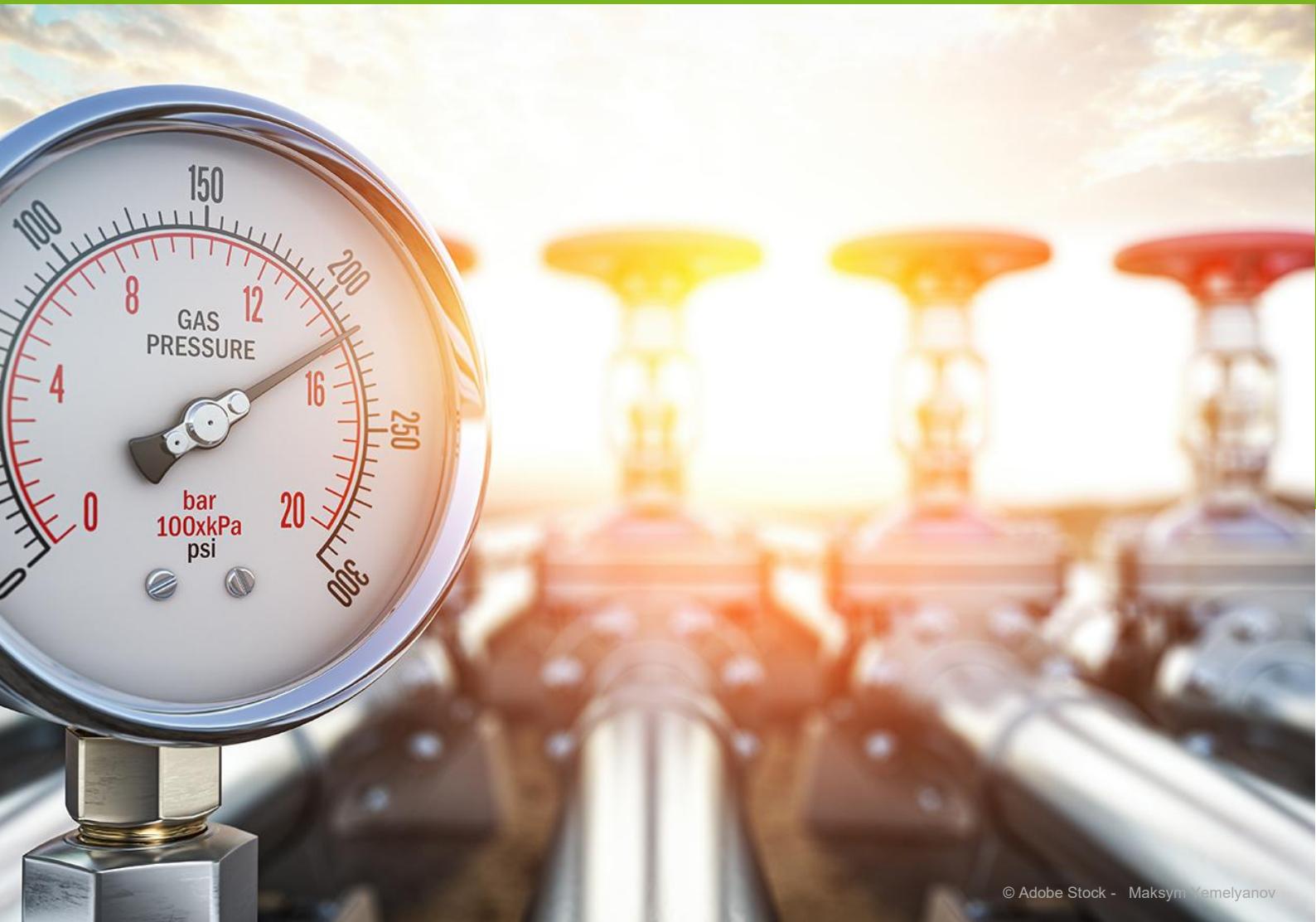


Wasserstoffumstellung von Gasinstallationen

Untersuchung notwendiger Umstellschritte bei der Umstellung von häuslichen Gasinstallationen von Erdgas auf Wasserstoff

Abschlussbericht



© Adobe Stock - Maksym Yemelyanov

Impressum

Forschungsbericht

Wasserstoffumstellung von Gasinstallationen

Untersuchung notwendiger Umstellschritte bei der Umstellung von häuslichen Gasinstallationen von Erdgas auf Wasserstoff

Durchführung

Projektleitung:

Dipl.-Ing. Philipp Pietsch
philipp.pietsch@dbi-gruppe.de
+49 3731 4195-352

Projektbearbeitung:

Dipl.-Ing. Raphael Roth
raphael.roth@dbi-gruppe.de
+49 3731 4195-320

Kontakt

DBI - Gastechnologisches Institut gGmbH Freiberg
Halsbrücker Straße 34
D-09599 Freiberg

www.dbi-gruppe.de

Laufzeit

03/25 bis 10/25

Das diesem Forschungsbericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Gaswirtschaftlichen Beirats gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.



Inhalt

Abbildungsverzeichnis	4
Tabellenverzeichnis	5
1 Einleitung	6
2 Analyse der vorgeschriebenen Arbeitsschritte bei der Umstellung von häuslichen Gasinstallation auf Wasserstoff	7
3 Aufbau eines Versuchsstands im Technikum des DBI-GTI für die experimentellen Untersuchungen von Umstellvorgängen	10
3.1 Versuchsaufbau	10
3.2 Messgeräte und Sensoren	11
4 Experimentelle Untersuchungen zu Umstell- und Spülvorgängen an einem Gasgerät mit H ₂ -Umrüstkit	13
4.1 Versuchsplan	13
4.2 Betrachtung des Gerätebetriebs mit Erdgas und Wasserstoff	15
4.3 Versuchsreihen zur Umstellung mit Stickstoffspülung	16
4.3.1 Einstufige Stickstoffspülung (Versuch 2)	16
4.3.2 Zweistufige Stickstoffspülung (Versuch 3)	18
4.4 Versuchsreihen zur Umstellung ohne Stickstoffspülung	20
4.4.1 Versuch 4: Umstellung ohne Stickstoffspülung bei druckloser Gasleitung	20
4.4.2 Versuch 5: Toleranz des H ₂ -Brenners gegenüber Erdgasresten	21
4.5 Erkenntnisse aus der Benutzung der Fackel	23
4.6 Bewertung der Ergebnisse und Vergleich der Verfahrensschritte	25
5 Zusammenfassung und Ausblick	27
Literaturverzeichnis	28

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Umstellprozess von Gashausinstallationen von Erdgas auf Wasserstoff aus dem DVGW-Forschungsprojekt G202312 [3].....	8
Abbildung 2: R&I Schema vom Versuchsaufbau	10
Abbildung 3: Viessmann Vitodens 200 B2HF-H2-32 Gasgerät im DBI-Technikum mit Anschluss an die Mischgasleitung (a) und Gasmischchanlage (b) über die die Mischgasleitung mit Erdgas, Wasserstoff, Propan und Stickstoff versorgt werden kann	11
Abbildung 4: Verlauf von Brenngaszusammensetzung und Gasvolumenstrom während Versuch 2	16
Abbildung 5: Abgaszusammensetzung und Gasvolumenstrom während der ersten Phase von Versuch 2 ...	18
Abbildung 6: Verlauf von Brenngaszusammensetzung und Gasvolumenstrom während Versuch 3	19
Abbildung 7: Verlauf von Brenngaszusammensetzung und Gasvolumenstrom während Versuch 4	20
Abbildung 8: Verlauf von Brenngaszusammensetzung und Gasvolumenstrom während Versuch 5	21
Abbildung 9: Verlauf von Abgaszusammensetzung und Gasvolumenstroms während Versuch 5	23
Abbildung 10: Fackel an ausgewählten Versuchspunkten mit unterschiedlicher Gaszusammensetzung (links: 83 % CH ₄ +13 % H ₂ +3 % N ₂ ; mittig: 18 % CH ₄ + 71 % H ₂ + 10 % N ₂ ; rechts: 1,7 % CH ₄ + 98,3 % H ₂).....	24

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Abgasemissionen und Effizienz des Gasgerätes im Erdgasbetrieb und im Wasserstoffbetrieb.....	16
Tabelle 2: Protokoll von Versuch 2.....	17
Tabelle 3: Protokoll von Versuch 3.....	19
Tabelle 4: Protokoll von Versuch 4.....	21
Tabelle 5: Protokoll von Versuch 5.....	22
Tabelle 6: Volumenstrom und rechnerisch bestimmte Brennerleistung der Fackel an ausgewählten Versuchspunkten	24

1 Einleitung

Mit der Neufassung des Klimaschutzgesetzes ist die Transformation der Gasverteilnetze eine klare Notwendigkeit. Laut Gebäudeenergiegesetz (GEG) erfüllen Erdgas-Heizungsanlagen, die sich auf die Verbrennung von 100-prozentigem Wasserstoff umrüsten lassen, die Vorgabe, dass neue Heizungsanlagen mit mindestens 65 Prozent erneuerbarer Energien betrieben werden müssen. Der Deutsche Verein des Gas- und Wasserfaches (DVGW) hat mit der Einführung der 5. Gasfamilie im Arbeitsblatt G 260 die technische Grundlage für den Transport und die Bereitstellung von Wasserstoff in der öffentlichen Gasversorgung geschaffen [1].

In den meisten Landkreisen planen die Gas-Verteilnetzbetreiber laut den aktuellen Gasnetztransformationsplänen eine erste Einspeisung von Wasserstoff im Zeitraum zwischen 2030 und 2035, die vollständige Umstellung auf Wasserstoff oder Biomethan soll bis zum Jahr 2045 abgeschlossen sein [2]. Dabei erfolgt die Umstellung des Netzes schrittweise in einzelnen Umstellzonen, um eine unterbrechungsfreie Versorgung zu gewährleisten. Da die Priorität zunächst auf der Versorgung der energieintensiven Industrie liegt, ist der konkrete Umstellungszeitpunkt einer Zone im Verteilnetz abhängig von der Distanz zum Wasserstoffkernnetz und anderen Transportleitungen, sowie der allgemeinen Verfügbarkeit von Wasserstoff. Sofern an diesen Leitungen der Industrie auch erdgasversorgte Gebäude angeschlossen sind, kann für dieses Gebiet eine Wasserstoffversorgung in der kommunalen Wärmeplanung ausgewiesen werden. Die Energiemengen für die Versorgung dieser Gebäude wird im Regelfall nur ein Bruchteil der Energiemengen sein, welche zur notwendigen Versorgung der Industrie anfallen.

Gegenstand aktueller Untersuchungen sind Details zum Ablauf der Umstellungen, z.B. welche konkreten Arbeitsschritte nach den aktuellen Regelwerken erforderlich sind, um Hausanschlüsse sowie die häusliche Gasinstallation inklusive Gasgerät auf die Nutzung von Wasserstoff umzustellen und wie ein solcher Prozess im Ablauf optimiert wird. Im Rahmen des DVGW-Forschungsvorhabens „H₂-Umstellmanagement für Gasverteilnetze (H2Umstell)“ [3] wurde der Umstellprozess für Gasverteilnetze und Gasinstallationen bereits umfassend untersucht. Ergänzend dazu soll in diesem Projekt die Umstellung der Gas-Hausanschlüsse inklusive von H₂-Ready Gasgeräten anhand von praktischen Untersuchungen näher betrachtet werden.

Dazu werden zunächst die aktuellen Regelwerke analysiert, um ein genaues Verständnis der Anforderungen für den Umstellprozess zu erlangen und eine Übersicht über die notwendigen Maßnahmen und Arbeitsschritte für die Nutzung von Wasserstoff in Hausanschlüssen zu erstellen. Für die experimentellen Untersuchungen wird eine Gasinstallation, bestehend aus einer Kupferrohrleitung, einem Gasgerät, welches mittels Umrüstkit für 100 % Wasserstoff umstellbar ist, und der Gasversorgung über eine Mischanlage genutzt. Ziel ist es, verschiedene Vorgehensweisen bei der Umstellung eines Hausanschlusses zu vergleichen und die notwendige Messtechnik und Peripherie zu testen. Bei den verschiedenen Spülvorgängen wird die Durchmischung von Erdgas, Stickstoff und Wasserstoff mit einem geeigneten Messgerät analysiert. Die Versuche umfassen dabei sowohl Umstellvorgänge mit Stickstoffspülung als auch solche ohne Spülung, um die unterschiedlichen Vorgehensweisen während der Umstellung hinsichtlich ihres Aufwands, ihrer Praktikabilität und sicherheitstechnischen Aspekten zu vergleichen und Handlungsempfehlungen abzuleiten.

