Februar 2023.
- [12] Marek Poltrum, "Kompendium Wasserstoff in Gasfernleitungsnetzen H2-Kompendium-FNB", *DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH*, 2021.
- [13] "Sicherheitsventile für Wasserstoffanwendungen", *BESA Ing.* [Online]. Verfügbar unter: <https://www.besa.it/de/Sicherheitsventile-f%C3%BCr-Wasserstoffanwendungen/>
- [14] Roadmap Gas 2050: Bewertung der H2-Verträglichkeit von Gasinstallationen, Deliverable D 3.5 und Dr.-Ing. Frank Burmeister, Dipl.-Ing. Eren Tali, et al., "Roadmap Gas 2050: Bewertung der H2-Verträglichkeit von Gasinstallationen", *Roadmap Gas 2050*

Bewertung der H₂-Verträglichkeit von Gasinstallationen Deliverable D 3.5 Mai 2023
DVGW-Förderkennzeichen G 201824, 2023.

- [15] Dr. Régis Anghilante, Robbin Bhagwan und Dr. Holger Dörr, "ECLHYPSE Experimentelle Charakterisierung der Leckraten von Prüflecks mit H₂ und/oder CH₄-H₂-Gasgemischen gegenüber Luft", *DVGW-Förderkennzeichen G 202138, 2023.*
- [16] A. Zajc und J. Suhr, "Wasserstoff in der Erdgas- infrastruktur – Eine Heraus- forderung für die -Bestimmung der -Gasbeschaffenheit" (de).
- [17] J. Jaworski, P. Kułaga und T. Blacharski, "Study of the Effect of Addition of Hydrogen to Natural Gas on Diaphragm Gas Meters" (en), *Energies*, Jg. 13, Nr. 11, S. 3006, 2020, doi: 10.3390/en13113006.
- [18] Dipl.-Ing. Kai Florian Scholten, Dr. Holger Dörr und Dr.-Ing. Matthias Werschy, "Mögli- che Beeinflussung von Bauteilen der Gasinstallation durch Wasserstoffanteile im Erd- gas unter Berücksichtigung der TRGI", *DVGW-Förderkennzeichen G 201615, 2018.*
- [19] Der Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft, "Regelungen zu Wasserstoff- netzen- Gesetz zur Umsetzung unionsrechtlicher Vorgaben und zur Regelung reiner Wasserstoffnetze im Energiewirtschaftsrecht", 2021, 2021.
- [20] "Technische Regel – Merkblatt DVGW G 407 (M)-Umstellung von Gasleitungen aus Stahlrohren bis 16 bar Betriebsdruck für die Verteilung von wasserstoffhaltigen methan- reichen Gasen und Wasserstoff", *DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfa- ches e. V., 2022.*
- [21] "Technischer Hinweis – Merkblatt DVGW G 408 (M)- Umstellung von Gasleitungen aus Kunststoffrohren bis 16 bar Betriebsdruck für die Verteilung von wasserstoffhaltigen methanreichen Gasen und Wasserstoff", 2022.
- [22] "Technischer Hinweis – Merkblatt DVGW G 405 (M)-Umstellung von Bestandsarmatu- ren auf Wasserstoff", *DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V, 2024.*
- [23] Agnes Schwigon und & Dr. Michael Steiner, "Errichtung, Umstellung und Betrieb von Gasleitungen aus Stahl für Wasserstoff: von der Werkstoffprüfung bis zur Genehmi- gung", 2023.
- [24] "DVGW-G 221 (M) (2021)"
- [25] *Umstellung von Gasleitungen aus Stahlrohren bis 16 bar Betriebsdruck für die Vertei- lung von wasserstoffhaltigen methanreichen Gasen und Wasserstoff*, Merkblatt G 407, Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches (DVGW), Aug. 2022.
- [26] *Umstellung von Gasleitungen aus Kunststoffrohren bis 16 bar Betriebsdruck für die Ver- teilung von wasserstoffhaltigen methanreichen Gasen und Wasserstoff*, Merkblatt G 408, Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches (DVGW), Aug. 2022.
- [27] *Umstellung von Gashochdruckleitungen aus Stahlrohren für einen Auslegungsdruck von mehr als 16 bar für den Transport von Wasserstoff*, Merkblatt G 409, Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches (DVGW), Jul. 2024.
- [28] *Gasleitungen aus Stahlrohren bis 16 bar Betriebsdruck: Errichtung*, DVGW G 462 (A), DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V., Bonn, Mrz. 2020.
- [29] *Gashochdruckleitungen aus Stahlrohren für einen Auslegungsdruck von mehr als 16 bar: Planung und Errichtung*, DVGW G 463 (A), DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V., Bonn, Okt. 2021.
- [30] *DVGW G 465-2 -Gasleitungen mit einem Betriebsdruck bis 5 bar - Instandsetzung: DVGW GW 303-2*, DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V., April 202.
- [31] *Gashochdruckleitungen aus Stahlrohren für einen Auslegungsdruck von mehr als 16 bar: Betrieb und Instandhaltung*, DVGW G 466-1 (A), DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V., Bonn, Dez. 2021.

- [32] *Freiverlegte Gasleitungen aus Werksgelände hinter der Übergabestelle: Betrieb und Instandhaltung*, DVGW G 614-2 (A), DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V., Bonn, Okt. 2014.
- [33] *Druckprüfung, In- und Außerbetriebnahme: Funktionale Anforderungen*, FprEN 12327, Europäisches Komitee für Normung, Brüssel, Feb. 2012.
- [34] *DVGW G 400 (M): Gastransport und Gasverteilung - Begriffe und Definitionen*, DVGW - Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V, Jan. 2021.
- [35] Werner Weßing, Tonish Pattima, Torsten Lotze, Manuel Behlke, Dr. Heike Grüner, Jörg Leweling, Tom Lindemann, Felix Schönwald, Mathias Stierstorfer, "Umstellung von Gasverteilnetzen auf Wasserstoff - Teil 2: Praxiserfahrung von Netzbetreibern", *energie | wasser-praxis*.
- [36] DGUV, "DGUV Information 203-090: Arbeiten an in Betrieb befindlichen Gasleitungen – Handlungshilfe zur Erstellung der Gefährdungsbeurteilung", Juli 2024.
- [37] *Gasleitungen - Maßnahmen bei Umstellung auf eine andere Gasart: TGL 190-356/09*, 1983.
- [38] ontras Gastransport GmbH, *Umstellung einer HD-Leitung von Erdgas auf Wasserstoff*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.linkedin.com/posts/ontras-gastransport-gmbh_energiepark-h2-wasserstoff-activity-7317798361338699778-e-8e?utm_source=share&utm_medium=member_desktop&rcm=A-CoAADNUy0EBXD4sSga4vSP5xsbfuOG-62JVBQQ (Zugriff am: April 2025).
- [39] "GIE AGSI: GIE (Gas Infrastructure Europe), AGSI (Aggregated Gas Storage Inventory)" [Online]. Verfügbar unter: <https://agsi.gie.eu/>.
- [40] DVGW - Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V., *DVGW Forschungsprojekt H2-Vent*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.dvgw.de/themen/forschung-und-innovation/forschungsprojekte/dvgw-forschungsprojekt-h2vent> (Zugriff am: März 2025).
- [41] Kai-Uwe Schuhmann, D. K. Holger Stange, Christian Wiedenhöft und Andreas Strauß, "Wasserstoff in der häuslichen Anwendung - Standortbestimmung für die zukünftige Gebäudebeheizung (Teil 1)", *energie | wasser-praxis*, S. 34–39. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.dvgw.de/medien/dvgw/verein/energiewende/h2-haeusliche-anwendung-teil1-schuhmann2404.pdf>.
- [42] Kai-Uwe Schuhmann, D. K. Holger Stange, Christian Wiedenhöft und Andreas Strauß, "Wasserstoff in der häuslichen Anwendung – Standortbestimmung für die zukünftige Gebäudebeheizung (Teil 2)", *energie | wasser-praxis*, S. 82–87. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.dvgw.de/medien/dvgw/verein/energiewende/h2-haeusliche-anwendung-teil2-schuhmann2405.pdf>.
- [43] *prEN 16726 Gasinfrastruktur - Beschaffenheit von Gas - Gruppe H; Deutsche und Englische Fassung prEN 16726:2023*, Deutsches Institut für Normung: DIN.
- [44] DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH, Dipl.-Chem. Udo Lubenau, Dipl.-Ing. Hagen Bültemeier, Dipl.-Ing. Cruz Marrone, M. E. Jens Hüttenrauch und Dipl.-Ing. Philipp Pietsch, "H₂-Kurzstudie: Wasserstoffqualität in einem gesamtdeutschen Wasserstoffnetz", *DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH*, 2021.
- [45] D. Grace, "Guidelines for Fuel Gas Line Cleaning Using Compressed Air or Nitrogen 1023628", Electr. POWER Res. Inst., 2011.
- [46] "Wasserstofftransport-Nationaler Wasserstoffrat", 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.wasserstoffrat.de/fileadmin/wasserstoffrat/media/Dokumente/2021-07-02_NWR-Grundlagenpapier_Wasserstofftransport.pdf
- [47] Jochen Schütz, Kerstin Kröger, Dr. Tobias van Almsick, "H₂ im Netz Voruntersuchungen zu Gasbeschaffenheitsaspekten bei Transport und Verteilung von Wasserstoff mit Hilfe der bestehenden Erdgasinfrastruktur", 2021.

- [48] Udo Lubenau, Dr. Daniela Baumann, "Wasserstoffqualitätsanforderungen Anforderungen der ISO/DIS 14687 bzw. DIN EN 17124 an die verschiedenen Wasserstoffqualitäten und Auswirkungen hinsichtlich H₂- und H₂-Gemischtransport sowie resultierende Vermarktungs- und Einsatzmöglichkeiten für Gasversorger", 2020.
- [49] Viktor Deleski, *Fachkräftemangel gefährdet Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft*. Verfügbar unter: <https://blog.academy.fraunhofer.de/blogbeitraege/wasserstoffwirtschaft/>.
- [50] M. A. Mareike Wald, Co-Autor*innen: Dr. Manuela Grigorjan und Prof. Dr.-Ing. Michael Uhlmann, "Berufliche Qualifikationen in der Wasserstoffindustrie", 2022.
- [51] Andrea Appel, Michael Schanz Marc Bovenschulte Stefan Garche, Anja Heilmann Ursula Hoffmann, Peter Preuss Thomas Kunz, Kathrin Pilz-Lansley und Simon Reichenwallner & Alexander Mack, "Wissensvermittlung Wasserstoff: Der H₂-Markthochlauf braucht heute Fachkräfte (Teil 2)", 2023.
- [52] "Erster Fortschrittsbericht zur Wasserstoff-Roadmap Baden-Württemberg", 2023.
- [53] Andrea Appel, Michael Schanz Marc Bovenschulte Stefan Garche, Anja Heilmann Ursula Hoffmann, Peter Preuss Thomas Kunz, Kathrin Pilz-Lansley und Simon Reichenwallner & Alexander Mack, "Wissensvermittlung Wasserstoff: Der H₂-Markthochlauf braucht heute Fachkräfte- (Teil 1)", 2023.
- [54] "DLR und Flughafen Hamburg präsentieren gemeinsame Wasserstoff-Roadmap", 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.hamburg-airport.de/de/unternehmen/presse/dlr-und-flughafen-hamburg-praesentieren-gemeinsame-wasserstoff-roadmap-77470>
- [55] Andrea Appel *et al.*, "Impulspapier Wissensvermittlung Wasserstoff", 2022.
- [56] Alexander Christian Schur, Anke Mönnig, Linus Ronsiek, Christian, Anke Mönnig, Linus Ronsiek, Christian Schneemann, Jan Philipp Schroer und Johanna Zenk, "Arbeitskräftebedarf und Arbeitskräfteangebot entlang der Wertschöpfungskette „Wasserstoff“, 2023.
- [57] Prof. Dr. Ann-Kristin Achleitner und Prof. Dr. Ursula Gather, "ÜBERGREIFENDE ASPEKTE Fachkräftesicherung", *Wasserstoff-Kompass – Handlungsoptionen für die Wasserstoffwirtschaft*, 2024.
- [58] Jakob Wachsmuth, Vicki Duscha, Martin Wietschel, Stella Oberle, Ulrike Herrmann, Marieke Graf, Benjamin Pfluger und Mona Sorayaei, Frederik Brandes, Stefan Gehrmann, Janosch Rommelfanger, "Abschlussbericht: Transformation der Gasinfrastruktur zum Klimaschutz", 2023.
- [59] Bastian Gillessen, Simonas Cerniauskas, Jochen Linßen, Thomas Grube, Martin Robinius und Detlef Stolten, "Umstellung von Erdgaspipelines auf Wasserstoff: eine wirtschaftliche Alternative für Deutschland?", 2020.
- [60] Barbara Fischer, "zum Planungsstand des Wasserstoffkernnetzes vom 12. Juli 2023 gegenüber dem BMWK", 2023.
- [61] L.J.F. Oprinsen, "The Transition of Natural Gas to 100% Hydrogen in an Existing Distribution Network", 2018.
- [62] Livia Beier und Christian Bantle, "„Wie heizt Deutschland?“ (2023) - Langfassung -", *BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. Reinhardtstr. 32 10117 Berlin*, 2023.
- [63] Dr.-Ing. Rolf Albus, "Technische und planerische Herausforderungen bei der Marktraumumstellung", 2016. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/VortraegeVeranstaltungen/MRU/GWI_MRUApril2016.pdf?__blob=publication-File&v=1

- [64] "ERHEBUNGEN DES SCHORNSTEINFEGERHANDWERKS", *BUNDESVERBAND DES SCHORNSTEINFEGERHANDWERKS – ZENTRALINNUNGSVERBAND (ZIV)*, 2023.
- [65] Christiane Hewner, *H2Skills Fachkräftebündnisübergreifendes Projekt zur Fachkräftesicherung und -entwicklung in der Wasserstoffwirtschaft im Amtsbezirk Lüneburg*. Verfügbar unter: <https://www.wasserstoff-niedersachsen.de/wp-content/uploads/2022/09/H2Skills-Bedarfsanalyse-Qualifizierung-Wasserstoff.pdf>.
- [66] "FACHKRÄFTEENTWICKLUNG AKTIVITÄTEN IM KREIS RECKLINGHAUSEN", 2022.
- [67] Manish Mittal, *Digitalization: Dealing With The Scarcity Of Manpower*. Verfügbar unter: <https://www.forbes.com/sites/forbestechcouncil/2022/03/14/digitalization-dealing-with-the-scarcity-of-manpower/>.
- [68] Anton Klaus und Ralf Beckmann, *Fachkräfteengpassanalyse 2023*. Verfügbar unter: <https://www.arbeitsagentur.de/presse/qualifizierte-fachkraefte-dringend-gesucht-engpaesse-in-183-berufen>.

11 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1:	H2Umstell-Projektstruktur	1
Abbildung 2.1:	Transformationsplan zur Umstellung eines Netzgebiets auf H ₂	2
Abbildung 2.2:	Prozessschema zur Prüfung und Nachweiserbringung der H ₂ -Tauglichkeit	7
Abbildung 2.3:	Prozessschema zur netzhydraulischen Analyse (Zielnetzplanung)	11
Abbildung 2.4:	Prozentuale Verteilung der Materialien im deutschen Gasverteilnetz	15
Abbildung 2.5:	Anzeige- und Genehmigungsverfahren bei der Umstellung von Gasleitungen auf den Wasserstofftransport	21
Abbildung 2.6:	Beispiel-Umstellbezirk	27
Abbildung 2.7:	Legende für Beschreibung der Umstellung der Leitungen	27
Abbildung 2.8:	CFD-Simulation Spülgeschwindigkeiten Wasserstoff-Erdgas	36
Abbildung 2.9:	Aufteilung HD-Verteilnetz	38
Abbildung 3.1:	Die H ₂ -Infrastruktur am GWI	41
Abbildung 3.2:	H ₂ -Speicher-Standort	42
Abbildung 3.3:	Gasdruckregelanlage-Standort	42
Abbildung 3.4:	Übergang des Leitungsverlaufs	43
Abbildung 3.5:	Vorinstallierte H ₂ -Infrastruktur	44
Abbildung 3.6:	Leitung an der Gasübergabestation zur IFT, BW, Demo-Haus	44
Abbildung 3.7:	Entnahmestelle Bildungswerk	45
Abbildung 3.8:	Leitungsführung unterirdisch zum Demo-Haus und HySpeed-Forschungscontainer	45
Abbildung 3.9:	Aufstellort Hyspeedcontainer/Gasdruckregelstation	46
Abbildung 3.10:	Unterirdisch ausgeführte Hauseinführung ins Demo-Haus	46
Abbildung 3.11:	Hauseinführung und Hausinstallation	47
Abbildung 3.12:	Einzel abrechenbare Geräteanschlussleitungen	48
Abbildung 3.13:	100-Vol.-%-H ₂ -Gerät/ Abluftventilatoren und Gaswarnsensor	48
Abbildung 3.14:	Tableau der Gaswarnanlage	49
Abbildung 3.15:	Versuchsaufbau Versuch AP 2-1	51
Abbildung 3.16:	Versuchsaufbau Versuch AP 2-2	52
Abbildung 3.17:	Versuchsaufbau Versuch AP 2-3	53
Abbildung 3.18:	Versuchsaufbau Versuch AP 2-4	53
Abbildung 3.19:	Messergebnisse AP 2-1	54
Abbildung 4.1:	Schaubild des Versuchsaufbaus AP3-1 bis AP 3-4	68
Abbildung 4.2:	Messergebnisse AP 3-1	71
Abbildung 4.3:	Messwerte AP 3-2	72
Abbildung 4.4:	Messwerte AP 3-3	73
Abbildung 4.5:	Messwerte AP 3-4	74
Abbildung 4.6:	Messewerte Versuch AP 3-5 Volllast	75
Abbildung 4.7:	Messwerte AP 3-5 Teillast 80%	75
Abbildung 4.8:	Messwerte AP 3-5 Teillast 11%	76
Abbildung 5.1:	Vorgehen bei der Geräteerhebung im Umstellprojekt H2-Insel Öhringen ..	85
Abbildung 5.2:	Vorgehen bei der Umstellung im Umstellprojekt H2-Insel Öhringen	85
Abbildung 5.3:	Gesamtprozess der Umstellung, laut DVGW-Regelwerk	95
Abbildung 5.4:	Umstellprozess Gasverteilnetze, laut DVGW-Regelwerk	96
Abbildung 5.5:	Umstellprozess Gashausinstallationen, laut DVGW-Regelwerk	97
Abbildung 5.6:	Umstellprozess industrielle Gasanwendungen	98

