

Untersuchungen zur Einspeisung von Wasserstoff in ein Erdgasnetz

Die **Zumischung von Wasserstoff zu Erdgas** im hohen einstelligen Prozentbereich ist bislang wenig untersucht worden. Im Rahmen des DVGW-Forschungsvorhabens G 5/01/12 „Untersuchungen zur Einspeisung von Wasserstoff in ein Erdgasverteilnetz – Auswirkungen auf den Betrieb von Gasanwendungstechnologien im Bestand, auf Gas-Plus-Technologien und auf Verbrennungsregelungsstrategien“ wurde ein Feldversuch in einem gewachsenen Verteilnetz durchgeführt, der durch umfangreiche, praxisnahe Laboruntersuchungen begleitet wurde. Das **wesentliche Ziel** des Forschungsvorhabens war es, die **Machbarkeit einer H₂-Zumischung bis 10 Vol.-%** im Rahmen der Vorgaben der DVGW-Arbeitsblätter G 260 und G 262 für häusliche und gewerbliche Gasgeräte im Bestand zu bestätigen.

von: Dr. Holger Dörr, Kerstin Kröger, Dr. Frank Graf, Wolfgang Köppel (alle: DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)), Frank Burmeister, Janina Senner (beide: Gas- und Wärme-Institut Essen e. V.), Dr. Petra Nitschke-Kowsky & Werner Weßing (beide: E.ON)

Der aus Erneuerbare-Energien-Strom (EE-Strom) in Power-to-Gas-Anlagen regenerativ erzeugte Wasserstoff kann über die vorhandene Gasverteilungsinfrastruktur verteilt und durch die etablierte Gasanwendungstechnik einer direkten Nutzung zugeführt werden. Durch die H₂-Einspeisung ist eine weitere Dekarbonisierung der Gasversorgung neben der bereits praktizierten Biogaseinspeisung möglich, wodurch der Primärenergiefaktor von Erdgas gesenkt werden kann. Das Gasnetz kann als Speicher- und Transportinfrastruktur für EE-Strom die Stromnetze entlasten, den Netzausbaubedarf reduzieren und damit eine wichtige Funktion in der Energiewende einnehmen. Die Möglichkeit zur Einspeisung von Wasser-

stoff in das Erdgas im einstelligen Volumenprozentbereich wurde im DVGW-Arbeitsblatt G 262 eingeräumt.

Das Forschungsvorhaben ist zweigeteilt. In einem umfangreichen Laborblock wurden grundsätzliche Versuche zu Grundtypen von Flammen, zu Verbrennungsregelungen, zu kommerziellen Gasgeräten und Gas-Plus-Technologien mit bis zu 30 Vol.-% H₂-Anteil und teilweise auch höheren Anteilen im Erdgas unternommen. Dies diente vor allem zur Vorbereitung, Absicherung und Analyse des zweiten Blocks, dem eigentlichen Feldtest.

Dieser Feldtest wurde in einem bestehenden norddeutschen Verteilnetz mit etwa 180 installierten Gasgeräten

durchgeführt. Dazu wurde eine Einspeiseanlage aufgebaut, in mehreren Stufen bis zu 9 Vol.-% Wasserstoff zum Erdgas zugemischt und ins Netz eingespeist. Die H₂-Einspeisungen wurden durch Emissionsmessungen und Kontrolluntersuchungen an den Bestandsgeräten begleitet. Die Ergebnisse sind bereits detailliert in [1] beschrieben, im vorliegenden Beitrag liegt der Schwerpunkt auf den Ergebnissen der Laboruntersuchungen.

Allgemeine Untersuchungen zur H₂-Zumischung

Wasserstoff unterscheidet sich gegenüber der Erdgas-Hauptkomponente Methan CH₄ deutlich in den verbrennungsrelevanten Eigenschaften, die Dichte beträgt z. B. nur 12,5 Prozent der von CH₄. Damit bewirkt die Zumischung von H₂ Änderungen im Luftbedarf, der Verbrennungsgüte und über den Brennwert auch in der Leistung. Zur besseren Einordnung sind einige dieser Eigenschaften für die beiden Reingase und einige Gemische in **Tabelle 1** zusammengefasst.