Das Ziel des Projekts besteht darin, ein optimiertes Verfahren für die Umstellung von Hausanschlüssen auf Wasserstoff zu entwickeln, das die Kosten und die Umstellungszeiten minimiert. Dabei sollen noch offene Fragen zur Gasumstellung geklärt und zur aktuellen Diskussion über Änderungen und die Fortschreibung des Regelwerks beigetragen werden. Bevor erste Leitungsabschnitte umgestellt werden, muss ein leistungsfähiger Leitfaden für die Umstellung von Verteilnetzen und Hausanschlüssen auf regenerativen Wasserstoff existieren.

2 Analyse der vorgeschriebenen Arbeitsschritte bei der Umstellung von häuslichen Gasinstallation auf Wasserstoff

In den letzten Jahren wurde die Tauglichkeit von Erdgasinstallationen zur Umstellung auf Wasserstoff sowie der eigentliche Umstellprozess in umfangreichen, öffentlich geförderten und vom DVGW finanzierten Forschungsprojekten untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass bestehende Dichtungs- und Rohrleitungsmaterialien für den Einsatz mit Wasserstoff geeignet sind. Im aktuellen Fokus liegt die Anpassung des DVGW-Regelwerks, um Rechtssicherheit für die Umstellung von Verteilnetzen und Anschlussleitungen zu schaffen. Ein Meilenstein dabei war die Veröffentlichungen des Merkblatts DVGW G 655 (M), welches die bestehenden Arbeitsblätter G 600 (Technische Regel Gasinstallation, TRGI) und G 614 ergänzt. Im Bereich der Gasverteilnetze erweitern die Merkblätter G 221, G 407 und G 408 das Regelwerk um die Anforderungen bei der Umstellung auf das neue Betriebsmedium Wasserstoff.

Die Merkblätter dienen dabei als unverbindliche Ergänzung und Empfehlung zum technischen Regelwerk der Arbeitsblätter. Bis zur endgültigen Integration in die bestehenden Arbeitsblätter ist nicht ausgeschlossen, dass sich Details der Merkblätter noch ändern, da sie Gegenstand aktueller Diskussionen sind. Mit diesem Projekt soll ein Beitrag dazu geleistet werden, einzelne Detailfragen zum Ablauf des Umstellvorgangs und zur Notwendigkeit der Inertisierung im Rahmen des Spülvorgangs von Hausanschlüssen zu diskutieren.

Die folgende Auflistung zeigt den aktuellen Stand des DVGW und DGUV-Regelwerks in Bezug auf die Wasserstoffumstellung von Verteilnetzen, Netzanschlüssen und Gasinstallationen des Kunden. Dabei wird nach der gesetzlichen Abgrenzung nach NDAV §5 zwischen dem Gasnetz vor und dem Bereich hinter der Hauptabsperreinrichtung (HAE) unterschieden, da mit der HAE die Zuständigkeit des Netzbetreibers endet.

DVGW-Regelwerk für Gasnetze und -hausanschlüsse (vor der HAE):

G 221 Merkblatt: Leitfaden zur Anwendung des DVGW-Regelwerks auf die leitungsgebundene Versorgung der Allgemeinheit mit wasserstoffhaltigen Gasen und Wasserstoff

G 459-1 Arbeitsblatt: Gas-Netzanschlüsse für maximale Betriebsdrücke bis einschließlich 5 bar

G 459-2 Arbeitsblatt: Gas-Druckregelungen mit Eingangsdrücken bis 5 bar

G 462 Arbeitsblatt: Gasleitungen aus Stahlrohren bis 16 bar Betriebsdruck

G 472 Arbeitsblatt: Gasleitungen aus Kunststoffrohren bis 16 bar Betriebsdruck

G 465-2 Arbeitsblatt: Gasleitungen für einen Auslegungsdruck bis einschließlich 16 bar; Instandsetzung; In- und Außerbetriebnahme

G 407 Merkblatt: Umstellung von Gasleitungen aus Stahlrohren bis 16 bar Betriebsdruck für die Verteilung von wasserstoffhaltigen methanreichen Gasen und Wasserstoff

G 408 Merkblatt: Umstellung von Gasleitungen aus Kunststoffrohren bis 16 bar Betriebsdruck für die Verteilung von wasserstoffhaltigen methanreichen Gasen und Wasserstoff

DVGW-Regelwerk für Gasinstallationen und -geräte (ab der HAE):

G 600 Arbeitsblatt: Technische Regel für Gasinstallationen (TRGI)

G 655 Merkblatt: Leitfaden H2-Ready Gasanwendung

G 680 Arbeitsblatt: Erhebung, Umstellung und Anpassung von Gasgeräten

DGUV Regelwerk:

DGUV Information 203-090: Arbeiten an in Betrieb befindlichen Gasleitungen – Handlungshilfe zur Erstellung der Gefährdungsbeurteilung

FBETEM-007: Gefährdungen und Schutzmaßnahmen bei Arbeiten im Bereich von Wasserstoffanlagen und -leitungen

Das DVGW-Forschungsprojekt G202312 „H2-Umstellmanagement für Gasverteilnetze“ hat sich mit dem Umstellprozess der Gasverteilnetze, der Hausinstallationen und angeschlossenen Gasanwendungen befasst. Abbildung 1 zeigt den Gesamtprozess der Umstellung einer Gasinstallation, wie er im Abschlussbericht empfohlen wird.

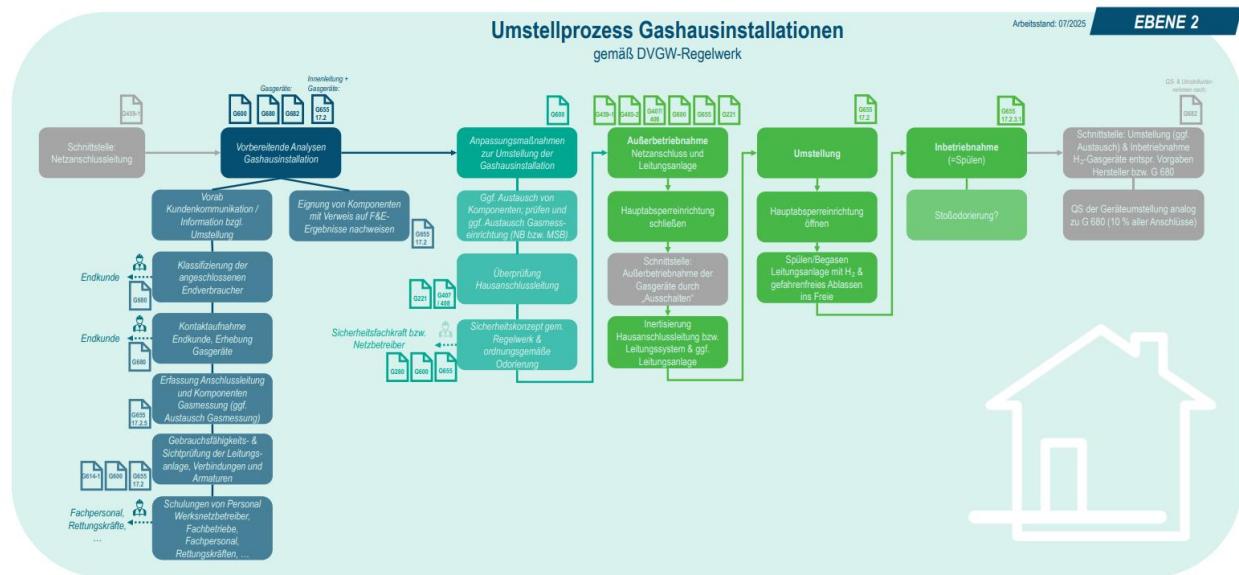


Abbildung 1: Umstellprozess von Gashausinstallationen von Erdgas auf Wasserstoff aus dem DVGW-Forschungsprojekt G202312 [3]

Maßgeblich für den Ablauf einer Gasumstellung ist das DVGW-Arbeitsblatt G 680 „Erhebung, Umstellung und Anpassung von Gasgeräten“ [4]. Um die Umstellung von Gasanwendungen zu ermöglichen, werden in dem Arbeitsblatt auch vorgelagerte Arbeitsschritte für das Gasnetz und Netzanschlüsse beschrieben. Die wichtigsten Arbeitsschritte in der Vorbereitungsphase und der Durchführung der Umstellung sind:

Vorbereitung:

1. Kundenkommunikation und -information sowie Erhebung der Gasgeräte nach G 680
2. Erfassung der Anschlussleitung und Komponenten, ggf. Austausch des Gaszählers (G 655 17.2)
3. Prüfung der Leitungen auf Gebrauchsfähigkeit mit Wasserstoff durch Dichtheitsprüfung oder Stoß-odorierung (G 655 17.2.3.1)
4. Anpassungsmaßnahmen, ggf. Austausch von Komponenten

Durchführung:

1. Außerbetriebnahme der Gasinstallationsleitung, Schließen der HAE
2. Gegebenenfalls Inertisierung der Leitungsanlage
3. Öffnen der HAE nach der Netzumstellung auf Wasserstoff
4. Spülen/Begasen der Leitung mit H₂ bis gewünschte Gasqualität erreicht ist

Anders als bei Leitungsanlagen, wo die Inertisierung zur Außerbetriebnahme nach DIN EN 12327 und G 469 vorgegeben ist, fordert G 655 keine Stickstoffbegasung bei der Umstellung von Gasinstallationen nach G 600 von Erdgas auf 100 % H₂. Die DGUV Information 203-090 und ihrer Ergänzung FBETEM-007 sind auch im Geltungsbereich der G 600 anzuwenden und verlangen eine Inertisierung, um die Gasfreiheit herzustellen (H₂ -> N₂ -> Luft) und um die Gasreinheit nach Abschluss der Arbeiten wiederherzustellen (Luft -> N₂ -> H₂). Explizit verboten wird die Verdrängung von Luft durch Wasserstoff, da hierbei ein explosionsfähiges Gemisch entstehen kann. [5] [6] [7]

In vielen Punkten ähnelt die Vorgehensweise der aktuell noch laufenden Marktraumumstellung von Erdgas L auf Erdgas H in Netzgebieten von Nordwestdeutschland sowie der Umstellung von Stadtgas auf Erdgas in der Vergangenheit. Somit kann bei der geplanten Umstellung von Netzgebieten auf Wasserstoff auf bestehende Expertise und Strukturen sowie auf einen Pool von erfahrenen Monteuren zurückgegriffen werden.

Offene Fragestellungen, die das DVGW-Projekt H2Umstell nicht beantworten konnte, liegen in der praktischen Erprobung des kompletten Umstellvorgangs in verschiedenen Varianten und der Optimierung der Verfahrensschritte. Dazu zählt der Umgang mit Mischungen von Erdgas, Stickstoff und Wasserstoff, die unweigerlich anfallen und sicher abgeblasen oder abgefackelt werden müssen aber auch die Toleranz der wasserstofffähigen Gasgeräte gegenüber Stickstoff und Erdgasresten in der Leitung.

3 Aufbau eines Versuchsstands im Technikum des DBI-GTI für die experimentellen Untersuchungen von Umstellvorgängen

3.1 Versuchsaufbau

Die Versuche zur Gasumstellung am verwendeten H₂-Ready Gasgerät wurden an einem Geräteversuchsstand im Technikum der DBI-GUT durchgeführt. Der Versuchsstand besteht aus einem Wärmetauscher mit Anschluss an den Heizkreislauf des Labors, einem Ausdehnungsbehälter und entsprechenden Anschlüssen an Abwasser-, Frischwasser, Gas- und Abgasleitungen. Die Gaszuführung erfolgte über eine 20 mbar Mischgasleitung, die von einer Gasmischchanlage mit Erdgas, Wasserstoff, Propan, Stickstoff und Mischungen der Gase versorgt wird.