Abbildung 7.1:	Prognose des Bedarfs an Qualifizierung in der Wasserstoffwirtschaft	103
Abbildung 7.2:	Fachkräftelücke in einer grünen Wasserstoffwirtschaft.....	108
Abbildung 7.3:	Planungs- und Genehmigungsverfahren für Wasserstoff-Neubau- projekte im Fernleitungsnetzbereich	110
Abbildung 7.4:	Planungs- und Genehmigungsverfahren für Wasserstoff- Umstellungsprojekte im Fernleitungsnetzbereich	111
Abbildung 7.5:	Die Gesamtlänge der deutschen Transport- und Verteilungsleitungen	112
Abbildung 7.6:	Geschätzter Zeitaufwand für die Umstellung von Gashausesanschlüssen und Gasinstallationsleitungen im Vergleich zu Monteuren in Deutschland	113
Abbildung 7.7:	Schätzung der benötigten Zeit im Vergleich zu Monteur für ganz Deutschland (Etagenheizung mit Durchschnitt 3 Stockwerken)	115
Abbildung 7.8:	Schätzung der benötigten Zeit im Vergleich zu Monteur für ganz Deutschland (Etagenheizung mit Durchschnitt 5 Stockwerken)	115
Abbildung 7.9:	Schätzung der benötigten Zeit im Vergleich zu Monteur für ganz Deutschland (Etagenheizung mit Durchschnitt 7 Stockwerken)	116
Abbildung 7.10:	Schätzung der durchschnittlichen Zeit, die in Deutschland für den Austausch von Gasfeuerungsanlagen zur Umstellung von Erdgas auf Wasserstoff benötigt wird	117
Abbildung 8.1:	Umstellprozess Gasverteilnetze, Optimierungspotenziale	125
Abbildung 8.2:	Umstellprozess Gashausesinstallationen, Optimierungspotenziale	127

12 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Modellierungsannahmen zur Wasserstofftauglichkeit der Rohrleitungsmaterialien im Vergleich zum DVGW-Projekt „Roadmap Gas 2050“ [11].	16
Tabelle 3.2: Referenzprojekte für die Umstellung von Hausanschlüssen	59
Tabelle 6.3: Mögliche Verunreinigungen im Verteilnetz während und nach der Umstellungsphase	100
Tabelle 6.4: Mögliche Komponenten von Rohrleitungssystemen und die Entfernung von Komponenten	102
Tabelle 7.5: Übersicht über die Bereiche der Wasserstoffwertschöpfungskette [53]	105
Tabelle 7.6: Gesamtsystemintegration [51]	105
Tabelle 7.7: Leitungsgebundene Infrastruktur [51]	106
Tabelle 7.8: Stationäre Anwendungen [51]	107

Anhang

H₂-Reinheit bzw. Verunreinigungen

Industriell produzierter Wasserstoff weist niedrige Konzentrationen verschiedener Nebenbestandteile auf, darunter Stickstoff (N₂), Sauerstoff (O₂), Wasser (H₂O), Kohlenstoffmonoxid (CO), Kohlenstoffdioxid (CO₂), Kohlenwasserstoffe (KW) sowie Edelgase. Solche Verunreinigungen in gasförmigen Substanzen werden in Volumenanteilen in der Einheit ppm (part per million) ausgedrückt, wobei dies als Stoffmengen- oder Molanteil zu verstehen ist (Vol.-ppm). Die Konzentration der Nebenbestandteile hat Auswirkungen auf den Reinheitsgrad des Wasserstoffs, der wiederum die Grundlage für die Klassifizierung in die sogenannten Wasserstoff-Kategorien bildet.

Die Kategorien werden basierend auf Reinheitsgrad und Aggregatzustand differenziert. Die in der Praxis gegenwärtig am häufigsten verwendeten Wasserstoff-Kategorien sind Wasserstoff 3.0, der einen Reinheitsgrad von $\geq 99,9$ % aufweist, und Wasserstoff 5.0, der einen Reinheitsgrad von $\geq 99,999$ % besitzt.

Der Reinheitsgrad steigt kontinuierlich mit zunehmender Kategorie. Die Namensgebung basiert auf der Anzahl der Ziffern, einschließlich der Dezimalstellen. Beispielsweise besteht die aktuell höchste Reinheitsstufe, Wasserstoff 7.0, aus insgesamt sieben Ziffern: 99,99999 %. Wenn heute eine bestehende Erdgasleitung auf Wasserstoff umgestellt wird, muss ein größeres Gasvolumen im Verhältnis zu Erdgas transportiert werden, da der volumetrische Brennwert von Wasserstoff um ca. 2/3 geringer ist als der von Erdgas. Nach einer Umstellung der Leitung können mit reinem Wasserstoff etwa 80 % der zuvor mit Erdgas transportierten Energiemenge übertragen werden [1]. Voraussetzung ist, dass der Maximaldruck eingehalten wird, aber die Fließgeschwindigkeit entsprechend erhöht ist. **Basierend darauf wurde Wasserstoff als eine neue, 5. Gasfamilie mit zwei Qualitätsstufen (Gruppe A: ≥ 98 Mol-% und Gruppe D: $\geq 99,97$ Mol-%) in das Arbeitsblatt des DVGW [2] integriert.**

Die Anforderungen an die Qualität von Wasserstoff bringen die Gasindustrie vor völlig neue Herausforderungen. Einerseits ist für sensible Anwendungen wie die Mobilität und die damit verbundenen PEM-Brennstoffzellen hochreiner Wasserstoff erforderlich (Gruppe D). Andererseits können Brenner in Branchen wie Kalk- oder Zementwerken problemlos mit einem Gemisch aus H₂/Erdgas versorgt werden. Dieser Spagat bezüglich der notwendigen Gasqualität erfordert eine Einschätzung der einzelnen Bestandteile der gesamten Wertschöpfungskette hinsichtlich ihres Einflusses auf die Wasserstoffbeschaffenheit sowie eventuell notwendiger Aufbereitungsschritte [2].

Gemäß den Angaben im Arbeitsblatt DVGW G260 [3] wird die Reinheit von Wasserstoff in zwei Gruppen unterteilt: Gruppe A und Gruppe D. Um den akzeptablen Gehalt an Wasserstoffverunreinigungen für verschiedene Industriezweige anhand der Spezifikationen für die Gruppen A und D bewerten zu können, ist es entscheidend, die erlaubten Verunreinigungsgrade innerhalb jeder Gruppe zu kennen. Die Gruppenbezeichnungen entsprechen den Bezeichnungen der verschiedenen Grade in **ISO 14687:2019**.

Tabelle 9 zeigt die Grenzwerte für Gasbestandteile und Begleitstoffe im Wasserstoff für die Gruppen A und D [3]. Wie aus Tabelle 9 ersichtlich ist, hat die Gasgruppe A sehr ähnliche Grenzwerte wie die 2. Gasfamilie (Erdgas).

Tabelle 9: Grenzwerte für Gasbestandteile und -begleitstoffe 5. Gasfamilie in Wasserstoff [3]

Parameter	DVGW G 260 H ₂ , Gruppe A	DVGW G 260 H ₂ , Gruppe D
Wasserstoff	≥ 98 mol-%	≥ 99,97 mol-%
Nicht H ₂ -Gase		300 µmol/mol
Wasser	200 bzw 50 mg/m ³	5 µmol/mol
NMKW	-	2 µmol/mol
Methan		100 µmol/mol
KW-Kondensationspunkt	-2°C bei 1 bis 70 bar	-
Sauerstoff	0,001 mol-% / 1 mol-%	5 µmol/mol
Helium		300 µmol/mol
Stickstoff		300 µmol/mol
Argon		300 µmol/mol
Kohlenstoffdioxid	2,5 / 4 mol-%	2 µmol/mol
Kohlenstoffmonoxid	0,1 mol-%	0,2 µmol/mol
Gesamt-Schwefel	10 mg/m ³ (mit Odorierung)	0,004 µmol/mol ¹¹
H ₂ S, COS als S	5 mg/m ³	siehe Gesamt Schwefel
HCHO		0,2 µmol/mol
HCOOH		0,2 µmol/mol
Ammoniak	10 mg/m ³ (NH ₃ + Amine)	0,1 µmol/mol
Halogenverbindungen		0,05 µmol/mol
Nebel, Staub, Flüssigkeit		1 mg/kg
Flüchtiges Gesamtsilizium	0,3 oder 1,0 mg Si/m ³	-

Quellen der H₂-Verunreinigungen

Es gibt drei potenzielle Quellen für Verunreinigungen im Wasserstoff:

- die Herstellung von Wasserstoff,
- die Speicherung des Wasserstoffs, und
- der Transport des Wasserstoffs.

Diese Quellen bleiben auch nach der Umstellung und "Stabilisierung" der integrierten Infrastruktur bestehen. Daher müssen diese drei möglichen Quellen von Verunreinigungen langfristig bei der Bewertung eventuell erforderlicher Aufbereitungsschritte berücksichtigt werden.

In allen drei Szenarien können spezielle Betriebsvorgänge wie Spülungen, Reinigungen und Inertisierungen zu einer Einbringung von Komponenten in den Wasserstoff führen. Diese potenzielle Einbringung von Komponenten ist nicht system- oder verfahrensbedingt und kann beispielsweise durch technische Maßnahmen verhindert oder minimiert werden.

Im Folgenden sind einige grundlegende Aussagen zum Eintrag von NebenkompONENTEN in den Wasserstoff zusammengefasst. Eine detaillierte Erläuterung erfolgt in den entsprechenden Kapiteln zu Herstellung, Speicherung und Transport von Wasserstoff [2].

Die Industrien, die am meisten von Wasserstoffverunreinigungen betroffen sind

Die Relevanz betrifft hier die Gruppe A innerhalb der neuen 5. Gasfamilie mit einem Mindestwasserstoffgehalt von 98%. Diese Qualität ist für die Mehrzahl der Wasserstoffanwendungen als Reduktionsmittel, beispielsweise in der Stahlproduktion, oder als Brennstoff, etwa bei der

Erzeugung von Prozesswärme, ausreichend. Während Verbrennungsprozesse H_2 der "geringeren" Qualität der Gruppe A akzeptieren, trifft das für Brennstoffzellensysteme nicht zu [2].

Brennstoffzellen

Die Qualität des Wasserstoffs spielt dabei eine entscheidende Rolle, da sie maßgeblichen Einfluss auf die Effizienz und Lebensdauer der Brennstoffzellen ausübt. Im Allgemeinen werden weniger Verunreinigungen im Wasserstoff bevorzugt, da dies die Auswirkungen der Verunreinigungen auf den Katalysator verringert und die Degradationsraten der Membran senkt. Daher wird eine längere Betriebsdauer erwartet [4].

Es sei darauf hingewiesen, dass es mehrere Arten von Brennstoffzellen gibt. Die Festoxid-Brennstoffzellen (SOFC) und die Protonenaustauschmembran-Brennstoffzellen (PEMFC) gehören jedoch zu den am häufigsten verwendeten [5].

- **Festoxid-Brennstoffzellen (SOFC)**

Das Vorhandensein von Schwefel, Phosphor, Silizium oder Halogeniden beeinträchtigt die Leistung von Hochtemperatur-Festoxid-Brennstoffzellen (SOFC). Ein Schwefelgehalt von < 1 ppm gilt als akzeptabel, wobei festgehalten wurde, dass bei höheren Schwefelgehalten eine Reinigung erforderlich wäre. Die Anwesenheit von Methan im Wasserstoffprodukt kann ebenfalls ein Problem darstellen, da es zur Ablagerung von Kohlenstoff führen kann. Gemäß den definierten Kriterien erfüllen Festoxid-Brennstoffzellen (SOFC) nicht die Kriterien der Gruppe A in Bezug auf die Wasserstoffreinheit. Zwar sind die Reinheitsstandards für SOFC im Vergleich zu Proton Exchange Membrane Fuel Cells (PEMFC) weniger streng, aber sie übertreffen die Spezifikationen der Gruppe A (98 %). Die erforderliche Reinheit für SOFC muss jedoch nicht unbedingt den Reinheitsstandards der Gruppe D (99,97 %) entsprechen. Folglich liegt die erforderliche Reinheit für SOFC im Bereich zwischen Gruppe A und Gruppe D [6]

- **Protonenaustauschmembran-Brennstoffzellen (PEMFC)**

Protonenaustauschmembran-Brennstoffzellen (PEMFC), sind deutlich weniger tolerant gegenüber Verunreinigungen als die anderen Endanwendungen. Die wichtigsten Verunreinigungen, die bei der PEMFC zu berücksichtigen sind, sind Kohlenmonoxid und Schwefel, die einen erheblichen Einfluss auf den Brennstoffzellenkatalysator haben, sowie die Auswirkungen von Inertgasen [6].

- **Kohlenmonoxid**

Kohlenmonoxid blockiert die Stellen auf dem Katalysator und verringert somit die Ausgangsspannung der Zelle. Besancon et. al. [37] und das US Department of Energy [38] haben die Auswirkungen von Verunreinigungen auf Brennstoffzellen untersucht. Besancon et. al. [37] fanden heraus, dass bei Anwesenheit von 9 ppm CO in der Wasserstoffzufuhr zu einer PEMFC die Zellenspannung stetig abnahm und nach 3,4 Stunden unter einen nutzbaren Wert (< 50 % der Zielspannung) fiel. Wir werden daher davon aus, dass mehr als 9 ppm CO für eine PEMFC unbrauchbar sind und eine Reinigung erforderlich ist. Bei Werten von 4,5 ppm und weniger wurde eine reduzierte Steady-State-Spannung erreicht. Eine Verringerung von 42 % im Vergleich zur Zellenspannung bei reinem Wasserstoff wurde bei 4,5 ppm CO und bei 1 ppm CO eine Verringerung um 20 % festgestellt. Bei 0,52 ppm wurde nach 76 Stunden ein wesentlich geringerer Spannungsabfall von 4,3 % festgestellt.

- **Schwefel**

Schwefel bindet sich am Platinkatalysator in einer PEMFC ähnlich wie Kohlenmonoxid, doch im Gegensatz dazu gestaltet sich die Desorption des Schwefels als äußerst anspruchsvoll [6].

Diese Schwierigkeiten führen zu einer schleichenden Anhäufung der Schwefelablagerungen, die sich im Laufe der Lebensdauer des Brennstoffzellenkatalysators verstärken.

Für PEMFCs ist demnach eine Wasserstoffqualität der Gruppe D erforderlich, was eine Reinheit von über 99,97 % bedeutet [2]. Die Spezifikationen für Brennstoffzellen sollten nicht nur Kohlenmonoxid und Schwefel abdecken, sondern auch ein breiteres Spektrum an Verunreinigungen, einschließlich H_2O , O_2 , N_2 , CO_2 , Ar, Kohlenwasserstoffe, Helium, Formaldehyd, Ameisensäure, Ammoniak, halogenierte Verbindungen und Partikel [7]. Die Verunreinigungen von Wasserstoff sollten die Wasserstoffgruppe D nicht überschreiten (siehe Tabelle 9).

Verwendung von Wasserstoff in der Elektronikindustrie

Wasserstoff (H_2) wird in großem Umfang für die Elektronikfertigung in den Bereichen Halbleiter-, Display-, LED- und Photovoltaik-Anwendungssegmenten. Eine neue Anwendung von Wasserstoff in der Halbleiterindustrie ist die Extrem-Ultraviolett-Lithographie (EUV). Lithografie ist der Prozess, bei dem das Muster für Halbleiterchips von einer Vorlage Maske auf den Siliziumwafer übertragen wird, mit Hilfe von Licht. Bei der EUV-Lichterzeugung werden Zinntropfen mit einem Laser beschossen, der Zinntropfen mit einem Laser beschossen, der sie zur Abgabe von UV-Licht veranlasst. Dies führt zu unerwünschten Ablagerungen von Zinntrümmern im Lichtkollektor, und die Kammer muss regelmäßig gereinigt werden [8]. Daher sollte die Wasserstoffreinheit genauso hoch sein wie für die Brennstoffzellen, und die Spezifikationen für Verunreinigungen in Wasserstoff für elektronische Anwendungen, einschließlich H_2O , O_2 , N_2 , CO , CO_2 und Gesamtkohlenwasserstoffe, müssen genauso streng sein wie diejenigen, die für Wasserstoff für PEM-Brennstoffzellenfahrzeuge gelten (Wasserstoffgruppe D) [7].