Die unteren Explosionsgrenzen nehmen mit zunehmender H₂-Konzentration geringfügig ab, die oberen Ex-

Tabelle 1: Explosionsgrenzen [2], Brennwerte H_{s,n}, Wobbe-Indizes W_{s,n} und relativer Luftbedarf von H₂, CH₄ und H₂/CH₄-Gemischen

Gas	Explosionsgrenzen x _i in Vol.-%		H _{s,n} kWh/m ³	W _{s,n}	Luftbedarf _{rel} 1
	UEG	OEG			
100 % CH ₄	4,6	16,6	11,06	14,85	100 %
12,5 Vol.-% H ₂ in CH ₄	k. A.	18,4	10,12	14,40	91 %
25,0 Vol.-% H ₂ in CH ₄	4,5	23,5	9,18	13,95	81 %
50,0 Vol.-% H ₂ in CH ₄	4,4	32,0	7,30	13,07	63 %
100 % H ₂	4,1	77,0	3,54	13,43	25 %

Quelle: DVGW-EBI

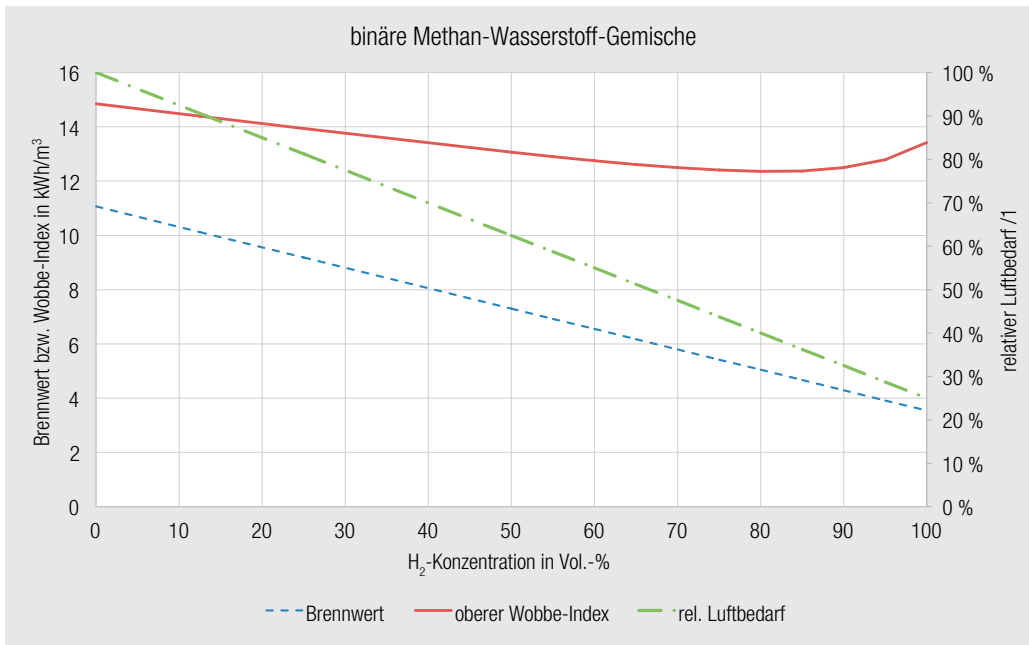


Abb. 1: Verläufe des Brennwertes, oberen Wobbe-Index und des relativen Luftbedarfs als Funktion des Wasserstoffgehalts von binären CH₄/H₂-Gemischen

Quelle: DVGW-EBI

plionsgrenzen verschieben sich dagegen deutlicher zu höheren Werten mit steigender H₂-Zumischung. Für die H₂-Zumischung im Rahmen des Regelwerks ändern sich die Sicherheitsanforderungen nicht. Der Brennwert und der Luftbedarf nehmen stetig mit steigender H₂-Zumischung ab (Abb. 1). Bis ca. 80 Vol.-% verhält sich der Wobbe-Index analog, der erst ab Konzentrationen um 80 Vol.-% wieder ansteigt.

Um die Effekte bei der H₂-Zumischung detailliert untersuchen zu können, wurden als Vorbereitung umfangreiche Untersuchungen unter Laborbedingungen an den Grundflammentypen Vormischflamme und Diffusionsflamme, an verschiedenen Verbrennungsregelungen und an handelsüblichen Stirlingheizgeräten als Beispiele für Gas-Plus-Technologien durchgeführt. Die laminaren Vormischflammen als wichtigster Flammentyp für Heizkessel wurden zusätzlich theoretisch untersucht. Die Vorteile dieser Untersuchungen sind die definierten Randbedingungen im Labor, die erweiterten Versuchsbedingungen wie höhere Wasserstoffzumischungen und die umfangreichere Diagnostik der Verbrennungsvorgänge.