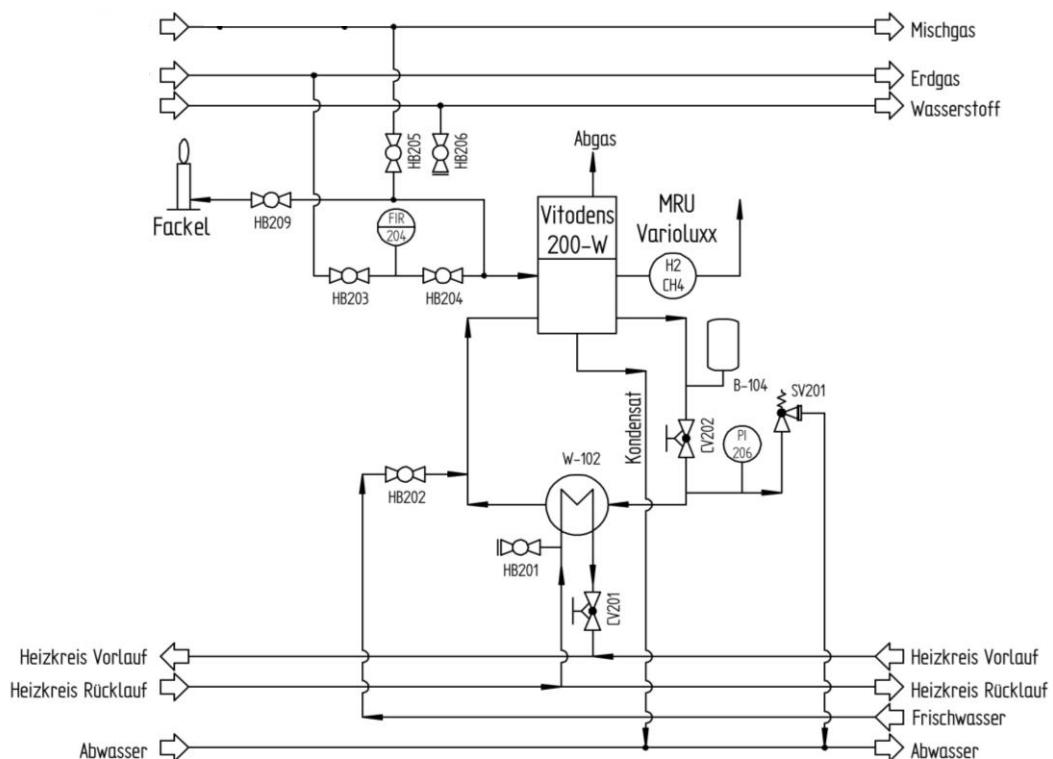


Abbildung 2: R&I Schema vom Versuchsaufbau

Am Gasanschluss des Gerätes ist ein T-Stück angebracht, über das die Leitung mithilfe der Fackel gespült werden kann. Das Messgerät zur Bestimmung der Brenngaszusammensetzung wird ebenfalls am Geräteanschluss mit einem Volumenstrom von 60 l/h mit Brenngas versorgt. Dieses Messgas wird hinter dem Messgerät mit einem Bunsenbrenner abgefackelt. Ein Balgengaszähler mit elektronischer Messwerterfassung wird zur Bestimmung und Aufzeichnung des Brenngasvolumenstroms verwendet. Das Gerät wird raumluftabhängig betrieben, d.h. die Verbrennungsluft wird aus dem Aufstellraum angesaugt und nicht aus einem doppelwandigen Abgasrohr.

Abbildung 2 zeigt den verwendeten Versuchsaufbau schematisch als R&I. In Abbildung 3 ist das verwendete Gasgerät im Technikum des DBI zu sehen. Am rechten Rand ist die senkrechte Anschlussleitung an die Mischgasleitung sichtbar, in die T-Stücke zum Spülen und zur Messung der Gaszusammensetzung eingebaut wurden. Anschließend gelangt Gas über einen Edelstahlwellrohr zum Gasgerät. Dabei handelt es sich um ein Brennwertgerät Viessmann Vitodens 200 B2HF-H2-32 mit einer Maximalleistung von 32 kW, welches als Vorserienversion mit den notwendigen Bauteilen für den Einbau des Brenner-Umrüstkits für 100 % H₂ ausgerüstet ist. Das Gerät besitzt eine Zulassung nach der Gasgeräteverordnung EU/2016/426 für den Betrieb mit reinem Wasserstoff durch die Ergänzungsprüfung DVGW ZP 3100.100. Für die Praxisversuche wird Wasserstoff aus Flaschenbündeln mit 99,9 % Reinheit als Brenngas genutzt.



(a)



(b)

Abbildung 3: Viessmann Vitodens 200 B2HF-H2-32 Gasgerät im DBI-Technikum mit Anschluss an die Mischgasleitung (a) und Gasmischzanlage (b) über die die Mischgasleitung mit Erdgas, Wasserstoff, Propan und Stickstoff versorgt werden kann

3.2 Messgeräte und Sensoren

Mobile Gasfackel

Zum Spülen der Leitung und Abfackeln von Restgasen werden die mobilen Gasfackeln S und M der Esders GmbH eingesetzt. Die Fackeln sind für den Betrieb mit 100 % Wasserstoff, Erdgas und Propan vorgesehen. Größe S eignet sich in der verwendeten Größe für den Einsatz an häuslichen Gasinstallationen im Niederdruckbereich. Die nächstgrößere Variante M ist mit einem Propan-Pilotbrenner ausgestattet und eignet sich für höhere Volumenströme im Nieder- und Mitteldruckbereich bis 1 bar. Beide Modelle verfügen über eine integrierte Flammenrückslagsperre und erfüllen die Anforderungen der EU-Methanverordnung. Die Fackel wird über einen 20 Meter langen Gasschlauch an die Mischgasleitung vor dem Gasgerät angeschlossen.

Synthesegasmessgerät MRU Varioluxx Syngas

Das MRU Varioluxx Syngas ist ein mobiles Prozessgas-Analysegerät für Sondergase aus der Stahlindustrie und der Vergasung von Biomasse, Abfall und flüssigen Kohlenwasserstoffen. Es verfügt über ein NDIR-Modul zur kontinuierlichen Messung der Konzentrationen von CO, CO₂, CH₄ und weiterer Komponenten. Zusätzlich

ist ein elektrochemischer Sensor zur Bestimmung des Sauerstoffgehalts integriert. Für die Analyse von Wasserstoff kommt ein Wärmeleitfähigkeitssensor zum Einsatz, der Konzentrationen im Bereich von 0 bis 100 % erfassen kann. Der Stickstoffanteil wird über eine Differenzbildung aus den übrigen Komponenten berechnet. Durch diese Kombination an Sensoren ist das Messgerät dafür geeignet, die Zusammensetzung von Gemischen aus Erdgas, Stickstoff und Wasserstoff präzise zu messen und wird im Rahmen des Projekts dazu genutzt, um die Gaszusammensetzung vor dem Gasgerät zu bestimmen und zu dokumentieren

Abgasmessgerät MRU MGA Prime

Zur Analyse der Abgaszusammensetzung und Emissionen wird das Messsystem MRU MGA Prime verwendet. Es ist mit einem NDIR-Modul ausgestattet, das die Abgaskomponenten wie NO, NO₂, N₂O, SO₂, CO₂, CO, CH₄ und C₃H₈ detektiert. Ergänzend kommen elektrochemische Sensoren für O₂ und H₂ (bis 2 Vol.-%) zum Einsatz. Damit eignet sich das Gerät für eine umfassende Verbrennungsanalyse inklusive der Emissionen, unverbrannten Brennstoff und dem feuerungstechnischen Wirkungsgrad.

Demonstrator eines innovativen H₂-Sensors vom Fraunhofer IPMS

Das Fraunhofer IPMS in Dresden entwickelt derzeit einen neuartigen Sensor, der auf mikrokapazitiven Schallgeschwindigkeitssensoren basiert und damit in der Lage sein soll, die Konzentration von Wasserstoff und Erdgas zu bestimmen. Ursprünglich war geplant den Sensor während der gesamten Versuchsdauer zu betreiben und die Messergebnisse mit denen des MRU Varioluxx zu vergleichen. Die Fertigstellung eines funktionsfähigen Prototyps verzögerte sich jedoch, sodass der Sensor nur an einem Versuchstag getestet werden konnte. Die Messungen fanden während einer Umstellung von Wasserstoff auf Erdgas statt, sind jedoch aufgrund des experimentellen Charakters des Sensors nicht im Abschlussbericht enthalten. Mit der zunehmenden Umstellung von Netzabschnitten ist künftig ein stark wachsender Bedarf an kostengünstigen und kompakten H₂/CH₄-Sensoren zu erwarten. Das Messprinzip, die Gaszusammensetzung über die Schallgeschwindigkeit zu bestimmen hat sich als funktional erwiesen und könnte für solche Anwendungen eine vielversprechende Lösung darstellen. [8]

4 Experimentelle Untersuchungen zu Umstell- und Spülvorgängen an einem Gasgerät mit H₂-Umrüstkit

4.1 Versuchsplan

Versuch 1: Inbetriebnahme Versuchsaufbau und Test Umrüstkit

Vorgehen:

1. Inbetriebnahme Gasgerät mit Erdgas an der Erdgasleitung
2. Gerät abschalten, Umbau auf Wasserstoffbetrieb
3. Anschluss des Geräts an die wasserstoffgefüllte Mischgasleitung
4. Inbetriebnahme Gasgerät mit Wasserstoff

Zu Beginn des Versuchsplans wird das Gasgerät nacheinander mit beiden Brenngasen (Erdgas und Wasserstoff) in Betrieb genommen und bei verschiedenen Leistungsstufen im stationären Betrieb getestet. Dabei liegt der Fokus noch nicht auf der Gasumstellung, sondern darauf, den Einbau des Umstellkits zu erproben und sicherzugehen, dass die Messtechnik einsatzfähig ist. Ergänzt wird der Versuch durch eine Abgasmessung, bei der die Abgasbestandteile und -emissionen sowie die Effizienz verglichen werden sollen. Der Vorversuch liefert dadurch die Grundlage für die Durchführung von Versuchen zur Umstellung von Erdgas auf Wasserstoff.

Versuch 2: Umstellung mit Stickstoffspülung bei gefüllter Gasleitung

Vorgehen:

1. Inbetriebnahme Gasgerät mit Erdgas
2. Umstellung Gasversorgung im laufenden Betrieb von Erdgas auf Stickstoff
3. Gasgerät geht in Störung (verloschene Flamme)
4. Umbau auf Wasserstoffbetrieb, Umstellung der Gasversorgung von Stickstoff auf Wasserstoff
5. Abblasen/Abfackeln der CH₄/H₂/N₂-Mischung bis möglichst reines H₂ in der Leitung anliegt
6. Inbetriebnahme Gasgerät mit Wasserstoff

Versuch 2 beinhaltet die erste Variante der Gasumstellung mit Stickstoffspülung und beginnt zunächst mit der Inbetriebnahme des Gasgeräts unter Erdgas. Im laufenden Betrieb wird die Gasversorgung anschließend auf Stickstoff umgestellt, was zum Erlöschen der Flamme und zur Störung des Geräts führt. Nach dem Abschalten erfolgt der Umbau auf Wasserstoffbetrieb, gefolgt von der Umstellung der Gasversorgung von Stickstoff auf Wasserstoff. Um eine möglichst reine Wasserstoffatmosphäre in der Leitung zu erreichen, wird die vorhandene CH₄/H₂/N₂-Mischung durch Abblasen bzw. Abfackeln aus der Leitung gespült. Abschließend wird das Gasgerät erneut in Betrieb genommen, diesmal mit Wasserstoff als Brenngas.

Ziel des Versuchs ist es, den Umstell- und Spülvorgang ohne Druckabsenkung der Gasleitung zu erproben. Dabei sollte auch die Eignung des Gasgeräts zur Verbrennung von Rest-Erdgas untersucht werden. Ein weiterer Fokus lag auf der Bestimmung des kritischen Stickstoffgehalts, bei dem das Gasgerät abschaltet.