Chemie und Petrochemie Industrie Branchen

Auch die Wasserstoffversorgung eines Chemiebetriebs erfordert mindestens die Wasserstoffqualität der Gruppe D. Es besteht ein erheblicher Bedarf an Wasserstoff als Rohstoff für Produktionsprozesse in der chemischen Industrie [2]. Da Wasserstoff beispielsweise in der Raffinerieindustrie zur Entfernung von Verunreinigungen wie Schwefel, Stickstoff und Metallen aus Rohölfractionen durch Prozesse wie Hydrotreating verwendet wird, wird die Reinheit von Wasserstoff zu einem wichtigen Parameter [9].

Industrielle Feuerungsanlagen

Detaillierte Untersuchungen zu den genauen Qualitätsanforderungen industrieller Feuerungsanlagen stehen derzeit noch aus. Grundsätzlich gelten die Anforderungen aus den Projekten des DVGW zur Gasbeschaffenheit auch für Wasserstoff, wobei eine maximale Schwankungsbreite von 2 % des Wobbeindex vorgeschlagen wird. Im Vergleich zur chemischen Industrie sind die Anforderungen an Feuerungsanlagen weniger spezifisch: Gegenwärtig wird angenommen, dass die Gruppe A nach G 260 eine ausreichende Qualitätsanforderung darstellt. Es ist zu berücksichtigen, dass insbesondere Anteile wie CO_2 oder N_2 für die Prozesse unbedenklich sind, und Wasserdampf stellt ebenfalls keine kritische Komponente dar. Schwefelbestandteile sollten in einem Maß auftreten, das entweder dem von Erdgas entspricht oder geringer ist, da in diesem Bereich ausreichende Erfahrungen im Umgang mit Schwefelbestandteilen vorhanden sind [2].

Grundsätzlich kann festgehalten werden, dass Feuerungsprozesse wenig spezifisch auf einen bestimmten Wasserstoffanteil im Erdgas reagieren. **Eine stabile Gasbeschaffenheit ist wichtiger als äußerst hohe Reinheitsanforderungen. Industrielle Feuerungsanlagen und Beheizungsprozesse können auch erfolgreich auf beispielsweise einen 75%igen Wasserstoffanteil umgestellt werden, reagieren jedoch** empfindlich auf starke Schwankungen. Um eine möglichst einheitliche Wasserstoffversorgung zu gewährleisten, wird jeweils die Gruppe A als mögliche Wasserstoffqualität angegeben. Dies deckt sich auch mit dem EASEE-

Gas CBP. Die Reinheitsanforderungen an zusätzliche Bestandteile sind je nach Produkt deutlich spezifischer, sollten sich aber mit den derzeitigen Reinheitsanforderungen an das Erdgas decken [2]. Beispielhaft zeigt Tabelle 10 einige Industriezweige und ihre entsprechenden Gasqualitäten für Feuerungsprozesse. Es ist zu erkennen, dass die Menge und Art der Verunreinigungen vergleichbar mit Erdgas sind und sich im Bereich des Wasserstoffgases der Gruppe A bewegen (siehe Tabelle 9).

Tabelle 10: Wasserstoffqualität in industriellen Feuerungsprozessen [2]

Anlagentyp	Qualität	Verunreinigungen	Besonderheiten
Glas/ Keramik	ISO Grade A oder schlechter/ DVGW G260 Gruppe A	Vergleichbar zu Erdgas	Sensibel auf Schwankungen, Wobbeschwankungen möglichst kleiner 2 %
Nichteisenmetalle	ISO Grade A oder schlechter/ DVGW G260 Gruppe A	Vergleichbar zu Erdgas	Sensibel auf Schwankungen, Wobbeschwankungen möglichst kleiner 2 %
Stahl	ISO Grade A oder schlechter/ DVGW G260 Gruppe A	Vergleichbar zu Erdgas	Sensibel auf Schwankungen, Wobbeschwankungen möglichst kleiner 2 %
Papier	ISO Grade A oder schlechter/ DVGW G260 Gruppe A	Vergleichbar zu Erdgas	Schwankungen einschränken, möglichst kleiner 2 % Wobbe
Kesselanlagen	ISO Grade A oder schlechter/ DVGW G260 Gruppe A	Vergleichbar zu Erdgas	Schwankungen einschränken, möglichst kleiner 2 % Wobbe
Sonstige Industrie (Trocknungsanlagen, Krematorien u.ä.)	ISO Grade A oder schlechter/ DVGW G260 Gruppe A	Vergleichbar zu Erdgas	Schwankungen einschränken, möglichst kleiner 2 % Wobbe

Häusliche und gewerbliche Heizgeräte

Haushalts- und gewerbliche Heizgeräte zeigen im Allgemeinen eine robuste Reaktion gegenüber Schwankungen in der Gaszusammensetzung. Sie zeichnen sich durch eine reine Beheizungsfunktion aus, ohne direkten Kontakt zu Produkten oder ähnlichem, und sind daher wenig sensibel hinsichtlich der Beschaffenheit des Brenngases. Durch die Fortschritte in Projekten wie Hy4Heat in Großbritannien, in denen Wasserstoffanwendungen in größerem Umfang eingesetzt werden, dienen die Beschaffenheitsspezifikationen von Hy4Heat (Tabelle 11) als eine gute Orientierung für die Anforderungen an Heizgeräte. Es wird festgestellt, dass die erforderliche Wasserstoffreinheit für Heizgeräte und die Menge der zulässigen Verunreinigungen im Wasserstoffgas der Wasserstoffqualität der Gruppe A entsprechen. Bei Heizkesseln sollten die Verunreinigungen weder den Säuregrad oder die Viskosität des Kondensats beeinflussen noch die die Integrität oder den Betrieb der Wärmetauscher [6].

Tabelle 11: Die empfohlene Zusammensetzung des Brenngases im Rahmen des Hy4Heat-Projekts in Großbritannien [6]

Komponenten	Wert	Erklärungen
Wasserstoff (mindestens)	98 mol-%	Kompromiss aus Kosten und Performance
CO	20 (μmol/mol)	Basiert auf Produktionsgrenzwert aus dem Reforming
H ₂ S	≤ 5 mg/m ³ , 3,5 ppm (μmol/mol)	Komponentenschutz aus GSMR:1996
Gesamt-Schwefel	≤ 50 mg/m ³ , 35 ppm (μmol/mol)	
Sauerstoff	≤ 0,2 mol-%	
Taupunkt Kohlenwasserstoffe	-2 °C	GSMR:1996 und EASEE-gas
Taupunkt Wasser	-10 °C	
Methan, Kohlenstoffdioxid, CO ₂ , Kohlenwasserstoffe	≤ 1 % mol-%	
Summe Argon, Stickstoff, Helium	≤ 2 % mol-%	Vermeidung von Transportkosten durch höhere inerte Anteile (ISO 14687-2019) und zur Limitierung von Wobbe-Schwankungen
Wobbe Band	42 – 46 MJ/m ³	
Verunreinigungen		Das Gas sollte keine festen, flüssigen oder gasförmigen Bestandteile enthalten, welche den sicheren Betrieb von Leitungen und Endanwendung gefährden.

Gasturbinen und Gasmotoren

Gasturbinenbrenner reagieren empfindlich auf Schwankungen in der Gaszusammensetzung. Daher ist es wichtiger, die maximale Schwankungsbreite zu definieren, als die genaue Zusammensetzung. Derzeit wird eine zulässige Schwankungsbreite von +/- 5 % Wobbe angenommen. Der Wasserstoffanteil basiert dabei auf der Gruppe A. Die gleichen Voraussetzungen für Verunreinigungen gelten wie für Erdgas [2].

Stationäre Gasmotoren zeigen eine relative Robustheit gegenüber Schwankungen des Wobbe-Werts und des Heizwerts. Grundsätzlich ist, wie bei allen Verbrennungsprozessen, die konstante Gasbeschaffenheit wichtiger als die genaue Zusammensetzung. Daher bietet auch hier die Qualität der Gruppe A eine gute Richtlinie.

Tabelle 12 fasst die Anforderungen für stationäre Motoren zusammen. Die gleichen Voraussetzungen für Verunreinigungen gelten wie für Erdgas [2].

Tabelle 12: Wasserstoffqualität für Gasmotoren [2]

Parameter	Fenster min – max	Anmerkungen
Heizwert- und Wobbe-Schwankung	+/- 5%	Ggf. muss die Änderungsgeschwindigkeit definiert werden
CO, CH ₄ , CO ₂ , N ₂ , Kohlenwasserstoffe		Keine Auswirkungen zu befürchten, solange Wobbe- und Heizwert eingehalten werden

Schwefel	Vergleichbar zu Erdgas	
Taupunkt Wasser/ Kohlenwasserstoffe	Vergleichbar zu Erdgas	
Staub/ Partikel	Vergleichbar zu Erdgas	
Andere	Vergleichbar zu Erdgas	

Sowohl bei Gasmotoren als auch bei Gasturbinen sind die wichtigsten zu berücksichtigenden Verunreinigungen Wasser, O₂, Co, S, N₂. Die Mengen an Verunreinigungen sollten die zulässigen Verunreinigungen der Gruppe A nicht überschreiten (siehe Tabelle 9).

Überblick über den Energiebedarf der verschiedenen Sektoren und ihre Anforderungen an die Wasserstoffqualität

Von technischer Seite aus betrachtet besteht für empfindliche Systeme, wie zum Beispiel katalytische Systeme, die Fähigkeit, "Verunreinigungen" im Wasserstoff zu akzeptieren. Dies bezieht sich nicht auf Katalysatorgifte, sondern beispielsweise auf Stickstoff oder erhöhte Wasserkonzentrationen. Unter technischen Gesichtspunkten ist somit die Möglichkeit gegeben, eine "katalytische", mittlere Wasserstoffqualität zu nutzen. In der Tabelle wird beispielhaft eine Qualität von 99 mol-% angenommen [2].

Die üblichen Verunreinigungen in Gasverteilnetzen sind besonders relevant für die Anwendung von Wasserstoff in Brennstoffzellen. Kontaminationen wie Schwefel, Ammoniak, höhere Kohlenwasserstoffe und verschiedene Halogene können zu dauerhaften Schäden an Brennstoffzellen führen, da beispielsweise die Elektroden oder Membranen der Brennstoffzellen durch elementaren Schwefel oder Schwefelverbindungen angegriffen werden können [10]. Neben den schädlichen Auswirkungen auf die Brennstoffzellenanwendung muss stets die stoffliche Verwendung von Wasserstoff in der (chemischen) Industrie berücksichtigt werden, da sie spezifische Anforderungen an die Reinheit stellt [11].

Diese Möglichkeit betrifft vom technischen Standpunkt aus beispielsweise PtX-Prozesse, Prozesse der chemischen Industrie und auch Brennstoffzellen [2].

Tabelle 13: Gegenüberstellung von abgeschätzter Wasserstoffnachfrage und unterschiedlicher Wasserstoffqualitäten [2]

		H ₂ -Nachfrage (dena 2021) in TWh	Gruppe A ≥ 98 mol- % H ₂ „geringe“ Qua- litätsanforderung	≥ 99 mol-% H ₂ „mittlere“ Quali- tätsanforderung	Gruppe D ≥ 99,97 mol-% H ₂ „hohe“ Qualitätsanforde- rung
Gebäude		78	(✓)	(✓)	✓
Energie		128	(✓)	(✓)	✓
Verkehr		59	(✓)	(✓)	✓
PtX		58	-	(✓)	✓
Industrie (Bei- spiele)		191			
	Steine & Erden		✓	(✓)	✓
	Papier		✓	(✓)	✓
	Glas & Keramik		(✓)	(✓)	✓
	Eisen & Stahl		(✓)	(✓)	✓
	(Petro-) Chemie		-	(✓)	✓

Die mögliche Eignung dieser Wasserstoffqualität, die durch Klammern gekennzeichnet ist, verdeutlicht, dass in diesem Fall die Tauglichkeit von der Art der Komponenten im Wasserstoff und der Art der Nutzung abhängt.

Auswirkungen von Verunreinigungen auf Endverbraucher

In diesem Abschnitt werden vorläufig akzeptable Werte ausgewählter Verunreinigungen für verschiedene Endanwendungen beschrieben. Verschiedene Anwendungen wurden gemäß ISO 14687 berücksichtigt und der Einfluss von Verunreinigungen auf die verschiedenen Anwendungen ist in den folgenden Tabellen dargestellt. Grün bedeutet, dass dieser Verunreinigungsgrad keine negativen Auswirkungen hat, Gelb bedeutet, dass die Leistung beeinträchtigt ist, und Rot bedeutet, dass die Auswirkung inakzeptabel ist [6].

- **Kohlenmonoxid:**

Tabelle 14: Auswirkungen von Verunreinigungen auf Endverbraucher – Kohlenmonoxid [6]

CO Gehalt (ppm)	Kessel	Herde	Stationäre PEM-Brennstoffzelle	Fahrzeug-PEM-Brennstoffzelle
0,2				
10			Katalysatorgift	
100				
1000	15-Minuten-Belastungsgrenze			
>1000				

- **Wasser:**

Tabelle 15: Auswirkungen von Verunreinigungen auf Endverbraucher – Wasser [6]

H ₂ O Gehalt (ppm)	Kessel	Herde	Stationäre PEM-Brennstoffzelle	Fahrzeug-PEM-Brennstoffzelle
5				
60				K ⁺ /Na ⁺ membrane harm
370	Kondensation		Kondensation	
>370	Kondensation und Korrosion über -10 °C			

Bei Heizkesseln, Herden und stationären Brennstoffzellen darf während des Betriebs kein Wasser im Gerät kondensieren Temperaturen, daher wird hier keine weitere Grenze angenommen [26]. Wasser selbst hat keinen nennenswerten Einfluss auf Brennstoffzellen, es sei denn, K⁺ und Na⁺ Ionen sind im Wasser gelöst.

K⁺ und Na⁺ Ionen verunreinigen die Protonenaustauschmembran und sind durch die ISO 14687-Spezifikation auf 0,05 ppm begrenzt. Die ISO 14687-Spezifikation schlägt daher einen Grenzwert von 5 ppm für Fahrzeug-PEMFC und für nicht kondensierendes Wasser bei allen Umgebungstemperaturen für stationäre PEMFC vor [6].

- **Kohlenstoffdioxid:**

Tabelle 16: Auswirkungen von Verunreinigungen auf Endverbraucher – Kohlenstoffdioxid [6]

CO ₂ Gehalt (ppm)	Kessel	Herde	Stationäre PEM-Brennstoffzelle	Fahrzeug-PEM-Brennstoffzelle
2				
0,5 x 10 ⁴				Wasserstoffverdünnung
2,5 x 10 ⁴	Erhebliche Wasserstoffverdünnung und Effizienzverlust sowie CO ₂ -Emissionen			
>2,5 x 10 ⁴			Umstellung auf CO	

In der Spezifikation ISO 14687 für Brennstoffzellen ist ein CO₂-Grenzwert von 2 ppm festgelegt. In der Tabelle ist auch vermerkt, dass über 2,5 mol-% CO₂, Kohlenstoffdioxid katalytisch in CO umgewandelt werden und den PEMFC-Katalysator vergiften kann [6].

- **Methan:**

Tabelle 17: Auswirkungen von Verunreinigungen auf Endverbraucher – Methan [6]

CH ₄ Gehalt (ppm)	Kessel	Herde	Stationäre PEM-Brennstoffzelle	Fahrzeug-PEM-Brennstoffzelle
100				
1 x 10 ⁴				
5 x 10 ⁴				
>5 x 10 ⁴				

Nach der Spezifikation ISO 14687 wird Methan in Brennstoffzellen als inertes Gas bezeichnet, das den Wasserstoff durch Verdünnung beeinflusst. Sowohl für stationäre als auch für tragbare Emissionsmesssysteme (PEMS) in Fahrzeugen gilt ein Grenzwert von 100 ppm für Methan. In Verbrennungsanwendungen kann Methan zusammen mit Wasserstoff verbrannt werden, jedoch können erhöhte Methankonzentrationen alternative Brennerkonstruktionen erforderlich machen. Bei sehr hohen Methanwerten ist Vorsicht geboten, da der Verbrennungsprozess zur Bildung von Kohlendioxid führt [6].

- **Inerte Gase:**

Tabelle 18: Auswirkungen von Verunreinigungen auf Endverbraucher – Inertgase [6]

Inerte Gehalt (ppm)	Kessel	Herde	Stationäre PEM-Brennstoffzelle	Fahrzeug-PEM-Brennstoffzelle
300				
1000				Wasserstoffverdünnung
>1000	Wasserstoffverdünnung und erheblicher Effizienzverlust			

Inerte Verbindungen wirken sich auf Brennstoffzellen und Verbrennung nur durch die Verdünnung des Wasserstoffstroms aus. Die ISO 14687-Spezifikation begrenzt diese auf 1000 ppm für stationäre Anwendungen und 300 ppm für Fahrzeug Anwendungen. Höhere Konzentrationen von Inertgasen können zu einer Verringerung des Systemwirkungsgrads führen und Fehlfunktionen verursachen in Sensoren und Teilsystemen, die den Betrieb überwachen und steuern [12]. Ein hoher Gehalt an Inertgasen in den Flammen muss bei der Konstruktion der Brenner berücksichtigt werden [6].