Flammensimulationen

Die Flammensimulationen mit detailliertem Reaktionsmechanismus GRI 3.0 [3] zeigen für zwei unterschiedliche Regelungsvarianten (Differenzdruck- und Volumenstromregler, hier erfolgen volumengleiche Gassubstitutionen) und drei verschiedene Grundgase sehr gleichmäßige Effekte auf die Flammeneigen-

schaften. Die Grundgase umfassten G 20 (H_s = 11,06 kWh/m³), ein gering kalorisches H-Gas (H_s = 10,11 kWh/m³) und ein hochkalorisches H-Gas (H_s = 13,07 kWh/m³), zu denen jeweils Wasserstoff bis 30 Vol.-% zugemischt wurde. Für Luftzahlen größer 1 bei den Grundgasen führte die H₂-Zumischung bis zu 30 Vol.-% zu stetigen Abnahmen von Flammentemperatur, NO_x- und CO-Emissionen (Abb. 4), bei der Differenzdruckregelung weniger ausgeprägt als bei der Volumenstromregelung.

Versuchsaufbauten

Den Laborflammenaufbau mit zwei eingesetzten UV-Aufnahmen von einer laminaren Vormischflamme (A) und einer Diffusionsflamme (B) zeigt **Abbildung 2**. Die Vorteile dieses Versuchsaufbaus liegen in dem flexiblen Gasmischer, der Abgassensorik, Temperaturmesstechnik und der UV-Kamera für die Visualisierung der Flammenreaktionszonen mittels der Emissionen von Flammenradikalen wie OH* und CH*.

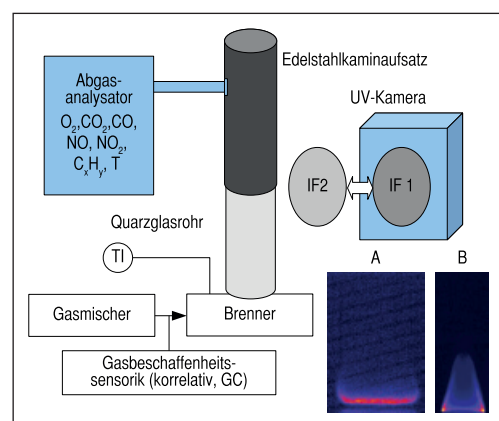


Abb. 2: System 1, Laborversuchsstand mit Gasmischer, Laborbrenner, der Verbrennungsdiagnostik und UV-Aufnahmen der Vormisch- (A) und Diffusionsflammen (B)

Quelle: DVGW-EBI

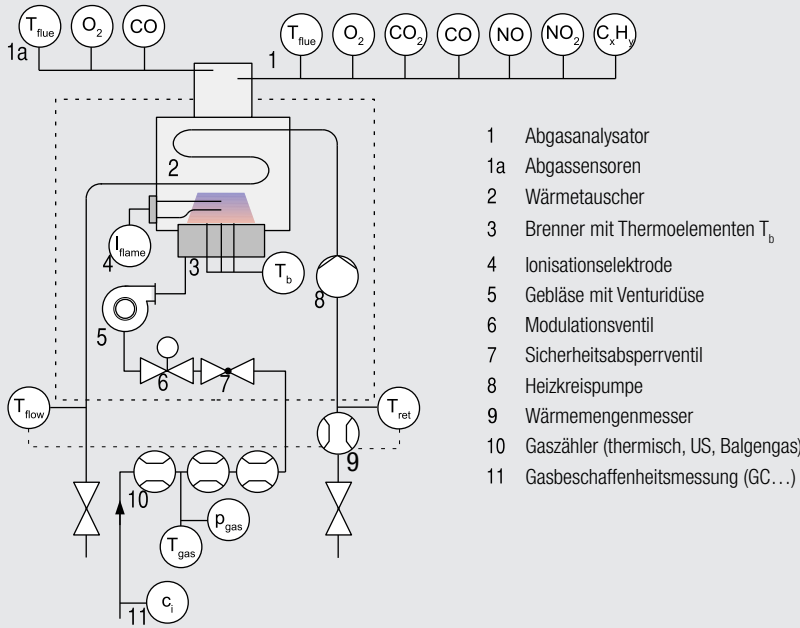


Abb. 3: Schematischer Aufbau der Verbrennungsregelungsplattform MGARCP, System 2, mit verschiedenen Sensoriken (1a, 3, 4, 11 und ggf. 9)