Versuch 3: Umstellung mit zweistufiger Stickstoffspülung bei druckloser Gasleitung

Vorgehen:

1. Inbetriebnahme Gasgerät mit Erdgas
2. HAE verschließen, anschließend Umstellung der Gasversorgung von Erdgas auf Stickstoff
3. Gasgerät geht in Störung (Gasdruck zu niedrig)
4. Öffnen der HAE, Spülen der Leitung und Abblasen/Abfackeln der $\text{CH}_4\text{-N}_2$ Mischung, Schließen HAE
5. Umbau auf Wasserstoffbetrieb, Umstellung der Gasversorgung von Stickstoff auf Wasserstoff
6. Öffnen der HAE, Abblasen/Abfackeln der $\text{N}_2\text{/H}_2$ -Mischung bis möglichst reines H_2 in der Leitung anliegt
7. Inbetriebnahme Gasgerät mit Wasserstoff

Versuch 3 enthält eine zweite Variante der Umstellung mit Stickstoffspülung, bei der die Leitung während des Versuchs entspannt wird. Nach der Inbetriebnahme des Gasgeräts unter Erdgasbetrieb wird die Hauptabsperreinrichtung (HAE) verschlossen. Aufgrund des sinkenden Gasdrucks geht das Gerät in Störung. Anschließend wird die Gasversorgung auf Stickstoff umgestellt. Daraufhin wird der HAE wieder geöffnet, um die Leitung zu spülen und die entstandene $\text{CH}_4\text{-N}_2$ -Mischung durch Abblasen bzw. Abfackeln zu entfernen. Nach erfolgreicher Spülung wird die HAE erneut geschlossen und das Gerät für den Wasserstoffbetrieb umgebaut. Im nächsten Schritt erfolgt die Umstellung der Gasversorgung von Stickstoff auf Wasserstoff. Durch erneutes Öffnen des HAE wird die $\text{N}_2\text{/H}_2$ -Mischung abgeblasen bzw. abgefackelt, bis möglichst reiner Wasserstoff in der Leitung anliegt. Abschließend wird das Gasgerät mit Wasserstoff in Betrieb genommen.

Ziel des Versuchs ist es, den Umstell- und Spülvorgang unter Berücksichtigung einer zwischenzeitlichen Druckabsenkung der Gasleitung zu erproben. Diese Druckabsenkung ist der wesentliche Unterschied zu Versuch 2 und soll die Menge an entstehendem Erdgas-Stickstoff-Gemisch reduzieren, welches je nach N_2 -Gehalt schlecht oder gar nicht brennbar ist. Der Gehalt von Methan, Stickstoff und Wasserstoff wird nach dem Umstellen und Spülen bestimmt, um Rückschlüsse auf die Effektivität des Spülprozesses ziehen zu können.

Versuch 4: Umstellung ohne Stickstoffspülung bei druckloser Gasleitung

Vorgehen:

1. Inbetriebnahme Gasgerät mit Erdgas
2. HAE verschließen
3. Gasgerät geht in Störung wegen zu niedrigem Gasdruck
4. Umbau auf Wasserstoffbetrieb
5. Umstellung Gasversorgung von Erdgas auf Wasserstoff, Öffnen der HAE
6. Abfackeln des Erdgas-Wasserstoff Gemischs, bis eine ausreichende Gasqualität erreicht ist
7. Inbetriebnahme Gasgerät mit Wasserstoff

Versuch 4 enthält einen Umstellvorgang von Erdgas auf Wasserstoff ohne Inertisierung mit Stickstoff. Ähnlich wie bei Versuch 3 wird im laufenden Betrieb mit Erdgas der Hauptabsperrhahn (HAE) verschlossen, wodurch der Gasdruck in der Leitung sinkt und das Gerät in Störung geht. Nach dem Abschalten erfolgte der Umbau auf Wasserstoffbetrieb. Die Gasversorgung wird nun direkt von Erdgas auf Wasserstoff umgestellt, und der HAE wieder geöffnet, sodass das Gerät erneut mit Wasserstoff in Betrieb genommen werden kann.

Ziel des Versuchs ist es, den Umstellvorgang unter Druckabsenkung ohne vorherige Spülung der Gasleitung zu untersuchen. Dabei soll die Sensitivität des Gasgeräts gegenüber Erdgasresten im Wasserstoffbetrieb

bewertet werden. Zudem wird der Restgehalt von Methan nach der Umstellung bestimmt, um Rückschlüsse auf mögliche Beeinflussungen der Verbrennung durch verbliebene Erdgasanteile zu ziehen.

Versuch 5: Maximaler CH₄-Gehalt im Wasserstoff

Vorgehen:

1. Inbetriebnahme Gasgerät mit 100 % Wasserstoff
2. Schrittweise Erhöhung der Beimischung von CH₄ im laufenden Betrieb. In Schritten von 5-10 % H₂ gemessen am Gasgerät wird das Gerät abgeschaltet und neu gezündet. Dieses Vorgehen wird wiederholt, bis das Gerät im laufenden Betrieb oder beim Zünden in Störung geht.

Nach einer Gasumstellung ohne Spülen mit Stickstoff können sich noch Reste von Erdgas in der Leitung befinden, deren Konzentration immer weiter abnimmt, je länger die Leitung mithilfe einer Fackel gespült wird. Versuch 5 soll zeigen, welche Reinheit an H₂ mindestens erreicht sein muss, damit das auf H₂ umgebaute Gerät zündet und ob es ab diesem Punkt als Alternative zur Fackel oder dem reinen Abblasen des Mischgases verwendet werden kann.

Die Versuchsdurchführung beginnt mit der Inbetriebnahme des Gasgeräts unter Verwendung von 100 % Wasserstoff. Im weiteren Verlauf wird dem Wasserstoff im laufenden Betrieb schrittweise Methan beigemischt. Nach jeder Erhöhung des CH₄-Anteils um etwa 5-10 % bezogen auf den ursprünglichen Wasserstoffanteil wird das Gerät abgeschaltet und erneut gezündet. Dieses Vorgehen wird so lange wiederholt, bis das Gerät entweder im laufenden Betrieb in Störung geht oder ein Zündvorgang nicht erfolgreich ist.

Ziel des Versuchs ist es, die Toleranz des Wasserstoffbrenners gegenüber Methanresten sowohl im laufenden Betrieb als auch beim Zündvorgang zu bestimmen. Dabei soll ermittelt werden, bis zu welchem CH₄-Anteil das Gerät zuverlässig arbeitet und ab wann Störungen auftreten. Parallel dazu liefert die Abgasmessung Informationen darüber, wie sich der zunehmende Anteil an Erdgas auf die Verbrennungsgüte und die Bildung der Schadstoffe CO und NO_x auswirkt.

4.2 Betrachtung des Gerätebetriebs mit Erdgas und Wasserstoff

Der Gerätebetrieb mit beiden Brenngasen – Erdgas und Wasserstoff – verlief ohne Probleme. Die gesamte Peripherie im Labor, bestehend aus Versorgungsleitung, Mischanlage, Messgeräten und Gasfackel, ist vollständig für die weitere Versuchsdurchführung einsatzbereit. Während des Betriebs mit Erdgas bei voller Leistung wurden hohe Vorlauftemperaturen von über 85 °C erreicht, wobei der Wärmeübertrager am Versuchstand die abführbare thermische Leistung begrenzt. Um das Wasser im Heizkreislauf unter dem Siedepunkt zu halten, wurde eine Begrenzung der maximalen Geräteleistung im Versuchsbetrieb mit Erdgas auf 80 % (24 kW) vorgenommen. In der Wasserstoffkonfiguration begrenzt die Brennersteuerung die Geräteleistung automatisch auf eine maximale Vorlauftemperatur von 79 °C, was aufgrund der eingeschränkten Wärmeabnahme des Versuchsstands schon bei ca. 14 kW der Fall war. Die Verfahrensschritte zur Nutzung des Wasserstoff-Umrüstssets wurden gemäß Anleitung des Herstellers erfolgreich erprobt.

Tabelle 1 zeigt die Abgasemissionen, den Gehalt von Restsauerstoff, die Abgastemperatur und den nach 1. BlmschV berechneten feuerungstechnischen Wirkungsgrad (η_{FT}). Im Vergleich zum Erdgasbetrieb zeigte sich, dass beim Einsatz von Wasserstoff aufgrund des fehlenden Kohlenstoffs keine CO-Emissionen auftreten und die NO_x-Emissionen deutlich niedriger ausfallen. Die gültigen Emissionsgrenzwerte für Gasgeräte werden eingehalten. Die Konzentration von Sauerstoff im Abgas ist im Wasserstoffbetrieb etwas höher als im Erdgasbetrieb, was vermutlich dabei hilft, die Flammentemperatur und damit auch die Bildung von Stickoxiden zu senken.

Tabelle 1: Abgasemissionen und Effizienz des Gasgerätes im Erdgasbetrieb und im Wasserstoffbetrieb

Brennstoff	Leistung	CO	NO _x *	Rest-O ₂	T Abgas	η _{FT}
Erdgas	3,0 kW	9,1 ppm	7 mg/m ³	6,8 %	35,2 °C	99,4 %
Erdgas	15,9 kW	31 ppm	38 mg/m ³	5,3 %	53,4 °C	98,6 %
Erdgas	24,0 kW	40 ppm	19 ppm	4,9 %	54,3 °C	98,5 %
H ₂	3,1 kW	0 ppm	5 mg/m ³	8,9 %	32,6 °C	99,5 %
H ₂	14,2 kW	0 ppm	12 mg/m ³	6,1 %	59,3 °C	98,2 %

*in mg/m³ bei 3 % Rest-O₂

4.3 Versuchsreihen zur Umstellung mit Stickstoffspülung

4.3.1 Einstufige Stickstoffspülung (Versuch 2)

Abbildung 4 zeigt die Brenngaszusammensetzung während des Versuchs und Abbildung 5 die Abgaszusammensetzung während der Umstellung von Erdgas auf Stickstoff in den ersten 15 Minuten. Zur Orientierung ist in beiden Darstellungen der Volumenstrom (graue Linie) enthalten. Tabelle 2 enthält ein Versuchsprotokoll mit allen relevanten Ereignissen während der Durchführung. Alle Angaben zur Brenngaszusammensetzung im Text und den Darstellungen beziehen sich auf den Volumenanteil (Vol.-%) des Einzelgases.

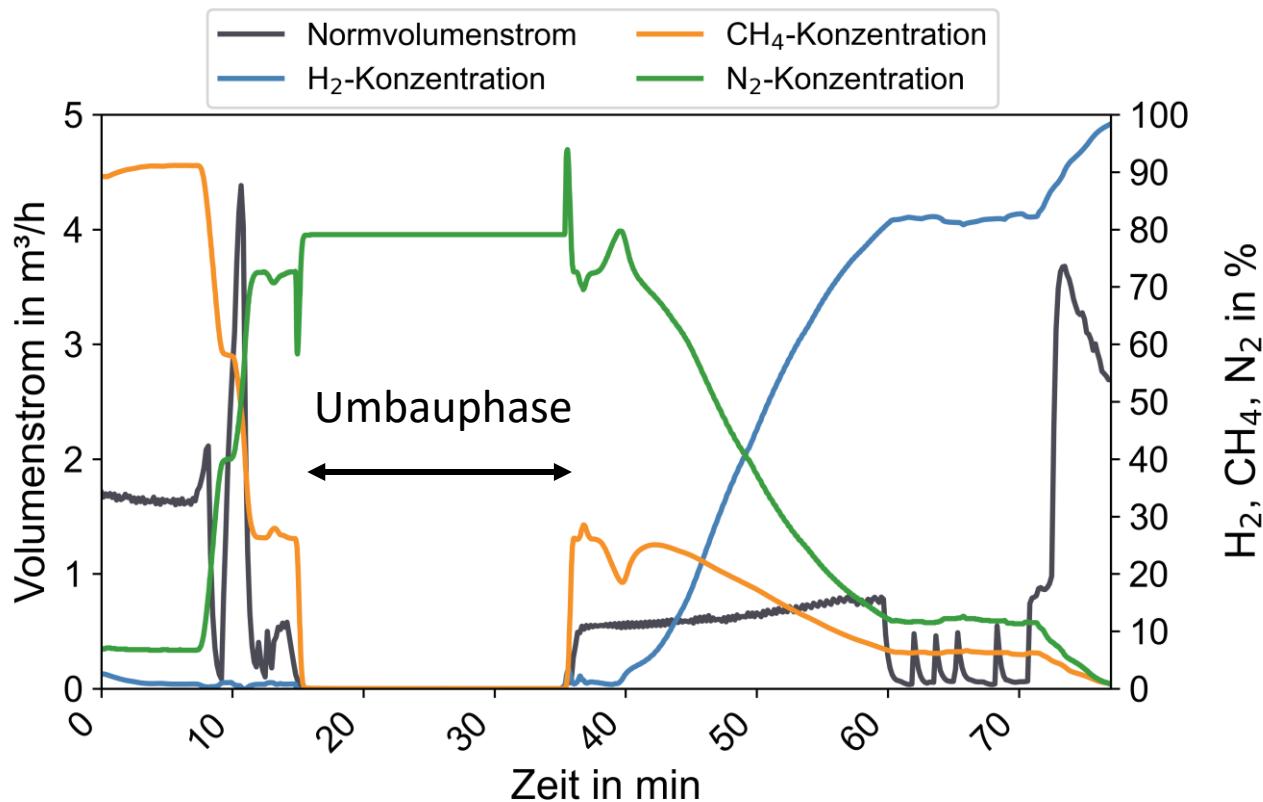


Abbildung 4: Verlauf von Brenngaszusammensetzung und Gasvolumenstrom während Versuch 2