- **Sauerstoff:**

Tabelle 19: Auswirkungen von Verunreinigungen auf Endverbraucher – Sauerstoff [6]

O ₂ Gehalt (ppm)	Kessel	Herde	Stationäre PEM-Brennstoffzelle	Fahrzeug-PEM-Brennstoffzelle
5				
50				
5x10 ⁴			Degradation	
> 5x10 ⁴	Risiko der Entzündung			

Die Norm ISO 14687 beschränkt den Sauerstoffgehalt auf 50 ppm für stationäre PEMFC und 5 ppm für Fahrzeug PEMFC. Die Norm stellt fest, dass niedrige Sauerstoffkonzentrationen die Funktion der Brennstoffzelle nicht beeinträchtigen. Brennstoffzellen-Energiesystems nicht beeinträchtigen, während hohe Sauerstoffkonzentrationen zu einer Verschlechterung der Brennstoffzelle führen.

Ohne die Gefahr, dass Wasser kondensiert und die Oxidation (Rostbildung) begünstigt, ist nicht zu erwarten, dass Sauerstoff keine signifikanten Auswirkungen auf Flammenkocher oder Heizkessel hat. Höhere Sauerstoffkonzentrationen bergen das Risiko, dass sich bei einer Entzündung die Flamme sich ausbreiten kann [6].

Die Grenzkonzentration von Sauerstoff für die Flammenausbreitung von Wasserstoff liegt bei 5 %, was bedeutet, dass bei Sauerstoff Konzentrationen von weniger als 5 % kann sich eine Flamme nicht durch Wasserstoff ausbreiten. Dies wird vorläufig als sichere Grenze für diesen Bericht angenommen [12].

- **Schwefel:**

Tabelle 20: Auswirkungen von Verunreinigungen auf Endverbraucher – Schwefelverbindungen [6]

Schwefel-Gehalt (ppm)	Kessel	Herde	Stationäre PEM-Brennstoffzelle	Fahrzeug-PEM-Brennstoffzelle
0,004				
1			Katalysatorgift	
>1	1 ppm 15 Minuten Expositionsgrenzwert für SO ₂			

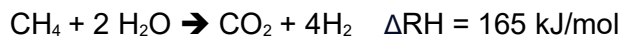
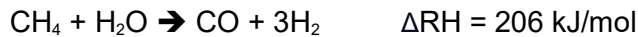
Schwefelverbindungen sind sehr schädlich für die Katalysatoren in PEM-Brennstoffzellen, wobei ein Grenzwert von 0,004 ppm in den ISO-Norm 14687 für stationäre und Fahrzeug-Brennstoffzellen. Wenn Schwefel verbrannt wird, bildet er Schwefeldioxid, das giftig ist. Der 15-Minuten-Grenzwert für Schwefeldioxid liegt bei 1 ppm [13].

Identifizierung von Verunreinigungen bei der H₂-Erzeugung

Wie in Unterabschnitt 1 erwähnt, tritt eine der Hauptursachen für Wasserstoffverunreinigungen bei der Erzeugung auf.

Wasserstofferzeugung aus fossilen Rohstoffen

Wasserstoff kann durch verschiedene Verfahren aus fossilen Energiequellen wie Erdgas, Erdöl und Kohle gewonnen werden. Bei der Dampfreformierung und autothermen Reformierung von Erdgas sowie der Kohlevergasung und partiellen Oxidation von Erdöl werden diese Ressourcen genutzt. In der Dampfreformierung von Erdgas, wie in Abbildung 1 dargestellt, wird das Erdgas zunächst durch Entschwefelung vorbereitet. Anschließend wird es zusammen mit Wasserdampf bei Temperaturen zwischen 700 und 900 °C und einem Druck von 20 bis 40 bar umgesetzt, um Synthesegas zu erzeugen, das Wasserstoff (H₂) und Kohlenmonoxid (CO) enthält.



Im abschließenden Verarbeitungsschritt erfolgt die Aufbereitung des wasserstoffreichen Synthesegases durch Druckwechseladsorption. Bei diesem Verfahren adsorbieren Restgase wie Kohlenmonoxid (CO), Kohlendioxid (CO₂) und Methan (CH₄) selektiv bei hohem Druck an Adsorbentien wie Molekularsieben oder Aktivkohle. Durch diesen Prozess kann Wasserstoff mit einer außerordentlich hohen Reinheit von bis zu 99,9999 Vol.-% erzeugt werden. [14].

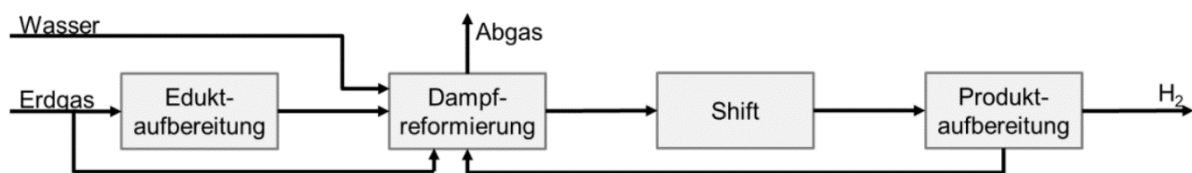


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Prozesses „Dampfreformierung“ [14]

Wasserstofferzeugung aus Wasser

Zusätzlich zu den zuvor beschriebenen Methoden bildet die elektrochemische Zerlegung von Wasser ein weiteres Gebiet der Wasserstofferzeugung. Es gibt verschiedene Elektrolyseverfahren, die im Folgenden näher erläutert werden. Die Wasserelektrolyse beinhaltet die elektrochemische Spaltung von Wasser in einem Elektrolyseur, wodurch Wasserstoff und Sauerstoff entstehen (siehe Abbildung 2).

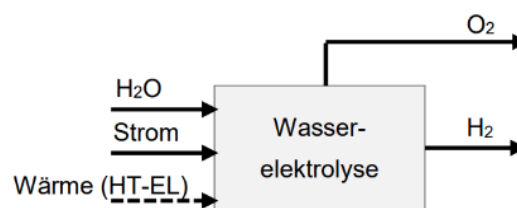


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Wasserelektrolyse [14]

Die Grundprinzipien der Reaktion sind identisch mit der reinen Wasserelektrolyse. An der Kathode entsteht molekularer Wasserstoff, während die Hydroxidionen (OH⁻) durch das Diaphragma zur Anode diffundieren und dort lokal zu molekularem Sauerstoff reagieren. Bei der Alkalielektrolyse (AEL) können Reinheitsgrade von 99,9 % Wasserstoff ohne zusätzliche Reinigungsschritte erreicht werden, und nach Trocknung und Entfernung von Sauerstoff sogar bis zu 99,999 %. Ein Nachteil der AEL besteht jedoch in dem erhöhten Wartungsaufwand aufgrund der korrosiven Eigenschaften des Elektrolyten.

Die Protonenaustauschmembran (PEM)-Elektrolyse bietet hier einen Vorteil. Im Gegensatz zur AEL wird bei der PEM-Elektrolyse kein flüssiger Elektrolyt verwendet. Stattdessen trennt eine protonendurchlässige Polymermembran die Elektroden. Mit der PEM-Elektrolyse können Reinheitsgrade von 99,99 % Wasserstoff ohne zusätzliche Gasaufbereitung erreicht werden. Nach entsprechenden Reinigungsschritten sind Qualitäten von bis zu 99,9995 % möglich. Eventuelle Verunreinigungen des erzeugten Wasserstoffs und begleitende Gase hängen stark vom spezifischen Herstellungsprozess ab und könnten grundsätzlich bei der Einspeisung in das Netz auftreten [14].

Tabelle 21 zeigt eine Übersicht der der Begleitstoffe/Verunreinigungen bei der Wasserstoffherstellung.

Tabelle 21: Übersicht der Begleitstoffe und Verunreinigungen bei der Herstellung von Wasserstoff [14]

Prozess	Begleitstoffe
Dampfreformierung	CO, CO ₂ , CH ₄ , H ₂ O
Autotherme Reformierung	CO, CO ₂ , CH ₄ , H ₂ O
Trockene Reformierung	C, CO, CO ₂ , CH ₄ , H ₂ O
Kohlevergasung	CO, CO ₂ , CH ₄ , H ₂ O, O ₂
Partielle Oxidation von Erdöl	CO, CO ₂ , H ₂ O, gesättigte-, ungesättigte und (poly-)cyclische aromatische Kohlenwasserstoffe
Erdgaspyrolyse	C, CH ₄ , gesättigte-, ungesättigte und (poly-)cyclische aromatische Kohlenwasserstoffe
Biomassevergasung	CO, CO ₂ , CH ₄ , H ₂ O, Halogenverbindungen, NH ₃ , H ₂ S
Elektrolyse (AEL, PEM, HTEly)	H ₂ O, O ₂
Chloralkalielektrolyse	H ₂ O, O ₂ , HCl

Abgesehen von den Herstellungsverfahren und den entsprechenden Prozessparametern spielen die Ausgangsstoffe eine entscheidende Rolle für die Bildung weiterer Nebenprodukte. Dadurch sind zusätzliche Spurenstoffe denkbar. Da bei der Wasserstoffherstellung der Schwerpunkt auf der Erzeugung eines möglichst reinen Produkts liegt und die Prozesse teilweise äußerst empfindlich auf Begleitstoffe reagieren, ist die Aufbereitung der Ausgangsstoffe und des erzeugten Gases unerlässlich [14].

Verunreinigungen im Netz

Identifizierung von Verunreinigungen beim Transport und bei der Verteilung

Um zu klären, ob bei der Überführung und Verteilung von Wasserstoff in umgewidmeten Erdgasnetzen die Gasqualitäten gemäß DVGW-Arbeitsblatt G 260, DIN EN 17124 und ISO 14687 erreicht werden können, ist eine detaillierte Analyse der bestehenden Verunreinigungen in Transport- und Verteilnetzen erforderlich. Neben den Verunreinigungen, die auf der Erzeugungsseite entstehen, kann die Qualität des Wasserstoffs auch negativ durch Substanzen beeinflusst werden, die sich im Netz befinden.

Durch langjährige Erfahrungen, Forschung und Entwicklungen in der Gaswirtschaft sind Verunreinigungen in Erdgasnetzen umfassend bekannt. Zu den prominentesten Vertretern gehören Stäube wie Black Powder und Rohrstaub, Flüssigkeiten aus Gasleitungen wie

Verdichteröle, Glykole, Kohlenwasserstoffe und Erdgaskondensate, schwefelhaltige Kohlenwasserstoffe aus der Gasodorierung sowie gasförmige Begleitstoffe wie H_2S . Rohstäube entstehen hauptsächlich durch Korrosion an Gasleitungen und gasführenden Bauteilen, oft in Verbindung mit Feuchte, schwefelhaltigen Substanzen und speziellen bakteriellen Spezies. Diese Stäube bestehen häufig aus Eisenoxiden, -sulfaten und -sulfiden, können jedoch auch andere mineralische Verbindungen enthalten. Durch den Transport im Netz können Rohstäube an verschiedenen Stellen abrasiv wirken [14].

Bei der Umstellung von Erdgasleitungen auf den Betrieb mit Wasserstoff ist zu erwarten, dass einige Verunreinigungen aufgrund des Wegfalls der Erdgaseinspeisung ausbleiben. Die spezifischen Umstellungsszenarien spielen hierbei eine entscheidende Rolle. Wenn die Erdgaseinspeisung gestoppt wird und Wasserstoff direkt dosiert wird, wird angenommen, dass der Wasserstoff das verbleibende Erdgas kontinuierlich verdünnt, bis es vollständig ausgetragen ist. Dieser Prozess kann je nach Gasentnahme und Netzbeschaffenheit einige Zeit in Anspruch nehmen. Währenddessen wird erwartet, dass die Konzentration von gasförmigen und kurzkettigen Kohlenwasserstoffen (C1-C6), Wasser (bei Einspeisung von trockenem H_2) und Schwefelwasserstoff kontinuierlich abnimmt und durch den Wasserstoff ausgetragen wird. Um die Konzentration von Verunreinigungen aus Kondensaten zu reduzieren, sollten diese idealerweise vor der Umstellung durch geeignete Reinigungsmaßnahmen (wie Molchung, Filterwechsel, Reinigung von Kondensatfallen und Senken) entfernt werden. Nach aktuellen Einschätzungen dauert der Austrag dieser Komponenten deutlich länger, da mit zunehmender Molekülgröße der Dampfdruck abnimmt und der Übergang in die Gasphase stärker von Temperatur und Druck abhängig ist.

Es wird erwartet, dass sich nach einer gewissen Zeit ein stabiler Zustand (netzspezifisch) einstellt, bei dem die Verunreinigungen aus dem früheren Erdgasbetrieb weitgehend ausgetragen sind und Konzentrationsschwankungen hauptsächlich auf neu eingetragene Begleitstoffe zurückzuführen sind. Dies ist stark vom jeweiligen Netz abhängig. Die Einspeisung von erzeugungsbedingten Verunreinigungen, insbesondere von Permanentgasen (N_2 , O_2 , CO , CO_2), sollte vermieden oder auf ein Minimum reduziert werden, da sie nur mit erheblichem technischen Aufwand entfernt werden können. Schwefelverbindungen sollten ebenfalls vermieden werden, obwohl der maximale Gesamtschwefelgehalt nach DVGW-Arbeitsblatt G 260 auf 10 mg/m^3 festgelegt ist. Es ist ratsam, diesen so gering wie möglich zu halten bzw. komplett zu vermeiden, um spätere dezentrale Aufreinigungsschritte (z. B. von Gruppe A zu Gruppe D) in einem wirtschaftlich vertretbaren Rahmen zu ermöglichen. Maßnahmen wie der Einsatz ölfreier Kompressoren oder die Installation von Gasfiltern können dazu beitragen, den Eintrag von Verdichterölen während des Transports, der Verteilung und der Bereitstellung von Wasserstoff zu verhindern. Bei der Planung neuer Wasserstoffnetze, die nicht auf der Umnutzung von Erdgasnetzen basieren, müssen mögliche, noch unbekannte Einträge aus Bauteilen und Werkstoffen berücksichtigt werden. Nach derzeitiger Einschätzung sollte jedoch auch in solchen Fällen die Bereitstellung von technischem Wasserstoff (Gruppe A; DVGW-Arbeitsblatt G 260) problemlos möglich sein [14].

Um mögliche Verunreinigungen bei Transport, Verteilung und Bereitstellung von Wasserstoff, beispielsweise durch Verdichteröle, zu verhindern, könnten wirkungsvolle Maßnahmen eine Umstellung auf ölfreie Kompressoren oder die Integration nachgeschalteter Gasfilter sein. Bei der Planung neuer Wasserstoffnetze liegt der Fokus nicht auf Verunreinigungen aus umgewidmeten Erdgasnetzen. Es ist jedoch wichtig, potenzielle, bisher unbekannte Einträge aus Bauteilen und Werkstoffen neu zu betrachten. Nach der aktuellen Einschätzung wird jedoch davon ausgegangen, dass die Bereitstellung von technischem Wasserstoff der Gruppe A (gemäß DVGW-Arbeitsblatt G 260) auch in diesem Kontext problemlos möglich sein wird [14].

Folgende Hintergründe hat die Farbdarstellung:

- **Rot:** Es ist ziemlich sicher anzunehmen, dass Verunreinigungen auftreten können und möglicherweise die Erreichung der Qualitätsstandards der Gruppe A oder D beeinträchtigen könnten
- **Gelb:** Aufgrund von Unsicherheiten, insbesondere hinsichtlich fehlender absichernder Kenntnisse über die zeitliche Entwicklung der Konzentration der betroffenen Komponente, ist es schwierig, genaue Vorhersagen zu treffen.
- **Grün:** Es werden keine Probleme erwartet

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Verteilung von Wasserstoff in der Qualitätsstufe A im Verteilnetz grundsätzlich machbar ist [2].

Tabelle 22: Mögliche Verunreinigungen im Verteilnetz während und nach der Umstellungsphase (Eigene Darstellung unter Berücksichtigung von DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH) [2]

		Erdgaseinführung regional unterschiedlich - zwischen '70iger bis '90iger davor Stadtgas		Gasnetz (Bestand); Erdgas+ weitere Komponenten (Odorierung, Biogas)		Neubau ohne vorgelagertes Netz	
		Grenzwert Grade A	Grenzwert Grade D	Grenzwert Grade A	Grenzwert Grade D	Grenzwert Grade A	Grenzwert Grade D
Material		Stahl		Kunststoff, Stahl		Kunststoff	
Relevante Stoffgruppen vor Umstellung	Kohlenwasserstoff						
	Wasser						
	Schwefelverbindungen						
	Inertgase + O ₂						
	CO, CO ₂ , Methan						
	Sonstiges						
Relevante Stoffgruppen nach Gleichgewichtseinstellung nach Umstellung	Kohlenwasserstoff						
	Wasser						
	Schwefelverbindungen						
	Inertgase + O ₂						
	CO, CO ₂ , Methan						
	Sonstiges						

Verunreinigungen im Wasserstoffspeicher

Unterirdische Speicherung von H_2

Bei der Lagerung von Erdgas existieren umfangreiche Erfahrungen bezüglich potenzieller Einträge von Komponenten, die in die Bewertung der Wasserstoffspeicherung einfließen können [2]. Im Zuge des Speicherprozesses können folgende Komponenten zusätzlich in den Wasserstoff gelangen:

Tabelle 23: Art und Herkunft potenzieller Verunreinigungen während der Lagerung in Kavernen und Porenspeichern [2]

Ursache	Komponenten	Wahrscheinlichkeit
Kaverne (Sole)	Wasser	Sicher
Kaverne (Sole)	Schwefelverbindungen	möglich
Kaverne (Sole)	höhere Kohlenwasserstoffe	Möglich (Blankett, Verdichter)
Kaverne (Sole)	CO ₂ , Methan	Möglich (Restgase in Kavernenwand und gelöst in Sole)
Porenspeicher	Wasser	Je nach Biologie und Geologie möglich
Porenspeicher	Schwefelverbindungen	Je nach Biologie und Geologie möglich
Porenspeicher	CO ₂ , Methan	Je nach Biologie und Geologie möglich

Das gespeicherte Gas nimmt stets Wasser auf, bis es gesättigt ist. Die Sättigung mit Wasserdampf kann durch die Speicherdauer des Wasserstoffs und die Gasdurchflussmengen beeinflusst werden, jedoch ist eine Gastrocknung unverzichtbar.