Um marktverfügbare Verbrennungsregelungen bewerten zu können, wurde ein integrierter Verbrennungsregelungsprüfstand (MGARCP) aufgebaut (Abb. 3). Dieser enthält alle kommerziell bereits eingesetzten Verfahren zur adaptiven Verbrennungsregelung vor, in und nach der Brennkammer. Vor der Brennkammer (Pre-Combustion) war ein Gaschromatograph neben einem korrelativen Gasbeschaffenheitssensor zur Messung der Gasbeschaffenheit (CH_4 , C_xH_y , CO_2 und Wärmeleitfähigkeit) eingesetzt. Durch eine Ionisationsstromregelung und Temperaturfühler auf der Brennermatrixoberfläche waren die In-Combustion-Ansätze in der Brenn-

kammer vertreten. Mittels Sensoren für O_2 , CO und O_2/CO waren neben Referenzabgasmessmethoden die Post-Combustion-Regelungsansätze integriert.

Bei dem dritten Untersuchungssystem wurden zwei Stirling-KWK-Anlagen als Beispiele von Gas-Plus-Technologien mit H_2 -angereichertem Erdgas bis zu 45 Vol.-% H_2 versorgt, um Effekte auf das Laufverhalten oder die Emissionen zu bestimmen.

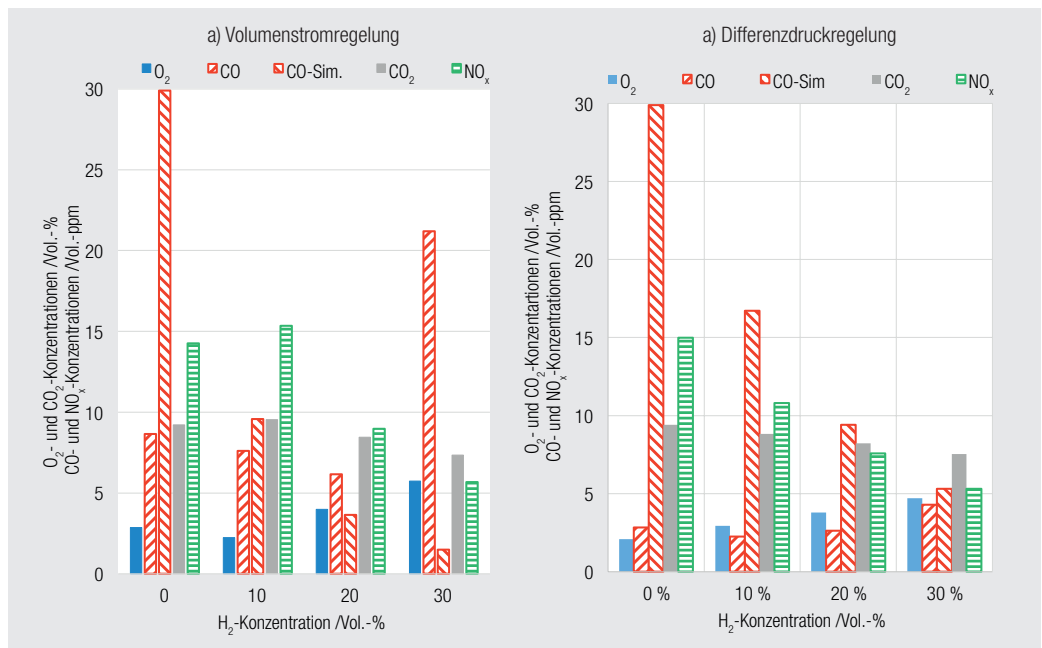
Experimentelle Ergebnisse: Laborflammen und Verbrennungsregelungen

Die Ergebnisse der verschiedenen Untersuchungen werden bezüglich der Effekte auf die Verbrennungsgüte (O_2 , NO_x , CO), Brenntemperaturen und Leistungseffekte dargestellt.

O_2 : Bei allen Systemen, Laborflammen, MGARCP und den beiden Stirlings, stieg mit wachsendem H_2 -Anteil im Brenngas der Restsauerstoffgehalt im Abgas, was durch den geringeren Luftbedarf von H_2 zu erwarten war (Abb. 4 bis 6). Abbildung 6 verdeutlicht im direkten Vergleich zudem, dass die Ionisationsstromregelung beim MGARCP-System nicht negativ durch die H_2 -Zumischung beeinflusst wurde.