Der vollständige Umstellvorgang dauerte 80 Minuten und umfasste eine Phase mit aktivem Fackelbetrieb nach der Inertisierung. Die Umstellung auf Stickstoff fand im laufenden Gerätetrieb, ungefähr in Minute 5 statt. Zwei bis drei Minuten später kam es zum sprunghaften Anstieg der Stickstoffkonzentration am Gerät auf 40 %, woraufhin erstmals die Flamme verlöschte. Bei einem erneuten Zündversuch direkt danach konnte der

Brenner wieder zünden und die Flamme kurz aufrecht erhalten. Dabei erhöhte sich die N₂-Konzentration auf 70 %, was zu einem erneuten Flammenverlust führte. Da sich dieses Gemisch auch nicht mehr mit der Fackel zünden ließ, wurde der Spülvorgang beendet und mit dem Einbau des Umrüstkits begonnen. Während dem Umbau ist das Brenngasanalysegerät nicht an die Gasleitung angeschlossen, sondern wird von Luft (79 % N₂) durchströmt. Nach dem Umbau und der Umstellung auf Wasserstoff wurde das Mischgas zunächst bei eingeschalteter Piezozündung durch die Fackel abgeblasen, bis in Minute 46 bei 30 % H₂, 20 % CH₄ und 50 % N₂ die Flamme zündete. Da die Fackel ohne Pilotbrenner arbeitet, kommt es vor dem Erreichen einer zündfähigen Mischung zu erhöhten Mengen von unverbrannten CH₄ und H₂. Hier würde sich eher eine Fackel mit Pilotbrenner eignen, da dann keine zusätzlichen Methan- und Wasserstoffemissionen entstehen.

In Minute 60 wurde das Abfackeln beendet, da mehr als 80 % H₂ in der Mischgasleitung nachweisbar waren. Aufgrund der Reste von Erdgas und Stickstoff waren die ersten vier Zündversuche erfolglos, erst beim fünften Versuch zündete das Gerät erfolgreich. Die erfolglosen Zündversuchen zeigen sich auch in Abbildung 4 zwischen Minute 60 und 70 durch das viermalige Abfallen des Normvolumenstroms. Beim Betrieb des Gasgerätes in Teillast wurden die verbliebenen Erdgas- und Stickstoffreste innerhalb von 10 Minuten aus der Leitung gespült. Ein längeres Abfackeln hätte die Reinheit des Wasserstoffs zum Zeitpunkt des Gerätestarts verbessert.

Tabelle 2: Protokoll von Versuch 2

Zeit [min]	Ereignis
0	Versuchsbeginn bei 50 % Leistung
5	Umstellung von EG auf N ₂
7-10	N ₂ -Gehalt steigt sprunghaft
8	Flamme verlöscht bei 40 % N ₂
9	Gerät zündet und kann Flamme für 1 ½ Minuten halten
10	Flamme verlöscht erneut bei 70 % N ₂ , erneute Zündversuche sind erfolglos
15-35	Umbau auf H ₂ -Konfiguration, Umstellung von N ₂ auf H ₂
35-60	Mischgas abblasen/-fackeln bis 80 % H ₂ erreicht ist
46	Fackel zündet bei 30 % H ₂ + 20 % CH ₄ + 50 % N ₂
70	Zündung Gasgerät (erfolgreich beim 5. Versuch)
80	Versuchsende bei 98 % H ₂

Abbildung 5 zeigt die Abgaszusammensetzung in den ersten 15 Minuten des Versuchs. Ab Minute 7 steigt der Stickstoffanteil an, wodurch die Konzentrationen von CO und NO_x sinken, während der Restsauerstoffgehalt konstant bleibt und der Brenngasvolumenstrom zunimmt. Trotz des zweimaligen Verlöschen der Flamme konnte keine erhöhte CO-Bildung detektiert werden. Da der Sauerstoffgehalt im Abgas ab Minute 9 wieder fällt, kann davon ausgegangen werden, dass sich trotz des hohen Stickstoffgehalts erneut eine Flamme zünden und für ein bis zwei Minuten aufrechterhalten ließ.

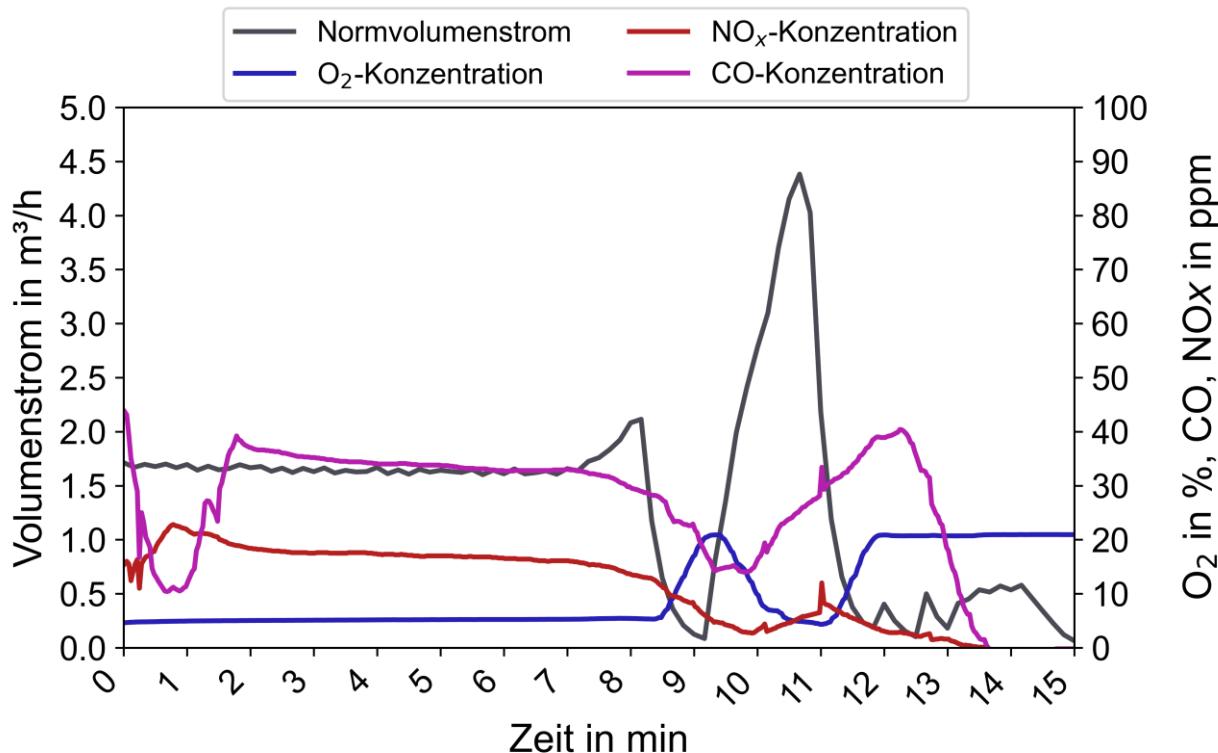


Abbildung 5: Abgaszusammensetzung und Gasvolumenstrom während der ersten Phase von Versuch 2

4.3.2 Zweistufige Stickstoffspülung (Versuch 3)

Abbildung 6 zeigt den Volumenstrom und die Brenngaszusammensetzung während des Versuchs. Ziel hierbei war eine Umstellung mit Stickstoffspülung nachzustellen, bei der das Gasgerät dazu genutzt wird, um die Leitung vor der Spülung leer zu ziehen und auf Umgebungsdruck zu entspannen. Tabelle 2 enthält ein Versuchsprotokoll mit allen relevanten Ereignissen während der Durchführung.

Zu Beginn des Versuchs wurde das Gasgerät mit Erdgas bei Teillast betrieben. Im Betrieb wurde der Kugelhahn zwischen Gasmischlanze und Gerät geschlossen, was der Hauptabsperreinrichtung in der häuslichen Gasinstallation entspricht. Dabei löste das Sicherheitsabsperrenventil (SAV) des Druckreglers auf Grund des Unterschreitens des unteren Auslösedrucks aus. Dies entspricht dem Fallen der Gasmangelsicherung bei einem typischen Hausanschluss. Im nächsten Schritt wurde die Gasversorgung auf Stickstoff umgestellt und die HAE sowie der Kugelhahn zur Fackel geöffnet. Da dieser Leitungsabschnitt durch das gefallene SAV noch nicht unter Druck stand, wurde kurzzeitig vom Analysegerät Luft durch die Fackel eingesaugt. Dies ist in der Abbildung als Anstieg der Stickstoffkonzentration bei Minute 11 und 16 zu erkennen. Nachdem das SAV entriegelt wurde, füllte sich die Gasleitung mit dem Erdgas-Stickstoff-Gemisch. Daraufhin wurde die Fackel kurzzeitig gezündet, die Flamme verlosch aber innerhalb von 90 Sekunden bei einem Stickstoffgehalt von ca. 70 %. Beim Einbau des Umrüstkits war die Leitung mit einem Gasgemisch aus etwa 80 % Stickstoff und 20 % Methan gefüllt.

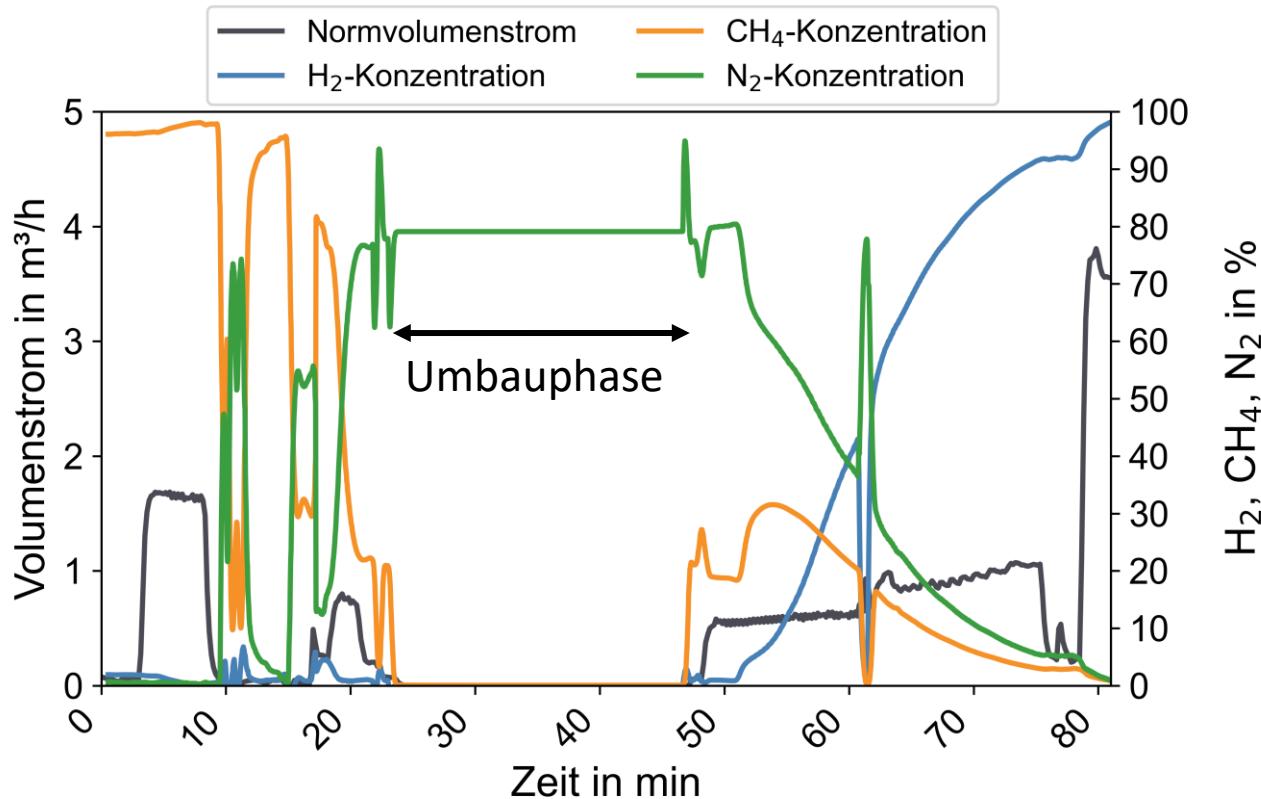


Abbildung 6: Verlauf von Brenngaszusammensetzung und Gasvolumenstrom während Versuch 3

Anschließend wurde das N_2/CH_4 -Gemisch innerhalb von 25 Minuten durch Abblasen und Abfackeln mit der Fackel durch Wasserstoff verdrängt. Die Fackel zündete in Minute 58 bei einem Gemisch aus 25 % H_2 , 25 % CH_4 und 50 % N_2 . In Minute 69 löste sich kurzzeitig der Anschluss des Brenngas-Analysegerätes von der Gasleitung, sodass das Gerät für einen Moment Luft ansaugte.