Die Verwendung von Kohlenwasserstoffen als Kompressoröl in den Kompressoren und als Dichtungsmaterial kann dazu führen, dass geringe Mengen dieser Bestandteile im Wasserstoff vorhanden sind. Das Auftreten einer erhöhten Konzentration von Kohlenwasserstoffen im Wasserstoff sollte als spezifisch für die Lagerstätte betrachtet werden, ähnlich der mikrobiologischen Aktivität (siehe unten). Es wird angenommen, dass hochreiner Wasserstoff in einem unterirdischen Gasspeicher (UGS) gelagert wird. Wenn Wasserstoff der Gruppe A-Qualität (98 mol-%) auch nur für kurze Zeiträume gespeichert werden soll, ist die Bereitstellung von Gruppe D-Qualität ohne zusätzliche Gasaufbereitung nicht realisierbar. Wenn eine Kaverne von der Verwendung von Erdgas auf reinen Wasserstoff (Gruppe D) umgestellt wird, indem Erdgas durch Sole verdrängt wird, enthält der anschließende Wasserstoff weniger Rückstände von Erdgas oder Blankett. Allerdings können in den Kavernenwänden "Taschen" existieren, in denen Erdgas oder Blankett "gefangen" sind und nicht durch Sole entfernt werden können. Reste können daher im Dachbereich verbleiben. Bei der Umstellung von ölgefüllten Kavernen auf Wasserstoff ist auch mit Ölrückständen an den Kavernenwänden zu rechnen, die in der Top-side-Anlage entfernt werden müssen, um eine Gruppe-D-Qualität zu erreichen [2].

Eine weitere der Quellen für Verunreinigungen können die Wasserstofftanks sein. Die Untersuchung der Risiken im Kontext von Wasserstofftankstellen bietet entscheidende Erkenntnisse bezüglich potenzieller Verunreinigungen und liefert somit relevante Anhaltspunkte [15].

Entfernung von Verunreinigungen aus dem Netz

Um den Transport von Wasserstoff in der normativ geforderten Gasqualität in den Netzen zu gewährleisten, ist es möglicherweise erforderlich, netzspezifische Verunreinigungen zu entfernen. Die nachträgliche (dezentrale) Abtrennung von Permanent- und Edelgasen (N_2 , O_2 , CO , CO_2 , Ar usw.) stellt bereits eine erhebliche Herausforderung dar, und die physisorptive Entfernung bei niedrigen Konzentrationen kann nur unter hohem Druck erfolgen. Daher ist es ratsam, eine zentrale Lösung zu bevorzugen und diese Verunreinigungen durch Permanentgase bereits bei der Erzeugung so weit wie möglich zu entfernen, um bei der Einspeisung mindestens die Anforderungen der Gruppe A (DVGW-Arbeitsblatt G 260) zu erfüllen [14].

Verunreinigungen durch Kohlenwasserstoffe (C1-C40) aus Kondensaten, Verdichterölen, Diesel oder restlichen Erdgaskomponenten stellen in der Regel ein vergleichsweise geringeres Problem dar. Diese können einfach und wirtschaftlich durch Adsorption an mikroporöser Aktivkohle aus dem System entfernt werden, da Aktivkohle besonders gut zur Abtrennung unpolarer Verbindungen geeignet ist. Die Adsorbierbarkeit steigt mit zunehmendem Molekulargewicht, wenn die Wasserlöslichkeit, Polarität und Flüchtigkeit der Verbindung abnehmen. Wenn dieser Reinigungsschritt unter erhöhtem Druck erfolgt (zum Beispiel an Transportleitungen oder Verdichterstationen), wird die Effektivität zusätzlich gesteigert. Neben der Entfernung von Kohlenwasserstoffen sollte auch die dezentrale Gastrocknung gut umsetzbar sein. Molekularsiebe und Zeolithe eignen sich hierbei ähnlich wie bei der Trocknung von Erdgas oder Biogas [14].

Die Entfernung von im Netz verbliebenen Schwefelkomponenten, die möglicherweise durch den transportierten Wasserstoff freigesetzt wurden, erfordert eine aufwändigere Gasreinigung. Obwohl einige Schwefelverbindungen prinzipiell auch physisorptiv mit Aktivkohle entfernt werden können, ist deren Kapazität für schlecht adsorbierende oder polare Komponenten (wie H_2S , Mercaptane, Thiophene oder Kohlenoxidsulfid) zu gering, um einen wirtschaftlichen Betrieb für diese Anwendung zu ermöglichen [14].

Um diese Herausforderung zu bewältigen, können speziell imprägnierte oder dotierte Aktivkohlen (beispielsweise mit Kaliumpermanganat, Kaliumcarbonat oder Kaliumjodid) eingesetzt werden, um diese Schlüsselkomponenten chemisorptiv zu entfernen. Zusätzlich existieren Schwefelverbindungen, die nur durch katalytische Verfahren entfernt werden können. Hierbei kommen beispielsweise Metalloxid-basierte oder Zeolithkatalysatoren zum Einsatz. Die katalytische Feinentschwefelung erfordert jedoch oft erhöhte Reaktionstemperaturen, was die Umsetzung im Netzbetrieb technisch anspruchsvoller und kostenintensiver macht. Ebenso können bei der Reaktion am Katalysator Reaktionsprodukte entstehen, die wiederum als Gasbegleitstoffe in das Netz gelangen und den Wasserstoff verunreinigen. Es ist durchaus denkbar, dass der Umfang der Gasaufbereitung nach einer gewissen Zeit deutlich reduziert werden kann [14].

Reinigungsmaßnahmen

Reinigungsmaßnahmen wie Molchungen werden üblicherweise in regelmäßigen Abständen durchgeführt, um Ablagerungen und Kondensate zu entfernen sowie den Zustand des Leitungsabschnitts zu überprüfen. Im Kontext der Umstellung von Pipelines auf Wasserstoff wird der Einsatz von Reinigungsmolchen jedoch zu einer Standardprozedur werden.

Die Analyse von Ablagerungen und Kondensaten aus den vergangenen Jahrzehnten zeigt, dass der Zustand der Transportpipelines erheblich variieren kann. Während bei Molchungen in einigen Leitungen ausschließlich trockener Feststoff entfernt wird, ergibt sich in anderen Fällen eine Flüssigmischung aus Kohlenwasserstoffen, Glykol und Wasser. Die Gründe für diese Unterschiede sind vielfältig:

- Alter der Leitungen,
- in der transportierten Gasqualität (L-Gas, Stadtgas, Speichergas aus Lagerstätte, H-Gas)
- eventuelle Zumischungen (Biogas, LPG) und
- Geometrie der Pipeline (z.B. Zahl und Alter der Düker)

Im Gegensatz zum Transportnetz kann das Verteilnetz (mit wenigen Ausnahmen) nicht durch Molchung gereinigt werden. Eine Spülung mit beispielsweise Wasser, ähnlich wie bei Abschnitten von Transportleitungen, ist ebenfalls nicht möglich, da das Wasser nicht einfach entfernt werden kann. Daher sind über längere Zeiträume, einschließlich einer Umstellungsphase, Verbindungen zu erwarten, die die Verteilung der Wasserstoff-Qualität Gruppe D erschweren. Neuere Netze könnten dies ermöglichen, wenn sie ausschließlich Gase mit wenigen Gasbeigleittstoffen transportiert haben. In der Gruppe "Sonstige" sind eher gasuntypische Verbindungen, vor allem aus Biogasanlagen, enthalten. Diese weisen im Durchschnitt einen hohen technischen Standard mit Aktivkohlefilterung auf. Dennoch zeigt sich gelegentlich, dass bestimmte Verbindungen (z.B. CS_2) diese Filter passieren und im nachgelagerten Netz nachgewiesen werden können [2].

Reinigen von Rohrleitungen

Gashochdruckleitungen mit einem Nennbetriebsdruck über 1 bar müssen so konzipiert sein, dass sie mit Molchen gereinigt werden können [16]. Die Reinigung mittels Molchens sollte idealerweise vor der Umstellung von Erdgasleitungen auf den Transport von Wasserstoff durchgeführt werden. Dies gewährleistet optimale Rahmenbedingungen für eine hohe Gasqualität des Wasserstoffs.

Um eine Grundlage zu schaffen, die Gasqualität von Wasserstoff in umgewidmeten Rohrleitungen zu bewerten, wurde eine Versuchsreihe in drei Versuchsschritten durchgeführt:

- 1) Werkstoffanalytische Untersuchung der Rohrrinnenwände auf Ablagerungen von Verunreinigungen.
- 2) Zeitstandversuch mit statischem Wasserstoffdruck über einen Zeitraum von zwei Wochen.
- 3) Strömungsdynamischer Versuch, bei dem der Wasserstoff in einem Zyklus durch das Rohrstück strömt.

Für den Versuchsschritt 1) wurden zehn Proben aus den Rohrstücken oder Ablagerungen aus Rohrstäuben entnommen. Bis zu vier verschiedene Werkstoffprüfungsverfahren wurden zur Analyse der Proben eingesetzt:

- Gaschromatographie mit flammenphotometrischem Detektor (GC-FPD) für den Nachweis von Schwefelverbindungen.
- Gaschromatographie mit Massenspektrometrie-Kopplung (GC/MS) zur Identifizierung organischer Stoffe.
- Energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDX) zur Erfassung der vorhandenen Elemente.
- Röntgendiffraktometrie (XRD) zur Identifizierung der vorhandenen chemischen Verbindungen.

Für die Versuchsschritte 2) und 3) wurde ein Aufbau in Anlehnung an die EN ISO 10715 verfolgt, die eine Probennahmerichtlinie für Erdgas bereitstellt. Zu diesem Zweck wurden die Rohre schweißstechnisch mit Kopfplatten verschlossen und Stutzen für das Anschließen weiterer Anlagenkomponenten vorgesehen [17]. Im Unterabschnitt 8.2 werden wir die unterschiedlichen Methoden der Verunreinigungsanalyse für Wasserstoff ausführlicher erläutern.

Reinheitsanalyse von Wasserstoff

Standorte der Probenahme

Während des Workshops "Wasserstoffkontaminationsdetektor", der im Juni 2014 stattfand, wurden drei potenzielle Standorte für die Probenahme identifiziert [18].

- 1- Unmittelbar nach der Gasquelle: Durch die Analyse der Probe können Verunreinigungen identifiziert werden, die auf das Herstellungsverfahren zurückzuführen sind. Der Druck an diesem Punkt ist häufig relativ niedrig.
- 2- Zwischen einigen Systemkomponenten: Eine Probenahme zwischen den Systemkomponenten könnte es ermöglichen, die Temperaturanforderungen zu lockern. Im Allgemeinen gibt es zwei mögliche Stellen: vor der Kältemaschine und nach dem Verdichter.
- 3- Direkt stromaufwärts der Zapfpistole befindet sich die Probenahmestelle. Durch eine Probenahme an dieser Position können Verunreinigungen aus allen Systemkomponenten erfasst werden, mit Ausnahme der Zapfsäulenleitung, des Schlauchs und des Zapfventils. Ein bedeutender Vorteil dieser Methode liegt darin, dass Tankstellen an verschiedenen Stellen unterschiedlich konfiguriert sind. Wenn jedoch Kraftstoff von minderwertiger Qualität analysiert wird, ist es erforderlich, dass der Tankstellenbetreiber weitere Untersuchungen durchführt, da jede der vorgelagerten Komponenten dafür verantwortlich sein kann.

Die Probenahmestelle steht unter einem Druck von bis zu 900 bar, und die Temperatur kann unter normalen Bedingungen bis zu -40°C betragen [18].

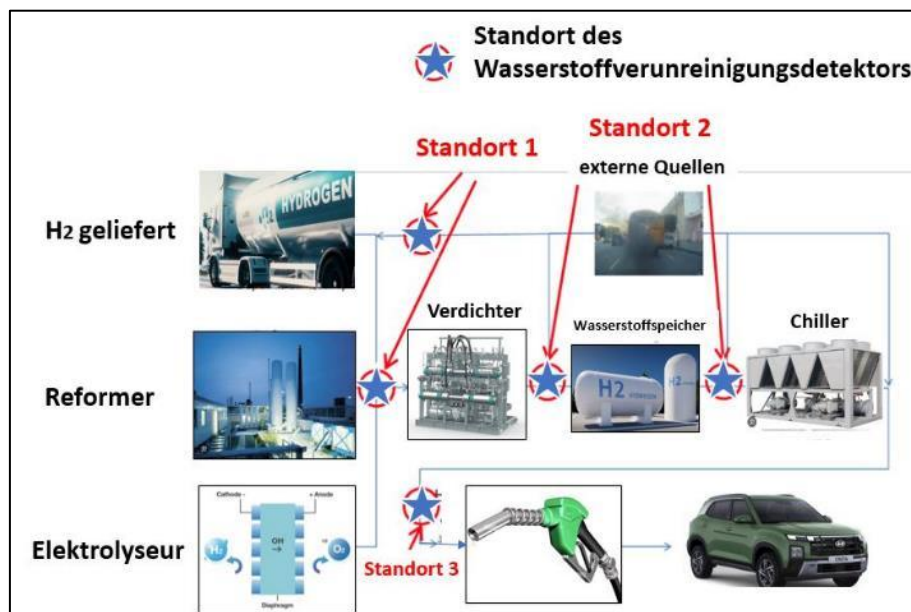


Abbildung 3: Mögliche Standorte für die Integration eines Detektors für Wasserstoffverunreinigungen an einer typischen Station [18]

Eine vergleichbare Technik kann auch für die Probenahme von Wasserstoff in Wasserstoffverteilungsnetzen angewendet werden. Dennoch erweist sich die Probenahme an Ort 3 als

die zuverlässigste Methode, die garantiert, dass die erhaltene Qualität die endgültige und unveränderliche Qualität ist.

Stand Messsystem für die H₂-Reinheitsanalytik

Die Gruppe A der Wasserstoffqualität setzt im Wesentlichen keine neuen Anforderungen an die Messtechnik, abgesehen von einigen Ausnahmen. Die angegebenen Nachweisgrenzen für die einzelnen Komponenten bleiben weiterhin leicht messbar. Es gibt jedoch bestimmte Beschränkungen, die im Folgenden näher erläutert werden [15]:

- Derzeit ist kein vorhandener PGC für Messungen in reinem Wasserstoff mit 100 % Zulassung verfügbar. Dies stellt jedoch kein Problem für Labormessungen dar.
- Geräte mit elektrochemischen Messzellen zeigen möglicherweise Schwierigkeiten bei kontinuierlichen Messungen in Wasserstoff (beispielsweise das Axel-Semrau Odor On-line-Gerät). Die Stabilität der Sauerstoffsensoren (GE-Sensor) muss ebenfalls noch getestet werden, obwohl Wasserstoff nicht als störende Komponente angegeben ist.
- Simple Sensorensysteme, wie sie typischerweise in Biogasanlagen verwendet werden, sind nicht für den Einsatz mit Wasserstoff geeignet.
- Brennwertmessungen, die auf der Wärmeleitfähigkeit basieren und gelegentlich vor Kundenanlagen durchgeführt werden, müssen entsprechend auf Wasserstoff kalibriert sein.

Die Überwachung der Wasserstoffqualität der Gruppe D gestaltet sich anspruchsvoller. Die folgenden Erläuterungen beziehen sich ausschließlich auf diese spezifische Gruppe.

Die derzeitigen Anforderungen an die Reinheit von Wasserstoff stellen eine Herausforderung für die Analytik dar. Dies liegt einerseits an der Vielzahl der zu bestimmenden Parameter und andererseits an den äußerst niedrigen Grenzwerten. Die große Bandbreite verschiedener Analyten erfordert den Einsatz verschiedener Analysemethoden. Die Notwendigkeit einer Vielzahl von Analysemethoden und die Erfordernis der Anreicherung einiger Parameter bedingen, dass eine erhebliche Probenmenge für die Analyse erforderlich ist [15]. Zusätzlich erfordern einige der zu analysierenden Komponenten aufgrund ihrer hohen Reaktivität den Einsatz von besonders passiviertem Equipment für Probenahme und Proben transport. Dies betrifft sämtliche Oberflächen, die mit der Probe in Kontakt kommen, angefangen beim Probenahmestutzen über Druckminderer und Ventile bis hin zum Probenahmegefäß, welche alle mit einer Beschichtung, wie beispielsweise Sulfinert®, versehen sein müssen. Die Probenahme kann entweder parallel während der Betankung eines Kraftfahrzeugs oder unabhängig davon durchgeführt werden [18].