NO_x : Mit wachsendem H_2 -Gehalt veränderten sich die NO_x -Emissionen (NO und NO_2) kaum bzw. eher hin zu geringeren Emissionen bei höheren H_2 -Zumischungen (> 10 Vol.-%). Das bedeutet, dass sich die höhere Luftzahl, die höhere adiabatische Flammentemperatur und Flammengeschwindigkeit von reinen Wasser-

Abb. 4: Abgaswerte von laminaren Vormischflammen mit simulierter a) Volumenstromregelung und b) Differenzdruckregelung mit einer Belastung von $H_i = 375$ W bei 0 Vol.-% H_2 -Zumischung zu Methan, Grundgas „H-Gas Ref_EBI“ und der Messstelle bei Höhe über dem Brenner von 162 mm. Die relativen Werte für CO-Sim wurden über Flammensimulationen berechnet.



Quelle: DVGW-EBI

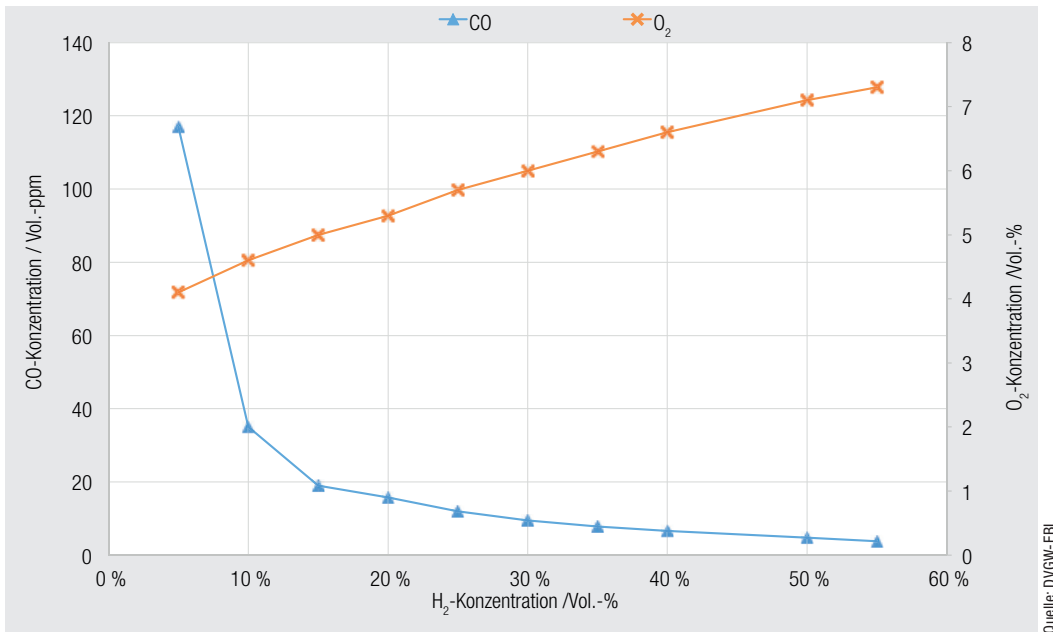


Abb. 5: CO- und O₂-Emissionen bei Wasserstoffzusammischungen von 0 Vol.-% bis 55 Vol.-% zu Erdgas bei dem MGARCP-Testaufbau

Quelle: DVGW-EBI

stoff-Luft-Gemischen bei den H₂-Erdgas-Gemischen nicht in einer vermehrten NO_x-Bildung niedergeschlagen hat, siehe z. B. **Abbildung 4**.

CO: Einer der empfindlichsten Verbrennungsgüteparameter ist die Kohlenmonoxidkonzentration CO im Abgas, die u. a. auch bei Inbetriebnahmen und im Rahmen der Kehr- und Überwachungsordnung (KÜO) für Feuerungen aufgenommen wird. Hier wurden mit steigender H₂-Zusammischung bei den meisten Systemen ebenfalls zum Teil signifikante CO-Abnahmen beobachtet, siehe z. B. **Abbildung 5**. Ausnahmen bildeten die Laborbrenneruntersuchungen zu Vormisch- und Diffusionsflammen. Im Fall der Vormischflammen konnte, wie in **Abbildung 4**