Zum Zeitpunkt der Zündung des Gasgerätes lag der Wasserstoffanteil in der Leitung bei etwa 90 %. Trotz der noch vorhandenen Reste von Erdgas und Stickstoff in der Leitung konnte das Gasgerät beim zweiten Versuch erfolgreich mit Wasserstoff gestartet werden. Insgesamt dauerte der Umstellvorgang etwa 80 Minuten.

Tabelle 3: Protokoll von Versuch 3

Zeit [min]	Ereignis
3	Zündung Gasgerät und Versuchsbeginn bei 50% Leistung
9	Schließen der HAE, Gasgerät geht in Störung, SAV fällt, Umstellung auf N_2
10-17	Während die Leitung drucklos ist, zieht das Messgerät kurzzeitig Falschluft durch die Fackel an
ca. 17	Entriegeln des SAV
19-21	Fackel zündet, verlöscht nach kurzer Zeit
25-45	Umbau auf H_2 -Konfiguration, Umstellung von N_2 auf H_2
50-75	Mischgas wird durch die Fackel abblasen/abgefackelt
58	Fackel zündet bei 25 % H_2 + 25% CH_4 + 50 % N_2)
80	Zündung Gasgerät (2. Versuch), Versuchsende bei 98 % H_2

4.4 Versuchsreihen zur Umstellung ohne Stickstoffspülung

4.4.1 Versuch 4: Umstellung ohne Stickstoffspülung bei druckloser Gasleitung

In Abbildung 7 ist der Verlauf des Volumenstroms und der Zusammensetzung des Brenngases während Versuch 4 grafisch dargestellt. Tabelle 4 enthält in Ergänzung dazu ein Protokoll mit den wichtigsten Ereignissen. Ähnlich wie in Versuch 3 wurde das Gasgerät dazu genutzt, die mit Erdgas gefüllte Leitung zu entspannen, jedoch fand bei diesem Experiment keine Zwischeninertisierung mit Stickstoff statt, sondern die Gasversorgung wurde direkt von Erdgas auf Wasserstoff umgestellt. Dadurch gibt es nur eine Phase mit aktivem Fackelbetrieb, direkt nach dem Einbau des Wasserstoffkits.

Wie bei den vorangegangenen Versuchen wurde das Brenngasanalysegerät während des Umbaus von der Gasleitung getrennt und mit Luft (79 % N₂) durchströmt. Beim Einbau des Umrüstkits befand sich die Leitung im drucklosen Zustand und war mit Erdgas gefüllt. Nach dem Umbau wurde die Gasversorgung auf Wasserstoff umgestellt, die HAE geöffnet und die Fackel gezündet. Innerhalb von 15 Minuten wurde das verbliebene Erdgas zum größten Teil von Wasserstoff verdrängt. In dieser Zeit zeigte das Messgerät eine Stickstoffkonzentration von etwa 3–4 % N₂ im Brenngas an, was etwas höher ist als im Erdgas natürlicherweise zu erwarten wäre. Das kann auf Messungenauigkeiten oder auf Stickstoffreste von vorangegangenen Versuchen zurückzuführen sein, die erst durch die erneute Zugabe von H₂ aus der Leitung gedrängt wurden.

Trotz der Reste von 20 % Erdgas im Mischgas konnte das Gasgerät beim zweiten Versuch erfolgreich gestartet werden. Erst mit dem Betrieb des Gasgeräts sank die CH₄-Konzentration in der Leitung auf unter 2 %. Ein längeres Abfackeln hätte die Reinheit des Wasserstoffs zum Zeitpunkt des Gerätstarts weiter erhöhen können. Der Umstellvorgang dauerte insgesamt 80 Minuten.

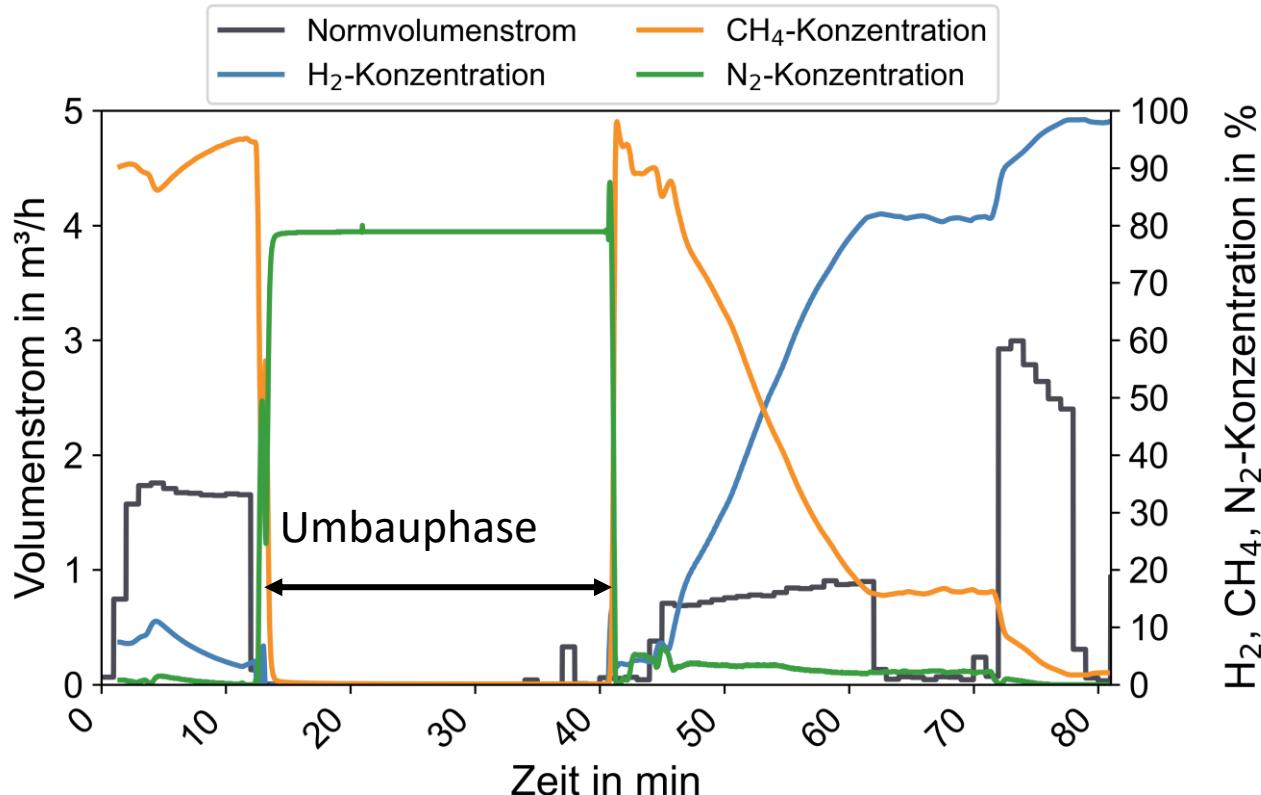


Abbildung 7: Verlauf von Brenngaszusammensetzung und Gasvolumenstrom während Versuch 4

Tabelle 4: Protokoll von Versuch 4

Zeit [min]	Ereignis
0	Zündung Gerät bei 50 % Last
10	Schließen der HAE, Gasgerät geht in Störung
11-40	Umbau auf H ₂ -Konfiguration, Umstellung von EG auf H ₂ und Öffnen der HAE
44-61	Mischgas abfackeln, H ₂ Anteil steigt stetig bis 80% H ₂
70	Zündung Gasgerät (erfolgreich beim 2. Versuch)
80	Versuchsende bei 98 % H ₂

4.4.2 Versuch 5: Toleranz des H₂-Brenners gegenüber Erdgasresten

Abbildung 8 stellt den Verlauf von Brenngaszusammensetzung und Gasvolumenstroms dar und in Tabelle 5 ist das Protokoll mit Zeitstempeln aufgeführt. Die Gemischzusammensetzung am Gerät gleicht sich nur allmählich nach 10-20 Minuten Wartezeit an die Vorgabe an der Mischanlage an. Hier wirkt sich die lange Leitungsstrecke zwischen Mischanlage und Gerät negativ auf die Versuchsdurchführung aus, da bis zum Erreichen einer eingestellten Zusammensetzung viel Zeit vergeht. Eine Beimischung von weniger als 10 % Erdgas lässt sich aufgrund des eingeschränkten Regelbereichs der verbauten MFC nicht realisieren. Deshalb beginnt die Messreihe mit 10 % Erdgas und 90 % H₂, wobei der Erdgasanteil in 10 %-Schritten an der Mischanlage erhöht wird. Die stufenweise Änderung der Brenngaszusammensetzung an der Mischanlage erreicht das Gasgerät verzögert und vergleichmäßig, was auf das Puffervolumen der Anlage zurückzuführen ist.

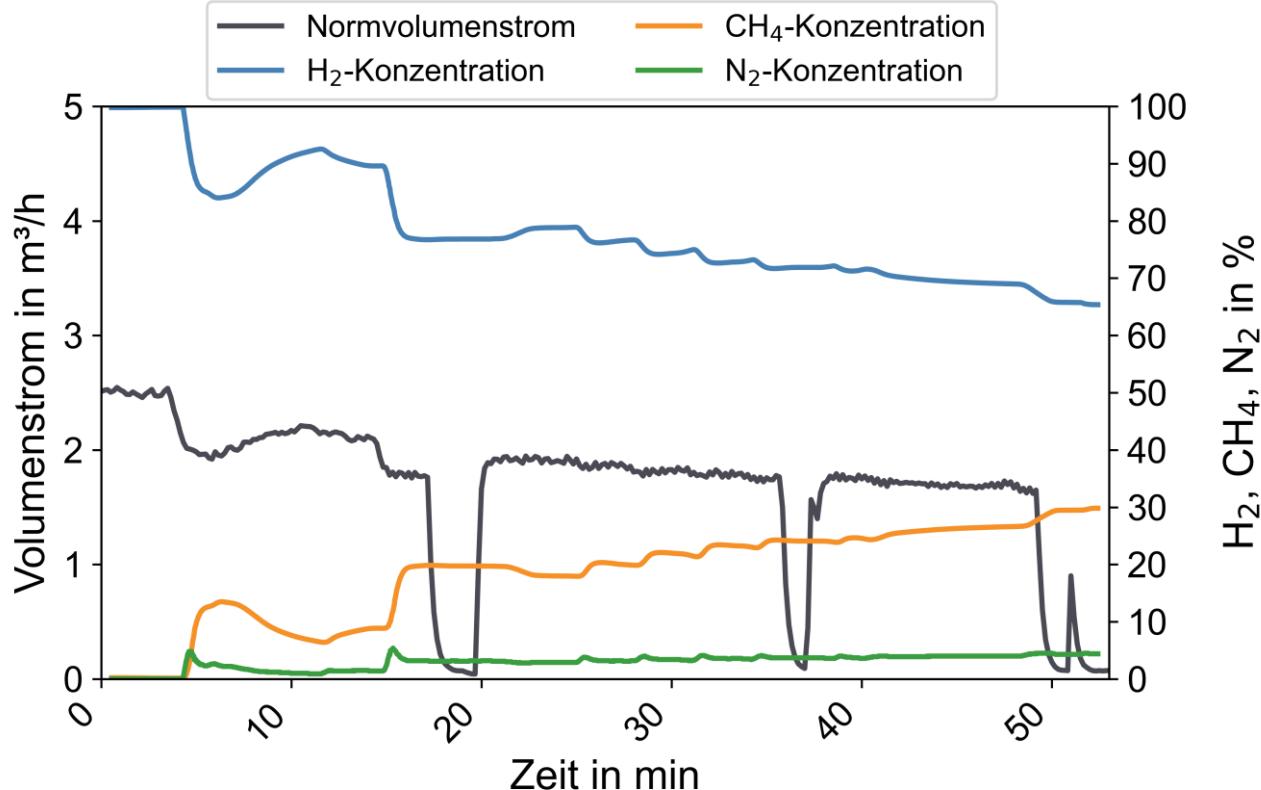


Abbildung 8: Verlauf von Brenngaszusammensetzung und Gasvolumenstrom während Versuch 5