Die ASTM D7606-17 bietet eine Norm für die Probenahme von hochdruckhaltigem Wasserstoff. In verschiedenen Forschungsberichten wird eine Apparatur namens HQSA (Hydrogen Quality Sampling Apparatus) zur Probenahme erwähnt [19].

Im Folgenden werden verschiedene potenzielle Analysemethoden kurz aufgeführt, ohne dabei detaillierte Verfahrensbeschreibungen anzugeben. Einige dieser Methoden waren in der Gasindustrie bisher nicht erforderlich und wurden daher nicht eingesetzt, sind jedoch in der Chemieindustrie üblich. Einige funktionieren ausschließlich in reinen Gasen wie Wasserstoff oder Stickstoff. Es sei angemerkt, dass diese Geräte bereits auf dem Markt verfügbar sind.

OFCEAS – Optical Feedback Cavity Enhanced Absorption Spectroscopy

Es handelt sich um ein optisches Verfahren, genauer gesagt um ein verstärktes Feedback-Optikresonanzsystem basierend auf Absorptionsspektroskopie. In der Regel erfolgt die Messung nach Druckreduzierung. Dieses Gerät eignet sich besonders gut für direkte Kontrollmessungen an Wasserstoff-Tankstellen. Mithilfe dieser vor-Ort-Methode können verschiedene Analyten im niedrigen ppb-Bereich präzise bestimmt werden.

Folgende Analyten können mithilfe dieses optischen Verfahrens bestimmt werden:

Stickoxid (NO), Ammonium (NH₃), Kohlenstoffmonoxid (CO), Kohlenstoffdioxid (CO₂), Chlorwasserstoff (HCl), Fluorwasserstoff (HF), Schwefelwasserstoff (H₂S), Wasser (H₂O), Sauerstoff (O₂), Methan (CH₄), Ameisensäure (HCOOH), Formaldehyd (HCHO), Schwefeldioxid (SO₂), Schwefeltrioxid (SO₃)

Es ist zu beachten, dass einige Verbindungen wie Stickstoff, Gesamtkohlenwasserstoffe und Schwefelverbindungen wie COS und Mercaptane nicht in der Liste enthalten sind, während andere Verbindungen wie NO als möglicherweise weniger relevant betrachtet werden [15].

Cavity-Ring-Down-Spectroscopy (CRDS)

Diese Messmethode wird bereits bei Geräten zur Bestimmung des Kondensationspunkts von Kohlenwasserstoffen eingesetzt. Sie kann auch vor Ort mobil verwendet werden und zeichnet sich durch eine einfache Bedienung aus. Mögliche Analyten, die mithilfe dieser Methode erfasst werden können, sind: Wasser (H₂O), Ammonium (NH₃), Kohlenstoffmonoxid (CO), Kohlenstoffdioxid (CO₂), Chlorwasserstoff (HCl), Methan (CH₄), Ameisensäure (HCOOH), Formaldehyd (HCHO).

Formal gesehen kann dieses Gerät nicht alle geforderten Parameter messen. Die Kosten für derartige Messgeräte, wenn alle Komponenten gemessen werden sollen, belaufen sich auf etwa 100 bis 150 T€. Einzelne Komponenten wie Wasser verursachen jedoch Gerätekosten von ungefähr 30 T€ [15].

Gaschromatographie

- Gaschromatographie mit Plasmadetektoren (z.B. GC/PDHID; GC/BID)

Die klassischen Prozess-Gaschromatographen haben Probleme bei der Messung einzelner Verbindungen im Spurenbereich. Erwähnt werden die geforderten 2 ppm Gesamtkohlenwasserstoffe (ohne Methan). Es werden empfindlichere Detektoren nötig. Die Methode der Gaschromatographie in Kombination mit hochempfindlicher Plasmadetektion eignet sich zur Bestimmung von:

- Methan (CH₄), o Sauerstoff (O₂), o Argon (Ar), o Stickstoff (N₂), o Kohlenstoffmonoxid (CO), o Kohlenstoffdioxid (CO₂), o Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe (NMKW).

Mittelfristig ist mit der Entwicklung von PGC mit solchen Detektoren zu rechnen [15].

- GC mit Schwefel-Chemilumineszenz-Detektion (GC/SCD)

Mittels Chemilumineszenz-Detektion lässt sich der Schwefelgehalt im niedrigen ppb-Bereich bestimmen. Durch eine gaschromatographische Trennung im Vorfeld ermöglicht die analytische Bestimmung der Einzelkomponenten (COS, CS₂, Mercaptane). Um Schwefelwasserstoff im geforderten Konzentrationsbereich (< 0,004 µmol/mol) zu analysieren, ist jedoch eine spezielle Kühlung erforderlich. Einige Hersteller bieten äußerst empfindliche Geräte an, die eher

für den Einsatz im Labor, beispielsweise als Labor-Gaschromatograph, geeignet sind. Daher müssen die Proben für die Analyse in ein Labor überführt werden [15].

- Thermodesorption-GC mit massenspektrometrischer Detektion (TD-GC/MS)

Durch Anreicherung der Komponenten auf einem Adsorbens und anschließende Thermodesorption auf die GC-Säule können niedrige Nachweisgrenzen erreicht werden. Obwohl diese Methode aufwendig ist, eignet sie sich ausgezeichnet für die Bestimmung von organischen Halogenverbindungen und Kohlenwasserstoffen [15].

- Ionen-Molekül-Reaktion-Massenspektrometrie (IMR/MS)

Diese Analysemethode ist geeignet für die Bestimmung von Wasser, Kohlenwasserstoffen (KW), Methan, Sauerstoff, Kohlenstoffmonoxid (CO), Kohlenstoffdioxid (CO₂), Ameisensäure (HCOOH), Formaldehyd (HCHO), Ammonium (NH₃) und Halogenverbindungen. Allerdings erfordert die Bestimmung der Halogenverbindungen weiterführende Untersuchungen und Optimierungen, um die geforderten Grenzwerte sicher abzudecken. Es gibt Anbieter, die mobile Messungen mit einem solchen Massenspektrometer durchführen. Dies ist insbesondere relevant im Bereich der Mikroelektronik und Reinraumüberwachung [15].

Auswahl der Analysenmethoden

In Abhängigkeit von den vorhandenen Gegebenheiten (vorhandene Ausstattung, erwartete Verunreinigungen usw.) ist die Entwicklung eines Analysenkonzepts notwendig, das mit möglichst wenigen Methoden eine sichere Detektion aller erforderlichen Analyten im geforderten Konzentrationsbereich ermöglicht. Die Festlegung des erforderlichen Reinheitsgrades von Wasserstoff für eine spezifische Anwendung (Gruppe A oder Gruppe D) und die Identifizierung der kritischen Verunreinigungen bestimmen die Messmethode für die Analyse und den Nachweis der Verunreinigungen im Wasserstoffgas. Bei der Auswahl einer zuverlässigen Methode zur Analyse von Wasserstoffverunreinigungen müssen verschiedene Faktoren in Betracht gezogen werden, darunter Genauigkeit, Beständigkeit der Genauigkeit, Wartungsanforderungen, Messunsicherheiten, Arbeitsbereiche und Kosten [15].

Die Parameter Genauigkeit und Kosten sind oft miteinander verbunden. Eine höhere Genauigkeit geht häufig mit höheren Kosten einher, daher ist es entscheidend, ein sensibles Gleichgewicht zwischen Messgenauigkeit und Erschwinglichkeit zu finden. In vielen Anwendungen ist es nicht unbedingt erforderlich, alle Verunreinigungen im Wasserstoff exakt zu quantifizieren. Es genügt oft zu wissen, ob bestimmte Verunreinigungswerte innerhalb der zulässigen Grenzen liegen. Dieser Ansatz ermöglicht es, sowohl die Investitions- als auch die Betriebskosten im Zusammenhang mit der Analyse von Wasserstoffverunreinigungen zu optimieren [20]

Gemäß DVGW G 260 hängt die Eignung der Reinheit des Wasserstoffs für eine spezifische Anwendung, die als Gruppe A oder D klassifiziert ist, davon ab, dass der Gehalt an Verunreinigungen innerhalb akzeptabler Grenzen bleibt. Sofern die Verunreinigungen sich innerhalb des zulässigen Bereichs bewegen, wird die Reinheit des Wasserstoffs als zufriedenstellend für die vorgesehene Verwendung betrachtet. Zwei mögliche Varianten sind in Tabelle 24 aufgeführt [15].

Tabelle 24: mögliche Analysemethoden zur vollständigen Abdeckung der in der DIN EN 17124 geforderten Parameter [15]

Parameter	H ₂ , PEM-Anw. DIN EN 17124, ISO/DIS 14687 (Type I/II D)	Methode I	Methode II
Wasserstoff	> 99,97 %	100 % - Summe der nicht-H ₂ -Gase	100 % - Summe der nicht-H ₂ -Gase
Nicht H ₂ -Gase	< 300 µmol/mol	Summe	Summe
Wasser	< 5 µmol/mol	OFCEAS	Taupunktspiegel
NMKW	< 2 µmol/mol	GC/BID ⁶ mit back-flush	IMR-MS
Methan	< 100 µmol/mol	OFCEAS	IMR-MS
Sauerstoff	< 5 µmol/mol	OFCEAS	IMR-MS
Helium	< 300 µmol/mol	GC/TCD ⁷	EI-MS ⁸
Stickstoff	< 300 µmol/mol	OFCEAS	EI-MS
Argon	< 300 µmol/mol	GC/TCD	EI-MS
Kohlendioxid	2 µmol/mol	OFCEAS	IMR-MS
Kohlenmonoxid	0,2 µmol/mol	OFCEAS	IMR-MS
Schwefel	< 0,004 µmol/mol	GC/SCD	TD-GC/SCD
H ₂ S, COS	-	GC/SCD (mit Kühlung)	TD-GC/SCD
HCHO	0,2 µmol/mol	-	IMR-MS
HCOOH	0,2 µmol/mol	OFCEAS	IMR-MS
Ammoniak	0,1 µmol/mol	OFCEAS	IMR-MS
Halogenverbindungen	0,05 µmol/mol	OFCEAS (HCl), TD-GCMS (R-X)	IMR-MS
Schwebstoffteilchen	1 mg/kg	Gravimetrie	IMR-MS

Die Tabelle verdeutlicht, dass die umfassende Kontrolle der Parameter der Gruppe D den Einsatz mehrerer Geräte erfordert. Aufgrund dieser Komplexität wird ein Großteil der Parameter nur stichprobenartig überprüft, während spezifische Parameter wie H₂-Konzentration, Wasser und Kohlenwasserstoffe kontinuierlich gemessen werden. Diese Vorgehensweise ähnelt der in der Gasbranche bereits beim Biogas üblichen [15]. Die Untersuchung verschiedener Verunreinigungen erfordert den Einsatz verschiedener Analysegeräte. Daher gestaltet sich ein kontinuierliches und Online-Monitoring von Verunreinigungen im Wasserstoff als äußerst komplex.

Möglichkeiten zur Wiederherstellung der geforderten H₂-Reinheit

Nach derzeitigem Kenntnisstand ist anzunehmen, dass die Wasserstoffqualität der Gruppe D nicht sofort über vorhandene Leitungen verteilt werden kann. Diese Unsicherheit betrifft insbesondere die direkte Belieferung von Wasserstoff-Tankstellen über bereits existierende Leitungen. Verteilnetzbetreiber haben die Möglichkeit, die Wasserstoffqualität der Gruppe D vor der Übergabe an den Kunden selbst zu erzeugen. Dabei müssen Komponenten entfernt werden, die (zeitlich begrenzt) von der Pipelinewandung einer bestehenden Pipeline in den Wasserstoff abgegeben werden. In der nachfolgenden Tabelle sind diese potenziellen Komponenten aufgeführt. Die Tabelle zeigt, dass eine Reinigung grundsätzlich möglich erscheint. Die erforderlichen Konzentrationen sind jedoch so gering, dass Erfahrungen zur Adsorptionskapazität und dem Durchbruchverhalten in diesem Spurenbereich noch fehlen. Dies wird

Gegenstand von Projekten in den kommenden Jahren sein, unter anderem im Rahmen des Projekts „Energiepark Bad Lauchstädt – EnergieparkBL“ [15].

Tabelle 25: Mögliche Komponenten von Rohrleitungssystemen und die Entfernung von Komponenten [15]

Komponente	Aufbereitungs- verfahren	Bemerkungen
Kurzkettige Kohlenwasserstoffe (Ethan, Propan, Butane..)	Adsorber (Aktivkohle)	
langkettige Kohlenwasserstoffe (um C 14, Verdichteröle)	Adsorber (Aktivkohle)	Glykole analog
Schwefelwasserstoff H ₂ S, Schwefel	Adsorber	Spezialadsorbent
Odoriermittel	Adsorber	Adsorptionsmittel wählbar in Abhängigkeit vom Odoriermittel

Adsorption

Adsorptive Verfahren beinhalten die Bindung von Molekülen aus der Gas- oder Flüssigphase an einer festen Oberfläche (Adsorbens). Diese Oberfläche besteht aus Makro-, Meso- und Mikroporen. Der Trenneffekt eines adsorptiven Verfahrens beruht in der Regel auf der unterschiedlich starken Wechselwirkung der Komponenten mit dem Adsorbens im Gleichgewicht, manchmal auch auf unterschiedlich schneller Adsorption (Kinetik) sowie Größenexklusion (sterisch). Alle drei Effekte müssen bei der Auslegung von Adsorptionsprozessen berücksichtigt werden. Bei der Adsorption wird Wärme freigesetzt, dies wird als Adsorptionswärme bezeichnet.

Die Physisorption (physikalische Adsorption) kann durch Desorption ohne Veränderung der adsorbierten Verbindung und des Adsorbens rückgängig gemacht werden. Bei der Temperaturwechseladsorption (temperature swing adsorption, TWA bzw. TSA) beruht die Desorption auf der Verringerung der Gleichgewichtsbeladung durch Temperaturerhöhung. Die Energie wird entweder indirekt über Heizelemente oder direkt über warmes Inertgas zugeführt. Abhängig von der thermischen Stabilität des Adsorbats können auch stark gebundene Komponenten bei hohen Temperaturen desorbiert werden. Ein wesentlicher Nachteil dieses Verfahrens ist der hohe Zeitbedarf für Heiz- und Kühlprozesse. Bei der Druckwechseladsorption (pressure swing adsorption, DWA bzw. PSA) wird der beladene Adsorber entspannt und gespült, wodurch sich die Partialdrücke der Gasbestandteile reduzieren. Die Druckreduktion führt zur Desorption durch Abgabe adsorbierter Moleküle und verschiebt das Gleichgewicht in Richtung Gasphase. Der wesentliche Vorteil dieses Verfahrens liegt in den kurzen Desorptionszeiten, die eine hohe Zyklusfrequenz ermöglichen. Ein Nachteil ist der Bedarf an elektrischer Energie für die Verdichtung während der Beladungsphase, wenn das Feedgas nicht bereits unter Druck steht. Abbildung 4 zeigt das Prinzip beider Desorptionsverfahren im Gleichgewichtsdigramm [2].

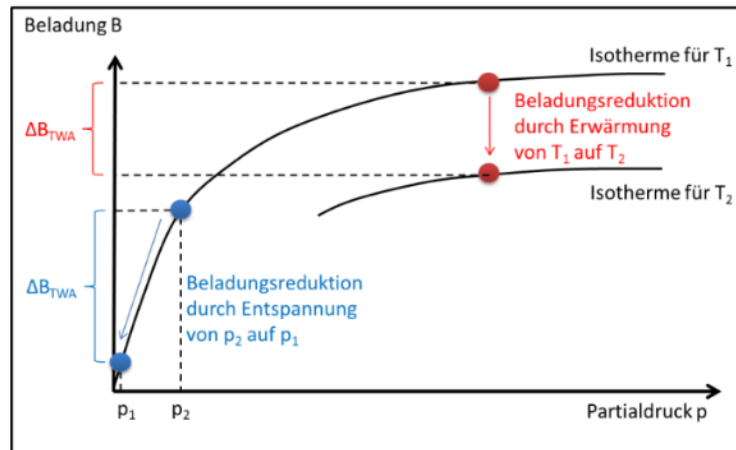


Abbildung 4: Betriebsmodi der Adsorption umfassen die Desorption durch Änderung der Temperatur oder des Drucks [2]

Unter normalen Bedingungen werden Wasserstoff und Helium nicht adsorbiert. Bei der Reinigung von Wasserstoff erfolgt die Beseitigung von Verunreinigungen durch Adsorption, wobei Wasserstoff mit sehr geringer Wechselwirkung das Adsorptionsmittel passiert. Ähnlich geringe Adsorptionskräfte weist auch Stickstoff auf. Die Entfernung von Stickstoff basiert auf seiner Adsorption, beispielsweise an Molekularsieben oder Zeolithen. Eine wesentliche Voraussetzung für die Regeneration des Adsorptionsmittels ist, dass die Verbindungen ohne übermäßigen Energieaufwand desorbiert werden können. Im vorliegenden Fall ist dies bei langkettigen Kohlenwasserstoffen wie Verdichterölen nicht gegeben, daher ist ein Wechsel des Adsorptionsmittels erforderlich. Die Adsorptionskapazität hängt von verschiedenen Faktoren ab, darunter das Adsorptionsmittel selbst, die Anfangskonzentration der zu entfernenden Substanzen und die Anwesenheit konkurrierender Komponenten [2].