gezeigt, oberhalb von 20 Vol.-% wieder eine Zunahme an CO, aber auf niedrigem Niveau der CO-Emissionen, gemessen werden. Hier sind die Ursachen in den geringeren Brennwerten des Brenngases in Kombination mit einem kleineren Verhältnis von Flammenrandflächen zu Flammenvolumen zu suchen, da hierdurch der vollständige Ausbrand dieser mageren Kleinflammen geringfügig verschlechtert wird. Das konnte auch durch Leistungsdichteveränderungen für die Laborbrenner belegt werden. Im Leistungsregelbereich der kommerziellen Gasgeräte konnte dieser Effekt bei 30 Vol.-% und mitunter bis zu 55 Vol.-% H₂-Zusammischung so nicht beobachtet werden. Die H₂-Zusammischung beeinflusste auch keinen Abgassensor bezüglich der Messfähigkeit.

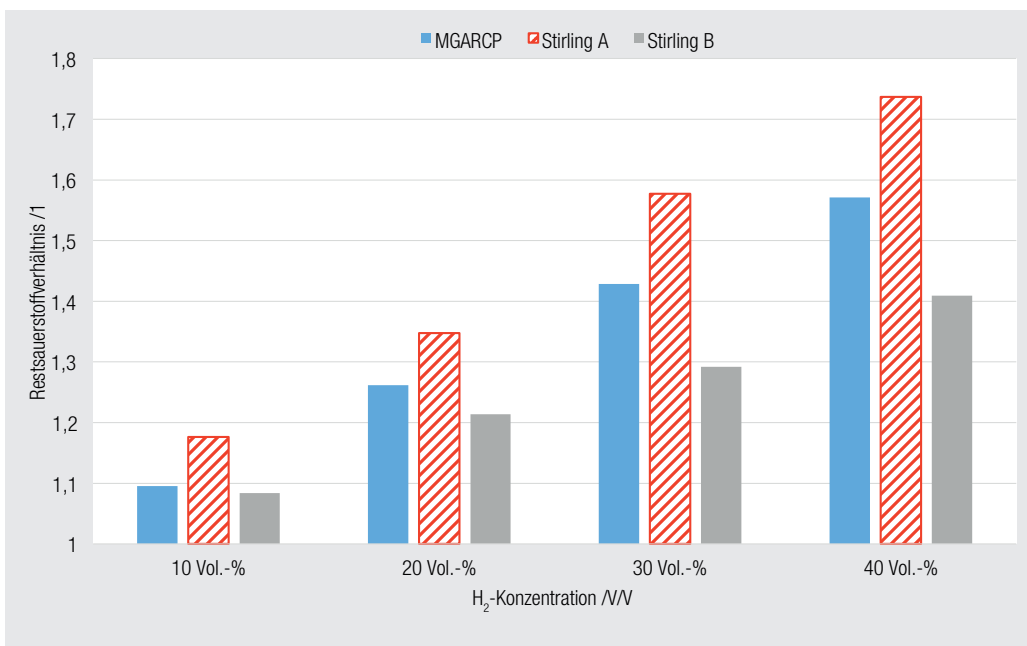
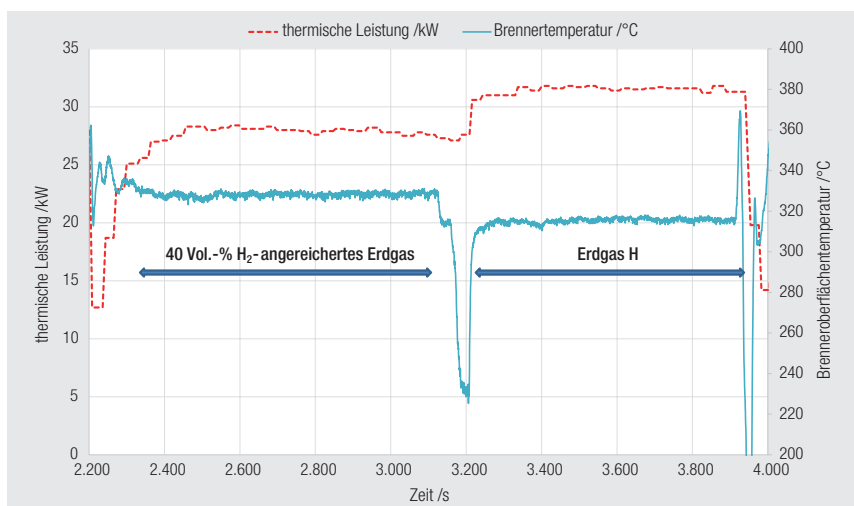