Auch hier zeigen sich wieder Reste von Stickstoff im Mischgas die aus vorangegangenen Versuchen und aus dem Erdgas selbst stammen können. Die vorherigen Tests haben gezeigt, dass sich das Gasgerät auch mit

etwa 80 % H₂ sicher zünden und betreiben lässt. Der erste Zündversuch wurde daher bei 20 % CH₄ durchgeführt. Auch bei einem Erdgasanteil 25 % zündet das Gerät zuverlässig beim ersten Versuch. Bei etwa 30 % ist die Flamme im laufenden Betrieb erloschen und das Gerät konnte auch im darauffolgenden Zündversuch auch nicht mehr gezündet werden. Damit zeigt sich, dass die Toleranzschwelle des mit H₂ betriebenen Geräts gegenüber Erdgas bei etwa 30 % CH₄ liegt.

Tabelle 5: Protokoll von Versuch 5

Zeit [min]	Ereignis
0	Versuchsbeginn bei 100 % H ₂
5	Umstellung auf 90 % H ₂ /10 % CH ₄
15	Umstellung auf 80 % H ₂ /20 % CH ₄
18-20	Abschalten Gerät und Zündversuch bei 20 % Erdgas
21	Umstellung auf 70 % H ₂ /30 % CH ₄
38	Abschalten Gerät und Zündversuch bei ca. 25 % Erdgas
40	Umstellung auf 60 % H ₂ /40 % CH ₄
50	Gerät geht in Störung (ohne manuelles Abschalten!) bei 65% H ₂ und 30 % CH ₄ , erneuter Zündversuch erfolglos

Abbildung 9 zeigt den Verlauf der Abgaszusammensetzung und -emissionen im Verlauf von Versuch 5. In der Darstellung wurde die CO-Konzentration mit dem Faktor 0,2 multipliziert, um sie auf der gleichen Achse wie die NO_x-Konzentration darstellen zu können. Der Maximalwert von 100 an der vertikalen Achsenbeschriftung entspricht also einer Konzentration von 500 ppm CO. Die NO_x-Emissionen blieben während des gesamten Versuchs unauffällig unter 10 ppm und zeigen keinen signifikanten Anstieg. Der Rest-Sauerstoffgehalt wurde durch die Verbrennungsregelung konstant im Bereich von 4-5 % gehalten. Die CO-Konzentration blieb bis zu einem Methananteil von 20 % bei Minute 20 ebenfalls unauffällig, stieg jedoch bei höherem CH₄-Gehalt stark an. Zwischen Minute 25 und 35 liegt die CO-Konzentration zwischen 50-100 ppm. In der Spitze wurde eine CO-Konzentration von 300 ppm beobachtet, kurz nach dem Zünden mit 25 % Erdgas und 75 % Wasserstoff in Minute 39. Kurz vor dem Verlöschen der Flamme bei Minute 50 werden Werte um 200 ppm erreicht.

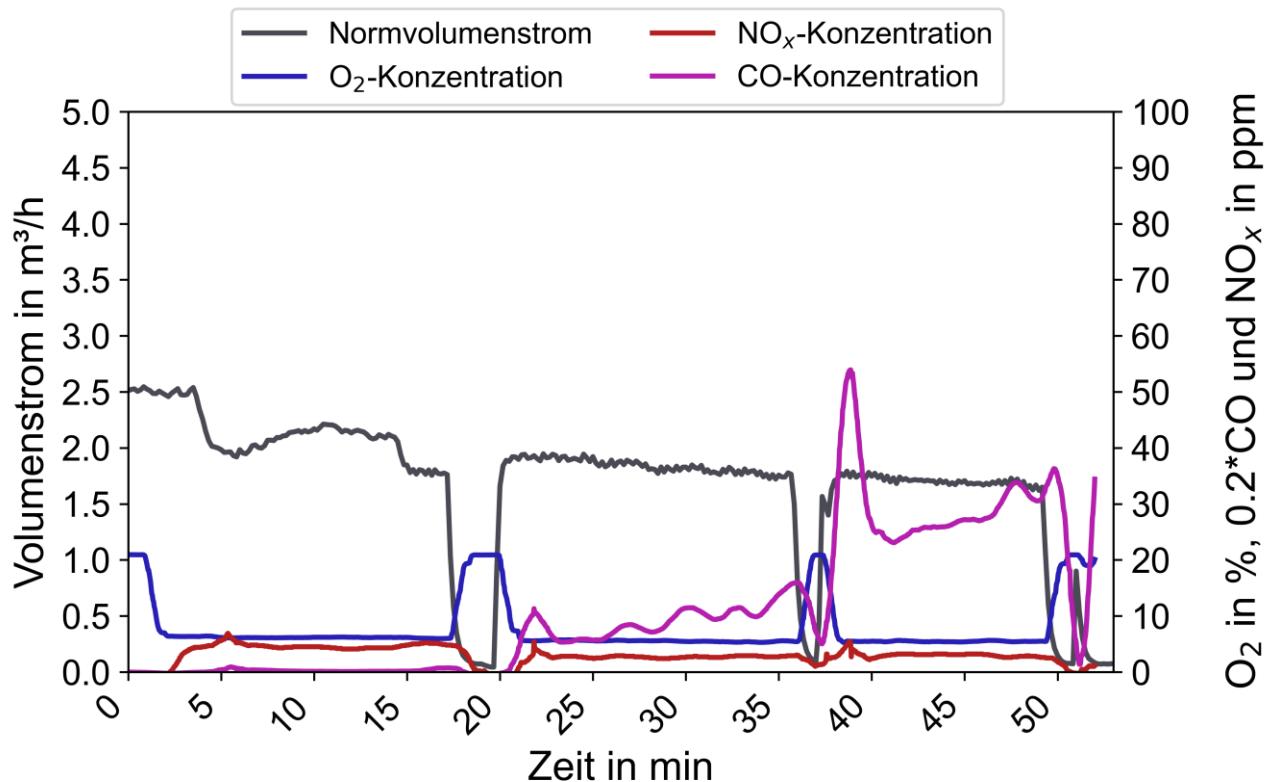


Abbildung 9: Verlauf von Abgaszusammensetzung und Gasvolumenstroms während Versuch 5

4.5 Erkenntnisse aus der Benutzung der Fackel

Abbildung 10 zeigt die Fackel (Größe S) im Betrieb bei ausgewählten Versuchspunkten mit über 80 % Erdgas (links), ca. 70 % Wasserstoff mit Resten von Erdgas und Stickstoff (Mitte) und nahezu reinem Wasserstoff. Während die Flamme im Bild links noch deutlich gelb leuchtet, sind bei den beiden anderen Bildern die Flammen kaum zu erkennen. Da die Wasserstoffflamme keinen Kohlenstoff und somit keine CH^* und C^* Radikale enthält, wird kaum Strahlung im sichtbaren Wellenlängenbereich emittiert. Lediglich eine schwache, rote Färbung kann beobachtet werden, die jedoch leicht vom Tageslicht überdeckt wird. Wie die Darstellung zeigt, tritt dieser Effekt nicht erst bei nahezu purem Wasserstoff, sondern abhängig von den Beleuchtungsbedingungen auch schon mit relevanten Resten von 10-20 % Methan auf.



Abbildung 10: Fackel an ausgewählten Versuchspunkten mit unterschiedlicher Gaszusammensetzung (links: 83 % CH₄+13 % H₂ +3 % N₂; mittig: 18 % CH₄ + 71 % H₂ + 10 % N₂; rechts: 1,7 % CH₄ + 98,3 % H₂)

Diese Beobachtung macht deutlich, dass das Abfackeln von Mischgasen mit hohem Wasserstoffanteil erhöhte Vorsicht geboten ist und alle am Umstellprozess Beteiligten über die Gefahren einer nicht sichtbaren Wasserstoffflamme geschult und belehrt sein müssen. Die Flammenfarbe kann auch nicht als verlässlicher Indikator für das Vorhandensein von Erdgas und Stickstoffresten herangezogen werden, hierfür ist der Einsatz geeigneter Messtechnik erforderlich.

Tabelle 6 zeigt den Zusammenhang zwischen der Gaszusammensetzung und dem Volumenstrom durch die Fackel sowie der berechneten Leistung der Verbrennung. Diese Daten sind stark abhängig von der verwendeten Fackel und von Länge und Durchmesser des Schlauchs und dadurch nicht auf andere Versuchsaufbauten übertragbar. Es zeigt sich, dass mit Erdgas ein Volumenstrom von knapp 0,6 m³/h erreicht wird, was einer Feuerungsleistung von 6 kW entspricht. Mit zunehmendem Wasserstoffanteil nimmt der Volumenstrom zu, da Wasserstoff eine niedrigere Dichte und Viskosität besitzt. Der geringere volumetrische Heizwert von Wasserstoff kann jedoch nicht ausgeglichen werden, sodass sich trotzdem eine niedrigere Leistung ergibt.

Tabelle 6: Volumenstrom und rechnerisch bestimmte Brennerleistung der Fackel an ausgewählten Versuchspunkten

H ₂ [Vol.-%]	N ₂ [Vol.-%]	CH ₄ [Vol.-%]	Volumenstrom [m ³ /h i.N.]	Leistung [kW]
0	0	100	0,58	6,0
20	0	80	0,63	5,6
80	0	20	0,90	4,0
100	0	0	1,04	3,1
25	50	25	0,65	2,2
70	20	10	0,86	2,7

Auch die Konzentration von Stickstoff hat wesentlichen Einfluss auf die Feuerungsleistung, da durch Beimischung des Intertgases der Heizwert des Mischgases stark sinkt. Bei einem Gemisch von 50 Vol.-% N₂ mit 25 % Erdgas und 25 % H₂, kurz vor dem Verlöschen der Flamme, beträgt der Volumenstrom durch die Fackel 0,68 m³/h, die Leistung aber nur 2,2 kW.

Beachtung muss finden, dass die Verwendung von Fackeln ohne eigenen Pilotbrenner dazu führt, dass bei nicht zündfähigen Gemischen unverbrannte Mengen von Methan und Wasserstoff in die Atmosphäre entweichen können. Bei Nutzung einer Fackel mit Pilotbrenner werden auch diese nicht zündfähigen Gase noch oxidiert und das Emissionsaufkommen reduziert.