Adsorptionsverfahren mit und ohne Regeneration sind etablierte Technologien. Bei der Herstellung von hochreinem Wasserstoff aus Synthesegas wird häufig die Druckwechseladsorption (Pressure Swing Adsorption, PSA) eingesetzt. In diesem Verfahren erfolgt die Desorption nahe dem Umgebungsdruck, und das entstehende brennbare Abgas wird zur Beheizung des Reformers genutzt. Air Liquide gibt für die Wasserstoffreinigung folgende Rahmenparameter bezüglich der Druckwechseladsorption an:

- Gewinnung von Wasserstoff mit einer Reinheit von bis zu 99,9999 %
- Verfügbarkeitsfaktor üblicherweise über 99,9 %
- Einsatzgase in großer Bandbreite
- patentierte Wechselzyklen und modernste Adsorptionsmittel
- Für unbemannten Betrieb im Außenbereich konzipiert
- Kompakte und auf Rahmen vormontierte Anlagen
- Kapazität: 5.000 bis 200.000 Normkubikmeter pro Stunde
- H₂-Rückgewinnungsrate: 60 bis 90 %
- Teillastbetrieb: bis auf 25 %

Im Gegensatz dazu gibt Linde Kapazitäten von bis zu 400.000 Nm³/h an, Rückgewinnungsraten von 93 % bis 98 % (in zwei Stufen) und eine größere Flexibilität im Teillastbetrieb (nahezu bis 0 %).

Die zweistufige Adsorptionsmethode erzielt eine Wasserstoffrückgewinnungsrate von 98% und ermöglicht einen erweiterten Spielraum beim Teillastbetrieb, sogar bis nahezu 0%. Jedoch weist die Angabe zur H₂-Rückgewinnungsrate auf einen Nachteil des Verfahrens hin, nämlich die Verluste an Wasserstoff während der Regeneration der Adsorber. Diese Verluste belaufen sich in der Regel auf 2-10% des eingesetzten Gases, um eine Feinreinigung von 98 mol-% auf 99,97 mol-% zu erreichen.

Ein ähnliches Phänomen ist aus der Biogasaufbereitung bekannt, wo Biomethanverluste in PSA-Anlagen mit etwa 3% angegeben werden. Dies macht beispielsweise eine katalytische Nachverbrennung des abgeschiedenen CO₂ erforderlich. Abscheider ohne Regeneration sind schaltungstechnisch weniger komplex (siehe Abbildung 5).

Abscheider ohne Regeneration kommen zum Einsatz, wenn äußerst geringe Mengen stark adsorbierender Komponenten abgeschieden werden müssen. Praktisch entstehen keine Verluste an Wasserstoff, und die Behälter müssen nur zum Wechsel des Adsorbens entspannt werden. Die Auslegung zielt darauf ab, dass vergleichsweise wenige Adsorbenswechsel erforderlich sind, beispielsweise höchstens einmal pro Jahr. Im Beispiel sind die Adsorber so verschaltet, dass diese sowohl in Reihe als auch parallel betrieben werden können. Das nachfolgend dargestellte Beispiel stammt aus einem Deodorierungsprojekt. Die Deodorierung wird auch für die Aufbereitung von Wasserstoff relevant werden. Behälter zu entspannen. Die Auslegung erfolgt unter Berücksichtigung der Adsorptionskapazität dahingehend, dass relativ wenige Adsorbenswechsel (z.B. $\leq 1 \times$ jährlich) notwendig werden. Im Beispiel sind die Adsorber so verschaltet, dass diese sowohl in Reihe als auch parallel betrieben werden können. Das nachfolgend dargestellte Beispiel stammt aus einem Deodorierungsprojekt. Die Deodorierung wird auch für die Aufbereitung von Wasserstoff relevant werden [2].

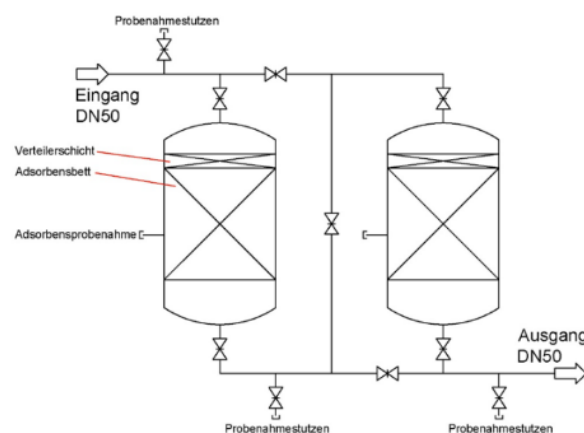


Abbildung 5: Graphische Darstellung eines Trennvorrichtungssystems mit zwei Adsorbern [2]

Adsorbentien auf Zeolithbasis werden ebenfalls zur Entschwefelung gasförmiger Stoffströme eingesetzt. Zeolithe 13X sind aufgrund ihrer Porengröße besonders geeignet für die Abtrennung von Schwefelverbindungen. Die Aufnahmefähigkeit des Adsorbens wird vom Wassergehalt sowie dem Anteil höherer Kohlenwasserstoffe beeinflusst. Theoretisch ist eine Regeneration des beladenen Adsorbens mittels Heißgas möglich, wird jedoch beispielsweise bei Odoriermitteln aufgrund der Geruchsbelastung, insbesondere in kleineren Anlagen, oft nicht

durchgeführt. Aktivkohlen sind ebenfalls für die Feinentschwefelung einsetzbar, wie beispielsweise in den Erdgas-Brennstoffzellen von Panasonic umgesetzt wird. Dort kommt eine (nicht näher spezifizierte) Kombination verschiedener Adsorbentien zum Schutz der Katalysatoren zum Einsatz

Die Aufbereitung von Wasserstoff von der Qualität der Gruppe A auf die Qualität der Gruppe D erfordert den Einsatz von adsorptiven Verfahren. Die Entfernung von Stickstoff, Kohlenstoffdioxid, Methan und Kohlenmonoxid wird durch eine Druckwechseladsorption (Pressure Swing Adsorption, PSA) realisiert. Für die Abscheidung von Kohlenwasserstoffen und Schwefelverbindungen sind Adsorber mit regelmäßigem Austausch der Füllungen erforderlich. Die Trocknung des Wassers kann durch Temperaturwechseladsorption (Temperature Swing Adsorption, TSA) erreicht werden [2].

Chemiesorption / Katalytische Umwandlung

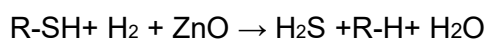
Die Kopplung eines Adsorptionsprozesses, insbesondere die Chemiesorption, mit einer nachfolgenden chemischen Veränderung der adsorbierten Komponenten spielt eine entscheidende Rolle in der Wasserstoffaufbereitung, insbesondere für die Entfernung von Sauerstoff und Schwefelverbindungen. Für die Sauerstoffentfernung wird eine Reaktion genutzt, bei der Sauerstoff katalytisch mit Wasserstoff zu Wasser umgesetzt wird. Diese Reaktion wird in der Elektrolyse verwendet, um Sauerstoffreste aus dem Wasserstoff zu entfernen und ist branchenüblicher Standard.

Die Stöchiometrie erfordert, dass der Wasserstoffgehalt des Gasstroms mindestens doppelt so hoch ist wie der Sauerstoffgehalt. Durch dieses Verfahren kann der Sauerstoffgehalt auf Konzentrationen von weniger als 1 ppmv reduziert werden. Für diese Zwecke werden Edelmetallkatalysatoren verwendet, die platin- oder palladiumhaltig sind und bei Umgebungstemperaturen oder leicht erhöhten Temperaturen (< 50°C) arbeiten. Es sind auch andere Katalysatoren denkbar, allerdings erfordern diese in der Regel deutlich höhere Temperaturen. Das bei der Reaktion entstehende Wasser muss anschließend adsorptiv entfernt werden [2].

Entschwefelungsverfahren können ebenfalls in der Kombination von Adsorption und nachfolgender Umwandlung der adsorbierten Komponenten in Schwefel zur Erhöhung der Adsorptionskapazität

Entschwefelungsverfahren können durch die Kombination von Adsorption und nachfolgender Umwandlung der adsorbierten Komponenten in Schwefel optimiert werden, um die Adsorptionskapazität zu erhöhen. Imprägnierte oder dotierte Materialien zeigen besonders hohe Aufnahmekapazitäten, insbesondere für Schwefelwasserstoff. Diese Materialien werden in industriellen Anwendungen zur Abtrennung von Schwefelverbindungen im Spurenbereich eingesetzt. Es ist jedoch wichtig zu prüfen, ob für die Umwandlung der Schwefelverbindung Sauerstoff benötigt wird, der im Wasserstoff nicht vorhanden ist. Dies schließt beispielsweise die Anwendung von iodimprägnierter Aktivkohle aus.

Im Gegensatz dazu ist die hydrierende Entschwefelung für die Entfernung von Schwefelverbindungen aus Wasserstoff geeignet.



Der Kobalt/Molybdän-Katalysator funktioniert effektiv bei Temperaturen zwischen 200 und 400°C. Das Zinkoxid (ZnO)-Bett weist eine beeindruckende Aufnahmekapazität von bis zu 30

Masseprozent auf. Wasserstoff, als notwendige Reaktionskomponente, ist im Wasserstoffstrom im Überschuss vorhanden [2].

Verflüssigung

Die Verflüssigung von Wasserstoff ist in großem und kleinem Maßstab eine etablierte Technologie. Neben der Trennung von Komponenten, wie es bei der Luftverflüssigung der Fall ist, wird die Verflüssigung auch genutzt, um das Volumen und den Druck beim Transport von Flüssigkeiten wie LNG (Flüssigerdgas) und Wasserstoff zu reduzieren.

Aufgrund des deutlich niedrigen Siedepunkts von Wasserstoff bei -253 °C , liegt die Herausforderung bei der Abtrennung von Wasserstoff in einer Mischung darin, alle anderen Bestandteile als separate Phase zu verflüssigen. Ein Nachteil besteht darin, dass das für LNG angewandte Entspannungsverfahren, das auf dem kühlenden Joule-Thomson-Effekt basiert, für Wasserstoff nicht möglich ist, was den Energiebedarf erhöht.

Für LNG wird der gesamte Energiebedarf, der auf den Heizwert bezogen wird und für die Verflüssigung von Erdgas erforderlich ist, auf 10-25% geschätzt. Da es für die H_2 -Gasreinigung energetisch günstigere Alternativen in Form von adsorptiven Verfahren gibt, wird im Folgenden nicht weiter auf die Verflüssigung von Wasserstoff eingegangen [2].

Absorption

Absorptive Verfahren beinhalten, dass die zu entfernende Komponente in einer Waschflüssigkeit gebunden wird. Dieser Prozess ist reversibel. Es ist zu beachten, dass die Waschflüssigkeit, wie beispielsweise Amine, Glykole oder Wasser, in das Gas eingetragen werden kann.

Im Kontext von Wasserstoff ist die Gastrocknung ein relevanter Absorptionsprozess. Die Trocknung mithilfe von Triethylenglykol (TEG) ist in Untergrundgasspeichern Standard, äußerst flexibel im Teillastverhalten und zeichnet sich gegenüber einer Molsiebtrocknung durch sehr geringe Betriebskosten aus. Die Anforderungen an die Wasserstoffqualität der Gruppe A können durch eine TEG-Trocknung in einem Untergrundgasspeicher erfüllt werden. Es ist auch denkbar, eine Kombination mit einer Molsiebtrocknung als zweite Stufe zur Trocknung von Wasserstoff anzuwenden, um die Qualität der Gruppe D zu erreichen [2].

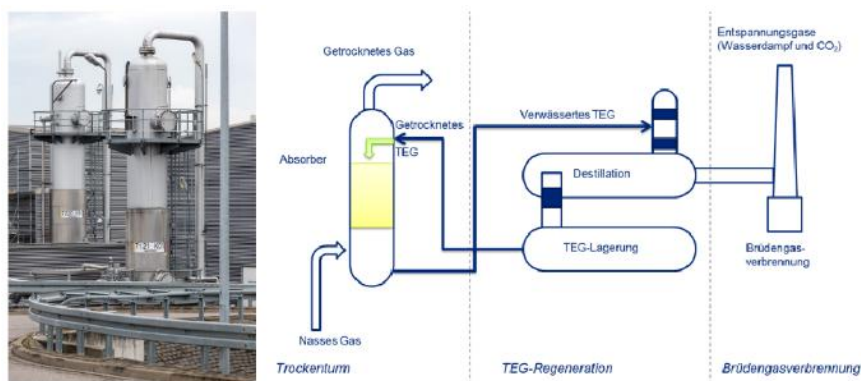


Abbildung 6: TEG-Trocknung am UGS und Prinzipschema einer Gastrocknung mittels Absorption [2]

Membranverfahren

Ein zusätzliches, theoretisch machbares Gasaufbereitungsverfahren, das sich auf einem TRL von 9 befindet, sind Membranverfahren.

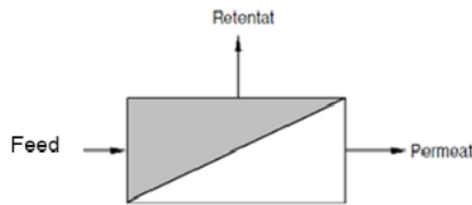


Abbildung 7: Schematische Darstellung der Stoffstromtrennung an einer Membran [2]

Membranverfahren weisen folgende Vorteile gegenüber anderen Stofftrennverfahren auf:

- Niedriger Energieverbrauch
- Große Anpassungsfähigkeit an schwankende Stoffströme
- Modularer Aufbau und damit leicht erweiterbar
- Zügiges Hochfahren und Herunterfahren der Anlagen ist realisierbar
- Kein Bedarf an chemischen Hilfsstoffen, frei von Abfallstoffen

Die technologische Weiterentwicklung der Membrantechnologie ermöglicht die nahtlose Integration neuer Membranen in vorhandene Ausrüstungen. Trotz dieser Vorteile gibt es auch Nachteile. Membranen eignen sich normalerweise nicht für die Feinreinigung von Gasen, was üblicherweise durch eine nachgeschaltete Druckwechseladsorption bewerkstelligt wird.

In Bezug auf die Extraktion von Wasserstoff aus einem Gemisch von Erdgas und Wasserstoff sind Polymermembranen relevant. Es ist jedoch zu beachten, dass diese Membranen nicht in der Lage sind, die in dieser Studie untersuchte Aufreinigung von 98 mol-% auf 99,97 mol-% zu erreichen.

Im Bereich von Wasserstoff existieren spezielle Eigenschaften, die den Einsatz von Membranen zur Feinreinigung dennoch ermöglichen. Obwohl verschiedene Membrantypen, wie beispielsweise Polymermembranen, die Herstellung von Wasserstoff in einer Qualität von 98 mol-% ermöglichen, erlauben zwei spezifische Membrantypen die Erzeugung von Wasserstoff in der Qualitätsstufe der Gruppe D. Dies ist auf die geringe Molekülgröße sowie eine sehr präzise Wechselwirkung mit Palladium zurückzuführen.

Zur Erzielung hoher Reinheitsgrade von Wasserstoff bis zu 99,9999 % werden Palladiummembranen eingesetzt. Eine umfassende Darstellung des aktuellen Standes und der Herausforderungen von Palladium-Membranen findet sich in [21]. Diese Membranen aus Palladium arbeiten typischerweise im Temperaturbereich von 300 bis 700°C. Es gibt eine Unterscheidung zwischen reinen Palladium-Membranen und solchen aus Palladium-Legierungen. Palladium reagiert empfindlich, und bei reinen Palladium-Membranen können Probleme im Umgang mit CO, Schwefelverbindungen oder Wasser auftreten, die teilweise von der Temperatur abhängig sind. Durch den Einsatz von "palladiumbasierten" Membranen, also solchen aus Palladium-Legierungen, lassen sich einige dieser Probleme umgehen [2].

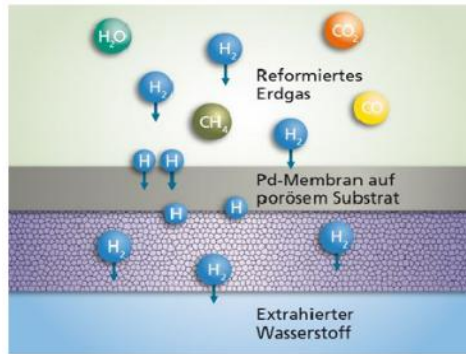


Abbildung 8: Diffusion durch eine Palladiummembran [2]

Ein Nachteil besteht darin, dass der gesamte Wasserstoff die Membran passieren muss, was eine hohe Permeabilität der Membran und/oder große Membranflächen erfordert. Die aktuelle Entwicklung zielt darauf ab, den Palladium-Anteil zu reduzieren, um die Kosten der Membranen zu senken. Dennoch bietet dieser Membrantyp beispielsweise für kleinere Anwendungen eine Alternative zur Druckwechseladsorption (PSA) bei der Abtrennung von Stickstoff (N_2) aus Wasserstoff (H_2). Palladiummembranen erreichen formal den Technologiereifegrad (TRL) 9, werden jedoch aufgrund der Kosten derzeit eher für Anwendungen mit geringem Volumen eingesetzt.

Aktuelle Forschungsergebnisse zeigen zudem, dass Kohlenstoffmembranen in der Wasserstoffklasse A in der Lage sind, Wasserstoff der Qualität D herzustellen. Der Entwicklungsstand dieses Membrantyps wird auf TRL 6 geschätzt. Es ist allgemein festzustellen, dass die Membrantechnologie zwar insgesamt den Technologiereifegrad 9 aufweist, jedoch die einzelnen Membrantypen unterschiedliche Reifegrade aufweisen können [2].