Abb. 6: Verhältnis der Restsauerstoffgehalte mit und ohne H₂-Zusammischung für MGARCP und die beiden Stirling-Systeme im Vergleich

Quelle: DVGW-EBI



Quelle: DVGW-EBI

Abb. 7: Effekte von 40 Vol.-% H₂-Zumischung zu Erdgas auf die thermische Leistung und die Brenneroberflächentemperatur

Brenneroberflächentemperatur: Vor allem für die Diffusionsflammen und MGARCP stiegen die Temperaturen der Brenneroberfläche bei H₂-Zumischung etwas an. Neben der erhöhten thermischen Belastung des Brennermaterials birgt es vor allem für die vorgemischten Luft-Brennstoff-Gemische die Gefahr der thermischen Zündung an den heißen Brenneroberflächen auf Seite der Gemischzuführung. Die Temperaturanstiege aufgrund der H₂-Zumischung fielen mit ca. 13 °C bei 40 Vol.-% H₂ auf dem zylindrischen Lochmatrix-Brenner von MGARCP gering aus, was neben dem Effekt auf die thermische Leistung in **Abbildung 7** dargestellt ist. Eine Rückzündungsgefahr in den Bereich der Gemischzuführung bestand nicht.

Leistungseffekte: Aufgrund des geringeren Brennwertes der wasserstoffhaltigen Gemische und des nach oben eingeschränkten Regelbereichs der Gaszufuhr konnte speziell am MGARCP eine Abnahme der thermischen Leistung von 12,5 % bei 40 Vol.-% H₂-Zumischung gemessen werden (**Abb. 7**). Ähnliche Effekte wurden bei der Reihenuntersuchung mit 30 Vol.-% H₂-Zumischung bei Brennwertheizgeräten und Niedertemperaturkesseln beobachtet.

Die verschiedenen Systeme zündeten und brannten ohne Auffälligkeiten auch bei hohen H₂-Zumischungen, hier konnte insbesondere kein hörbar lauterer Betrieb bei MGARCP und bei den Stirling-Systemen festgestellt werden.

Auch die Gasbeschaffenheitssensorik erfasste den H₂-Anteil korrekt. Die Emissionen fielen bei H₂-Zumischung in der Regel günstiger aus. Die positiven Ergebnisse wurden auch bei den folgenden Tests handelsüblicher Geräte bestätigt.

Betrieb von Gasanwendungstechnologien

Ziel dieses Arbeitspaketes war eine praxisnahe Untersuchung der Einsetzbarkeit von handelsüblichen, repräsentativen Gasgeräten beim Betrieb mit H₂-reichen Gasen in Bezug auf Funktion und Einstellung der Geräte, die anhand der Kriterien Verbrennungsgüte (Emissionen), Zündung, Flammenstabilität sowie akustischer Effekte über den Regelbereich der Geräte untersucht wurde [4].

Neben normalen Betriebsszenarien wurden Worst-Case-Szenarien wie Kaltstart im Winter (T_{Luft} = -15 °C) und unmittelbarer Gasbeschaffenheitswechsel mit Konzentrationen bis zu 30 Vol.-% Wasserstoff im Labor untersucht.

Für die Auswahl der Geräte wurde in Absprache mit den Projektpartnern und Herstellern eine Einteilung nach Gerätetypen, Verbrennungsluftzufuhr und Regelungssystemen sowie Parametern wie Primärluftzahl und flächenspezifischer Brennerbelastung vorgenommen. Unter Berücksichtigung geltender Normen, Erfahrungen und der Segmentierung aus dem Projekt GASQUAL [5] wurden insgesamt zehn Geräte ausgewählt. Diese teilten sich in sechs Brennwertgeräte (BW-Geräte) und vier atmosphärische, raumluftabhängige bzw. raumluftunabhängige Gasheizkessel auf (**Tab. 2**). Die Messungen wurden mit Erdgas H (GB Essen Mitte 2), dem Prüfgas G 20 (CH₄) sowie H₂-haltigen Gemischen aus 30 Vol.-% H₂ und 70 Vol.-% CH₄ durchgeführt.