Nicht erprobt wurde die Verwendung des Druckmessstutzens im Gerät zum Spülen der Anschlussleitung. Dieser befindet sich in der Regel hinter der Abdeckung des Gasgerätes und ist für die Messung des Gas-Anschlussdrucks vorgesehen. Praktische Untersuchungen im Projekt H2Umstell haben bereits gezeigt, dass die erreichbaren Volumenströme durch diesen Stutzen nicht ausreichen und ein Austausch des Leitungsvolumens selbst bei kurzen Hausanschlüssen mehr als eine Stunde dauern kann. [3]

4.6 Bewertung der Ergebnisse und Vergleich der Verfahrensschritte

Die Dauer des kompletten Umstellvorgangs beträgt unabhängig von der Vorgehensweise etwa 80 Minuten. Dieses Ergebnis wurde unter Laborbedingungen erzielt, wobei die Leitungslänge von mehr als 30 m nicht repräsentativ zu einer durchschnittlichen Gasinstallation ist. Die Spülzeit kann bei geringerem Leitungsvolumen und höherem Volumenstrom auch deutlich kürzer ausfallen. Wenn es während des Umbaus zu Störungen am Gerät kommt oder zusätzliche Arbeitsschritte, wie beispielsweise der Einbau eines T-Stücks, erforderlich sind, kann sich der Umstellvorgang auch deutlich verlängern. Für den Einbau des Umrüstkits wurden im Versuch 20 bis 30 Minuten benötigt. Je nach Hersteller und Ausführung des Umrüstkits sowie der Anzahl zu tauschender Komponenten, kann diese Zeitangabe in der Praxis variieren. Mit wesentlich höherem Zeitaufwand ist zu rechnen, wenn ein älteres, nicht H₂-kompatibles Gerät komplett ausgetauscht werden muss. Je nach Geräteart, Leitungslänge und Erfahrung beim Umsteller sind nach derzeitigem Stand Umstellzeiten zwischen 60 und 90 Minuten für eine häusliche Gasinstallation mit H₂-Ready Gasgerät realistisch.

Vorteile der Gasumstellung mit Stickstoffspülung:

Die Gasumstellung mit Stickstoffspülung bietet lediglich den sicherheitstechnischen Vorteil, dass bei einem Eindringen von Luft kein explosionsfähiges Gemisch entstehen kann. Wenn verbliebenes Erdgas direkt mit Wasserstoff aus der Leitung gespült wird, besteht keine unmittelbare Explosionsgefahr. Es muss jedoch darauf geachtet werden, dass bei der Inbetriebnahme eine entsprechend hohe H₂-Konzentration vorliegt. Wenn das Netz ohnehin mit Stickstoff gespült wird, kann auch die Gasinstallation mit vergleichsweise geringem Aufwand gespült werden. Zudem können vorhandene Gasgeräte genutzt werden, um das Rest-Erdgas und brennbare Erdgas-Stickstoff Gemische kontrolliert abzubrennen, bis die Flamme verlischt. Das ist bei einer direkten Umstellung von Erdgas auf Wasserstoff nicht möglich, da davon auszugehen ist, dass die Erdgasbrenner nicht mit Wasserstoff betrieben werden dürfen. Wenn die Gasinstallation geöffnet werden muss, um im Rahmen der Gasumstellung Bauteile wie z.B. den Gaszähler zu tauschen, empfiehlt sich die Inertisierung mit Stickstoff zur Vermeidung explosionsfähiger Gemische, wie es im DGUV-Regelwerk vorgesehen ist.

Nachteile der Gasumstellung mit Stickstoffspülung:

Allerdings sind mit der Stickstoffspülung auch einige Nachteile verbunden. Der zusätzliche Gasverbrauch verursacht höhere Kosten, und der gesamte Umstellvorgang nimmt mehr Zeit in Anspruch. Zudem stellt die Bildung von schwer oder nicht entzündlichen Stickstoff-Methan-Gemischen eine Herausforderung dar, da das Abblasen dieser Gasmischung in die Atmosphäre unweigerlich mit Methanemissionen verbunden ist. Messtechnisch stellt Stickstoff eine Herausforderung dar, da die gängigen Sensoren und Messprinzipien ihn nicht direkt erfassen können. Darüber hinaus beeinflusst Stickstoff als Inertgas in Beimischung zu Wasserstoff die Verbrennungsqualität stärker als Erdgas. Bereits geringe Konzentrationen Stickstoff senken den Wobbe-Index stark, was auf die deutlich höhere Dichte und den fehlenden Heizwert zurückzuführen ist. Trotzdem haben die Versuche gezeigt, dass moderne Gasgeräte kurzzeitig auch Stickstoffreste in der Leitung tolerieren und mit ihrer Verbrennungsregelung ausgleichen können. Auch erfordert die Inertisierung über das Netz eine Gleichzeitigkeit von Spülvorgängen im Netz und bei den angeschlossenen Kunden.

Handlungsempfehlungen:

Aus den bisherigen Erkenntnissen lassen sich folgende Handlungsempfehlungen ableiten:

- Wenn das Netz ohnehin mit Stickstoff gespült wird, kann auch eine Spülung der Hausanschlüsse sinnvoll in den Verfahrensablauf integriert werden.
- Wird das Netz jedoch nicht gespült, sondern direkt von Erdgas auf Wasserstoff umgestellt, ist eine separate Stickstoffspülung der Hausanschlüsse nicht praktikabel – hier stellt sich die Frage wie der Stickstoff eingespeist werden soll.
- Die Nutzung des Druckmessstutzens im Gasgerät zum Spülen ist nicht empfehlenswert, da der Durchfluss zu gering ist und dieser Anschluss nicht für diesen Zweck vorgesehen ist. Vorteilhaft ist die Verwendung von T-Stücken oder Spüladaptern mir möglichst geringer Querschnittsreduzierung. Der Einbau eines T-Stücks in eine typische Gasinstallation mit Kupfer-Pressverbindern ist jedoch mit zusätzlichem Aufwand für die Monteure verbunden. Auch explizit dafür geeignete Gerätehähne (bisher nicht genormt) können eine Möglichkeit für sicheres und einfaches Spülen darstellen. Nach Abschluss der Gasumstellung müsste der Spülanschluss entweder manipulationssicher verplombt oder entfernt werden, da die G 600 keine ungenutzten Leitungsauslässe zulässt.
- Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Sicherheit im Umgang mit Wasserstoff während des Abblasens oder Abfackelns. Die kaum sichtbare H₂-Flamme und die höhere obere Explosionsgrenze von Wasserstoff muss bei der Gefährdungsbeurteilung und in der Schulung der Monteure unbedingt berücksichtigt werden. Zusätzlich könnten Fackeln mit einer geeigneten Flammenüberwachung ausgestattet werden.
- Auch die Nutzung eines Synthesegas-Messgeräts in Kombination mit einem Bunsenbrenner ist in der Praxis nicht zu empfehlen, da die offene Flamme zusätzliches, vermeidbares Sicherheitsrisiko birgt. Stattdessen sollte nach Möglichkeit ein in die Gasleitung integrierter Wasserstoffsensor oder aber geeignete Spürgeräte verwendet werden. Ohne solche Geräte lassen sich die Konzentrationen von CH₄- und H₂-Resten nicht zuverlässig bestimmen.
- Als Richtwert für das erstmalige Einschalten des Gasgeräts wird von DGUV 203-090 eine Wasserstofffreiheit von mindestens 90 % angegeben. Dieser Wert hat sich in den Praxisversuchen als praktikabel erwiesen. Das untersuchte Gasgerät war auch schon bei 80 % H₂ in der Lage zu zünden, diese Aussage kann aber nicht auf andere Geräte übertragen werden.
- Für die Zündung der Fackel ist keine Pilotflamme erforderlich – eine arretierbare Piezozündung wie bei der getesteten Fackel ist ausreichend und praktikabel.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des Projekts wurde die Umstellung einer exemplarischen häuslichen Gasinstallation von Erdgas auf Wasserstoff unter realitätsnahen Bedingungen untersucht. Der Versuchsaufbau umfasste eine typische Gasinstallation, ein 100 % wasserstofftaugliches Gasgerät, eine Mischanlage zur Einstellung definierter Gasgemische sowie umfangreiche Messtechnik zur Analyse von Brenngas- und Abgaszusammensetzung.

Ziel der Untersuchungen war es, die notwendigen Arbeitsschritte für die Umstellung zu identifizieren, verschiedene Spülverfahren zu bewerten und die Auswirkungen von Gasrestanteilen auf die Gerätestabilität und Emissionen zu analysieren. Dabei wurden Umstellvorgänge mit und ohne Stickstoffspülung durchgeführt. Die Spülprozesse zur Entfernung von Stickstoff und zum Einbringen von Wasserstoff wurden hinsichtlich Dauer, Effizienz und Sicherheit bewertet. Es zeigte sich, dass Stickstoffspülungen die Sicherheit erhöhen, da die Leitung während des Umbaus mit einem inerten Gas gefüllt ist. Gleichzeitig sind sie mit höherem Aufwand, zusätzlichen Kosten und messtechnischen Herausforderungen verbunden. Wenn das dem Hausanschluss vorgelagerte Gasnetz während der Gasumstellung ohnehin mit Stickstoff gespült wird, so kann auch eine Spülung des Hausanschlusses und der Gasinstallation mit erfolgen. Aus sicherheitstechnischen Gründen ist die Zwischeninertisierung aufgrund der geringen Leitungsdurchmesser und -volumina nicht jedoch nicht zwingend erforderlich.

Die Inbetriebnahme nach der Umstellung mit Wasserstoff gelang auch bei Restanteilen von Erdgas und Stickstoff in der Leitung, wobei ein Wasserstoffanteil von mindestens 90 % als Richtwert für den sicheren Gerätestart empfohlen wird. Reste von Stickstoff beeinflussen die Verbrennungsqualität im Wasserstoffbetrieb stärker als Erdgas, die Verbrennungsregelung des Gerätes kann die Auswirkungen eines niedrigeren Heizwertes und eines veränderten Luftbedarfs teilweise kompensieren.

Für das Projekt wurde ein T-Stück in die Gasleitung zur Spülung und zum Anschluss der Fackel eingebaut. Für größere Umstellprojekte muss hier noch eine praktikable Lösung entwickelt werden, da der Ein- und Ausbau eines T-Stücks zeitaufwändig ist und zusätzliche Risiken birgt. Die Fackel kann zur Vermeidung von Methanemissionen und zur Senkung der Explosionsgefahr bis zu einer Stickstoffkonzentration von ca. 50 % eingesetzt werden. Die im Tageslicht kaum sichtbare Wasserstoffflamme stellt ein relevantes Sicherheitsrisiko beim Abfackeln dar und muss bei Schulungen und Gefährdungsbeurteilungen berücksichtigt werden.

Abschließend wurden Handlungsempfehlungen für die Praxis abgeleitet, darunter die Empfehlung, die Leitung während der Umstellung unter Druck zu belassen, die Verwendung eines Wasserstoffsensors während des Umstellprozesses sowie die Abstimmung der Reinheitsanforderungen mit Geräteherstellern. Die Ergebnisse des Projekts liefern wertvolle Erkenntnisse für die sichere und effiziente Umstellung von Hausanschlüssen im Rahmen der Energiewende.

Literaturverzeichnis

- [1] Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. (DVGW), "DVGW G 260 (A): Gasbeschaffenheit," Sep. 2021.
- [2] F. Feller, V. Bartsch, J. Grönner und R. Stock *et al.*, "Ergebnisbericht 2024 des Gasnetzgebietstransformationsplans," Bonn, 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.h2vorort.de/fileadmin/Redaktion/Bilder/Publikationen/Ergebnisbericht-2024-des-GTP.pdf>
- [3] J. Hüttenrauch, F. Burmeister, W. Köppel und J. Glandien *et al.*, "H2-Umstellmanagement für Gasverteilnetze: Abschlussbericht zum DVGW-Forschungsprojekt G202312," Aug. 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.dvgw.de/medien/dvgw/forschung/berichte/g202312-h2umstell-abschlussbericht.pdf>
- [4] Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. (DVGW), "DVGW G 680 (A): Erhebung, Umstellung und Anpassung von Gasgeräten," Mrz. 2020.
- [5] Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. (DVGW), "DVGW G 655 (M): Leitfaden H2-ready Gasanwendung," Jan. 2025.
- [6] Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV), "DGUV Information 203-090: Arbeiten an in Betrieb befindlichen Gasleitungen – Handlungshilfe zur Erstellung der Gefährdungsbeurteilung," Jul. 2024.
- [7] Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV), "FBETEM-007: Gefährdungen und Schutzmaßnahmen bei Arbeiten im Bereich von Wasserstoffanlagen und -leitungen," Jun. 2023.
- [8] J. M. Monsalve, U. Völz, M. Jongmanns und B. Betz *et al.*, "Rapid characterisation of mixtures of hydrogen and natural gas by means of ultrasonic time-delay estimation," *J. Sens. Sens. Syst.*, Jg. 13, Nr. 2, S. 179–185, 2024, doi: 10.5194/jsss-13-179-2024.

QR-Code scannen, um
mehr über uns zu erfahren.



» www.dbi-gruppe.de