Filter

Eine weitere Methode zur Entfernung von Verunreinigungen aus Wasserstoff ist die Verwendung von Filtern. Dieser ist jedoch hauptsächlich nützlich, um Staub aus dem Wasserstoff zu entfernen [2].

In der nachfolgenden Tabelle sind Stoffgruppen und die relevanten Aufbereitungsverfahren aufgeführt.

Tabelle 26: Kategorien von Substanzen und entsprechende Verfahren zur Vorbereitung von Wasserstoff [2]

Verfahren	Komponente	Gasvolu- men $\leq$ 1000 m ³ /h TRL	Gasvolu- men $\geq$ 1000 m ³ /h TRL	Bemerkungen
Adsorption (Phy- sorption)	CO ₂ , CO, HC (inkl. CH ₄), H ₂ O, N ₂ , NH ₃	9	9	Aufreinigung bis zum ppb-Level möglich Temperaturwechseladsorption im Fall von Trocknung, COS, CS ₂ sind kritisch;
Chemiesorption / Katalytische Um- wandlung	O ₂ , Schwefel- verbindungen	9	9	
Verflüssigung (Cryoverfahren)	N ₂	9	9	Wird auch für kleine Leistungen in der Halbleiterindustrie ange- boten
Absorption	H ₂ O	(9)	9	Anlagen kleiner Leistung mög- lich, aber bei Trocknung kleiner Volumina nicht relevant
Membranverfah- ren	H ₂	9 / 6	9 / 6	Erläuterung s.u.
Filter	Staub	9	9	

Wirtschaftliche Analyse verschiedener Varianten der Gasreinigung:

Szenario 1

Bei der Elektrolyse ist eine separate Trocknungsstufe erforderlich, und das getrocknete Gas wird über eine neu verlegte Pipeline dem Endnutzer zugeführt. In diesem Fall spielt der Wasserstoffgestehungspreis von grauem zu grünem Wasserstoff für die Kostenkalkulation keine Rolle. Es ist wichtig zu betonen, dass der Investor (Netzbetreiber, Stakeholder) in der Regel eine Elektrolyseanlage inklusive vollständiger Aufbereitung erwirbt, und die Kosten für die Gasaufbereitung sind bereits durch den Kauf des Elektrolyseurs als Gesamtpaket abgedeckt. Dadurch belaufen sich die zusätzlichen Aufbereitungskosten auf null [2].

Szenario 2

Es wird Wasserstoff aus einem Untergrundgasspeicher (UGS) abgegeben, und dieser Wasserstoff wird über eine umgebaute ehemalige Erdgasleitung zu einer Wasserstofftankstelle transportiert. Vor dem Eintreffen an der Tankstelle ist eine Aufbereitung erforderlich. Für die Kostenschätzung gelten folgende Rahmenbedingungen:

- Die Gastrocknung am Speicher erfolgt mittels Molsieb in redundanter Ausführung, wobei die Adsorber thermisch regeneriert werden. Die Ausspeicherrate beträgt etwa 1.000 m³/h H₂, was auf eine kleinere Anlage hinweist.
- Die Deodorierung erfolgt durch ein Adsorbens mit einer Adsorptionskapazität von etwa 4 Ma.-% bezüglich THT (Totales Hauptbestandteil), Es erfolgt keine Regeneration.
- Der Aktivkohleabsorber fängt höhere Kohlenwasserstoffe ab, und die Aktivkohle wird regelmäßig ausgetauscht und entsorgt. Etwa 10 mg/m³ eines Kohlenwasserstoffgemischs gelangen mit dem Wasserstoff aus dem Verteilnetz in den Prozess.

Der Wasserstoffgestehungspreis spielt auch in diesem Szenario für die Kostenkalkulation keine Rolle. Technisch bedingt sind in diesem Fall keine Wasserstoffverluste aus dem Aufbereitungsprozess zu berücksichtigen. Verdichtungsschritte oder eine Temperierung des Gases sind nicht erforderlich, mit Ausnahme der Regeneration des Molsiebadsorbers.

Die kalkulatorische Einbindung des Speichers stellt eine Herausforderung dar. Ein Untergrundgasspeicher (UGS) ist auf Ausspeisevolumina von $\geq 100.000 \text{ m}^3/\text{h}$ ausgelegt, und langfristig ist mit solchen Volumina zu rechnen. Dies bedeutet, dass die Investitionskosten (CAPEX) auf mehrere Kunden verteilt werden. Um dennoch eine Darstellung zu ermöglichen, wurden zwei Szenarien berechnet:

- Case 1: ohne Trocknung am Speicher
- Case 2: Die Kosten für die Trocknung aus Szenario 1 werden addiert, jedoch werden die operativen Es ist wichtig zu beachten, dass die Investitionskosten für den Speicher selbst im aktuellen Szenario nicht erfasst sind. Dies umfasst Ausgaben für den Kavernenausbau, Kissengas, Bohrung und andere infrastrukturelle Aspekte. Diese Kosten werden vom Speicherbetreiber auf den Wasserstoffpreis aufgeschlagen. Bislang liegen keine Kostenschätzungen von Seiten der Speicherbetreiber vor [2].

Szenario 3

Um einen Wasserstoff der Gruppe A auf die Qualität der Gruppe D anzuheben, ist eine mehrstufige Gasaufbereitung erforderlich. Hierbei gelten folgende Rahmenbedingungen für die Kostenschätzung:

Die Entschwefelung erfolgt adsorptiv, wobei der Schwefelwasserstoff über den Sauerstoffanteil im Gas zu Schwefel umgewandelt wird. Diese Methode bietet eine hohe Adsorptionskapazität, und das Adsorbens wird regelmäßig ausgetauscht.

Die Sauerstoffentfernung erfolgt katalytisch bei niedrigen Temperaturen. Anschließend wird der feuchte Wasserstoff durch Molsieb getrocknet.

Zwei nachgeschaltete Adsorber, die als Druckwechseladsorption (PSA) arbeiten, entfernen den verbleibenden CO_2 -Gehalt auf eine Größenordnung von etwa 1 mol-%. Es ist zu beachten, dass eine Nutzung des Spülgases nach der Aufbereitung nicht vorgesehen ist, und etwaige Kosten für die CO_2 -Emission wurden in der Kostenschätzung nicht berücksichtigt.

Es ist vorgesehen, zusätzliche Messtechnik zur Kontrolle der Wasserstoffqualität einzusetzen. Nach der PSA ist eine geeichte Mengenmessung notwendig, um die H_2 -Verluste messtechnisch zu erfassen. Technisch bedingt müssen in diesem Szenario H_2 -Verluste aus einem Aufbereitungsprozess berücksichtigt werden. Beispielsweise wurden Fälle mit 2 % und 10 % Verlust von Wasserstoff als Beispiel angenommen. Damit variieren die operativen Kosten (OPEX) in Abhängigkeit von den Wasserstoffgestehungskosten.

Es wird erwartet, dass die potenziellen H_2 -Verluste Preistreiber sind, insbesondere bei der Erzeugung von grünem Wasserstoff sollten 10 % Gasverluste durch eine Gasaufbereitung in jedem Fall vermieden werden. Analog zum Fall mit 2 % Verlust sind auch die Aufbereitungskosten stark von den Investitionskosten geprägt [2].

Wasserstoffreinheit und Verfügbarkeit

Die Qualität des in Ferngasleitungen transportierten Wasserstoffs wird in der sich derzeit in der Neuerstellung befindlichen DVGW G 260 (2021) geregelt. In dieser Norm ist die Gruppe A der neuen 5. Gasfamilie von Relevanz, mit einem Mindestgehalt an Wasserstoff von 98 %. Diese Qualität ist für den Großteil der Wasserstoffanwendungen, wie beispielsweise als Reduktionsmittel in der Stahlproduktion oder als Brennstoff zur Erzeugung von Prozesswärme, ausreichend. Dabei wird berücksichtigt, dass sich möglicherweise noch in umgestellten Erdgasleitungen befindliche Kohlenwasserstoffe zu Beginn in dem Wasserstoffgemisch befinden können. Erste Untersuchungen zeigen, dass die Wasserstoffqualität von diesen Reststoffen nur minimal beeinträchtigt wird. Dabei wurden jedoch keine über das Übliche hinausgehende Aufreinigungen berücksichtigt.

Die höchste Reinheit kann durch Elektrolyse erzielt werden, da in diesem Prozess naturgemäß nur die im Wasser gelösten Begleitgase in den Wasserstoff übergehen können. Wasserstoff, der durch Pyrolyse oder Dampfreformierung erzeugt wird, kann noch Reste von Erdgasen, also Kohlenwasserstoffen, enthalten. Für Anwendungen in Brennstoffzellen oder spezifischen stofflichen Anwendungen, wie beispielsweise in der pharmazeutischen Produktion, könnte eine Aufreinigung auf die erforderliche Wasserstoffreinheit notwendig sein. Da der Wasserstoff bereits in der Fernleitung mit hoher Reinheit vorliegt, kann dies effizient durch den Einsatz von Membranen oder Druckwechseladsorptionsanlagen erfolgen [22].

Fazit

Wasserstoff kann je nach Reinheit in zwei Gruppen eingeteilt werden: Gruppe A mit einem Reinheitsgrad von mehr als 98 mol% und Gruppe D mit einem Reinheitsgrad von über 99,97%. Der erforderliche Reinheitsgrad hängt von der jeweiligen Anwendung ab. Für die meisten Industriezweige, wie z. B. Feuerungsanlagen und Haushalte, ist der Reinheitsgrad von Wasserstoff der Gruppe A ausreichend. Einige Industriezweige, wie z. B. der Einsatz von Brennstoffzellen, benötigen jedoch Wasserstoff mit einem Reinheitsgrad von über 99,97 %.

Verunreinigungen im Wasserstoff können bei der Herstellung, der Lagerung oder dem Transport auftreten. Um die Reinheit des Wasserstoffs nach der Produktion zu erhöhen, können Methoden wie Adsorption, Absorption, Verflüssigung und Filtration eingesetzt werden.

Experten sind der Ansicht, dass der Transport von Wasserstoff der Gruppe D durch Pipelines aufgrund von Verunreinigungen in den Pipelines und Kompressoren nicht praktikabel ist. Wenn Wasserstoff der Gruppe D über Pipelines transportiert wird, muss er wieder aufbereitet werden. Daher ist die beste Methode für den Transport von Wasserstoff der Gruppe D die Verwendung von Wasserstofftanks. Im Gegensatz dazu ist der Transport von Wasserstoff der Gruppe A über Pipelines möglich.

Die Umstellung von Erdgas auf Wasserstoff ist ein zentraler Schritt im Rahmen der Energiewende und bietet die Möglichkeit, CO₂-Emissionen zu reduzieren und eine nachhaltige Energieversorgung zu fördern. Um die Wasserstoffqualität gemäß Normen wie DVGW G 260 und ISO 14687 sicherzustellen, sind technische Anpassungen und effektive Reinigungsverfahren erforderlich, darunter Adsorptive Technologien, katalytische Umwandlungen und Molekularsiebe.

Die wirtschaftliche Analyse verschiedener Szenarien zeigt, dass die Kosten für die Wasserstoffaufbereitung stark von der bestehenden Infrastruktur und den gewählten Technologien abhängen. Während direkte Ansätze wie die Nutzung von Elektrolyseanlagen kosteneffizient sind, erfordern anspruchsvollere Verfahren höhere Investitionen. Die Einhaltung regulatorischer Standards und die kontinuierliche Überwachung der Wasserstoffreinheit sind entscheidend, um eine sichere und qualitativ hochwertige Versorgung zu gewährleisten. Messtechnologien wie OFCEAS und Gaschromatographie sind wichtige Werkzeuge, um kritische Verunreinigungen zu identifizieren.

Da das Verteilnetz in der Regel nicht für die direkte Nutzung von Wasserstoff ausgelegt ist, müssen spezifische Technologien zur Reinigung und kontinuierlichen Überwachung eingesetzt werden.

Referenzen

1. ASUE_Wasserstoff-in-Industrie-Und-Energiewirtschaft_2020-12_Leseprobe.Pdf.
2. DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH; Dipl.-Chem. Udo Lubenau; Dipl.-Ing. Hagen Bültemeier; Dipl.-Ing. Cruz Marrune; Jens Hüttenrauch, M. Eng.; Dipl.-Ing. Philipp Pietsch H₂-Kurzstudie: Wasserstoffqualität in einem Gesamtdeutschen Wasserstoffnetz. DBI Gas-Umwelttech. GmbH 2021.
3. Technische Regel - Arbeitsblatt DVGW G 260 (A) September 2021 Gasbeschaffenheit Gas Quality.
4. Park, S.M.; O'Brien, T.J. Effects of Several Trace Contaminants on Fuel Cell Performance. [Theoretical Study]; 1980; p. DOE/METC/RI-80/16, 5030267;
5. Wolfram Krewitt; Stephan Schmid; DLR, Institute of Vehicle Concepts WP 1.5 Common Information Database D 1.1 Fuel Cell Technologies and Hydrogen Production/Distribution Options. 2005.
6. Martin Brown; Arul Murugan; Sam Foster HYDROGEN WORK PACKAGE 2 Hydrogen Purity. 2019.
7. Yang, Y.; Wang, G.; Zhang, L.; Zhang, S.; Lin, L. Comparison of Hydrogen Specification in National Standards for China. E3S Web Conf. 2019, 118, 03042, doi:10.1051/e3sconf/201911803042.
8. Graham, Jr., S.; Steinhaus, C.A.; Clift, W.M.; Klebanoff, L.E.; Bajt, S. Atomic Hydrogen Cleaning of EUV Multilayer Optics.; Engelstad, R.L., Ed.; Santa Clara, CA, June 13 2003; p. 460.
9. The Potential of Hydrogen for the Chemical Industry. 2021.
10. Kurzweil, P. Brennstoffzellentechnik; Springer Fachmedien Wiesbaden: Wiesbaden, 2016; ISBN 978-3-658-14934-5.
11. Schönfeldt, E. Gasqualität von Wasserstoff in umgewidmeten Erdgasrohrleitungen. 2022, doi:10.24405/14600.
12. Zlochower, I.A.; Green, G.M. The Limiting Oxygen Concentration and Flammability Limits of Gases and Gas Mixtures. J. Loss Prev. Process Ind. 2009, 22, 499–505, doi:10.1016/j.jlp.2009.03.006.

13. EH40/2005 Workplace Exposure Limits: Containing the List of Workplace Exposure Limits for Use with the Control of Substances Hazardous to Health Regulations 2002 (as Amended); Third edition.; TSO: London, 2018; ISBN 978-0-7176-6703-1.
14. Jochen Schütz, Kerstin Kröger, Dr. Tobias van Almsick H2 Im Netz Voruntersuchungen Zu Gasbeschaffenheitsaspekten Bei Transport Und Verteilung von Wasserstoff Mit Hilfe Der Bestehenden Erdgasinfrastruktur. 2021.
15. Udo Lubenau, Dr. Daniela Baumann Wasserstoffqualitätsanforderungen Anforderungen Der ISO/DIS 14687 Bzw. DIN EN 17124 an Die Verschiedenen Wasserstoffqualitäten Und Auswirkungen Hinsichtlich H2- Und H2-Gemischtransport Sowie Resultierende Vermarktungs- Und Einsatzmöglichkeiten Für Gasversorger. 2020.
16. Technische Regel – Arbeitsblatt DVGW G 463 (A) Oktober 2021 Gashochdruckleitungen Aus Stahlrohren Für Einen Auslegungsdruck von Mehr Als 16 Bar; Planung Und Errichtung High Pressure Gas Steel Pipelines for a Design Pressure of More Than 16 Bar; Design and Construction.
17. Schönfeldt, E. Gasqualität von Wasserstoff in umgewidmeten Erdgasrohrleitungen. 2022, doi:10.24405/14600.
18. Danny Terlip, Chris Ainscough, William Buttner H2FIRST Hydrogen Contaminant Detector Task Requirements Document and Market Survey. 2015.
19. Karine Arrhenius, Arul Murugan, Thomas Bacquart Sampling from Hydrogen Refuelling Strategies for the Sampling of Hydrogen at Refuelling Stations for Purity Assessment. 2021, doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.08.043>.
20. Arrhenius, K.; Büker, O.; Fischer, A.; Persijn, S.; Moore, N.D. Development and Evaluation of a Novel Analyser for ISO14687 Hydrogen Purity Analysis. Meas. Sci. Technol. 2020, 31, 075010, doi:10.1088/1361-6501/ab7cf3.
21. Doukelis, A.; Panopoulos, K.; Koumanakos, A.; Kakaras, E. Palladium Membrane Technology for Hydrogen Production, Carbon Capture and Other Applications; Woodhead Publishing series in energy; Woodhead Publishing Elsevier: Cambridge Amsterdam, 2015; ISBN 978-1-78242-234-1.
22. Wasserstofftransport-Nationaler Wasserstoffrat. 2021.

Impressum

DVGW Deutscher Verein des
Gas- und Wasserfaches e. V.
Technisch-wissenschaftlicher Verein
Josef-Wirmer-Straße 1-3
53123 Bonn

Tel.: +49 228 9188-5
Fax: +49 228 9188-990
E-Mail: info@dvgw.de
Internet: www.dvgw.de

Nachdruck und Vervielfältigung nur im
Originaltext, nicht auszugsweise, gestattet.