Allgemeine Informationen zu den Messungen
Für eine Analyse wurden Referenzmessungen mit den Brenngasen Erdgas H sowie dem Prüfgas G 20 durchgeführt. Jedes Gasgerät wurde mit in der Praxis üblichen Vor- und Rücklauftemperaturen von 70 °C/50 °C betrieben. Die Un-

Quelle: DVGW-EBI

Tabelle 2: Ausgewählte Gasgeräte

Nr.:	Leistung	Geräteart
Gerät 1	Q _{Max} = 25 kW	selbstadaptierendes BW-Gerät, Kategorie I _{2N}
Gerät 2	Q _{Max} = 20 kW	selbstadaptierendes BW-Gerät, Kategorie I _{2N}
Gerät 3	Q _{Max} = 13 kW	selbstadaptierendes BW-Gerät, Kategorie I _{2N}
Gerät 4	Q _{Max} = 40 kW	wandhängender Brennwertkessel
Gerät 5	Q _{Max} = 22 kW	bodenstehender Brennwertkessel
Gerät 6	Q _{Max} = 20 kW	wandhängendes Brennwertgerät mit geschlossener Brennkammer, raumluftab- und -unabhängig
Gerät 7	Q _{Max} = 22 kW	bodenstehender Niedertemperatur-Heizkessel, raumluftabhängig
Gerät 8	Q _{Max} = 20 kW	kompakter Heizwert-Wandheizkessel, raumluftabhängig
Gerät 9	Q _{Max} = 22 kW	Niedertemperatur-Gasheizkessel, raumluftabhängig
Gerät 10	Q _{Max} = 20 kW	kompakter Heizwert-Wandheizkessel, raumluftunabhängig, atmosphärischer Brenner

tersuchungen der Gasgeräte erfolgten bei vier unterschiedlichen Leistungs-/Belastungsstufen. Jede Belastungsstufe wurde für 20 Minuten betrieben. Während jeder Messung wurden die CO- und NO_x-Emissionen (bezogen auf 0 Vol.-% Sauerstoff im Abgas) sowie der CO₂- und O₂-Gehalt im trockenen Abgas, der CH₄-Anteil im Brenngas, die Abgastemperatur, der Luftdruck und der Ionisationsstrom mithilfe eines µA-Messgerätes separat am Gerät (falls möglich) erfasst. Es wurde bei Raumtemperatur und bei auf -15 °C gekühlter Luftzufuhr gemessen, um einen kalten Wintertag zu simulieren.

Um das Funktionsverhalten der Geräte bei einer schnellen Umstellung des Brenngases (vom Erdgas zu Erdgas mit erhöhtem H₂-Anteil) im laufenden Betrieb zu dokumentieren, wurden die Geräte mit einem Wasserstoffanteil von 30 Vol.-% im Brenngas untersucht.

Die Geräte wurden auf Q_{Min}, Q_{50%}, Q_{75%}, und Q_{Max} eingestellt, für 20 Minuten betrieben, innerhalb von fünf Minuten von G 20 auf das wasserstoffhaltige Brenngas umgestellt und wieder 20 Minuten betrieben. Die Brenngase wurden im laufenden Betrieb gewechselt.

Kaltstartversuche

In der Praxis werden insbesondere bei einem Kaltstart nach der Nachtabsenkung und bei niedrigen Außentemperaturen hohe Anforderungen an das Zündverhalten des Gerätes gestellt.

Um diesen Fall zu simulieren, wurden bei diesem Versuch die Gasgeräte mit einer Verbrennungslufttemperatur von -15 °C beaufschlagt und im kalten Zustand bei maximaler Leistungsanforderung gestartet. Es wurden jeweils fünf Startversuche mit dem Prüfgas G 20 und dem wasserstoffhaltigen Brenngas „70 % CH₄ + 30 % H₂“ durchgeführt.

Darstellung der Messergebnisse am Beispiel von Gerät 1

In **Abbildung 8** sind die Verläufe der CO- und NO_x-Emissionen sowie der CO₂-Gehalt im trockenen Abgas und des CH₄-Anteils im Brennstoff bei der

Verbrennung von CH₄ und dem wasserstoffhaltigen Gasgemisch (70 % CH₄ + 30 % H₂) mit einer Verbrennungslufttemperatur von 22 °C dargestellt.

Der grün dargestellte CH₄-Anteil im Brennstoff veranschaulicht, welches Gas jeweils verwendet wurde. Die CO- und NO_x-Emissionen sind bei dem H₂-

haltigen Brenngas niedriger als bei G 20. Diese Tendenz zeigt sich bei jeder Leistungseinstellung und spiegelt die Ergebnisse im vorigen Abschnitt wider. Die CO₂-Emissionen im Abgas fallen bei dem CH₄/H₂-Brenngas erwartungsgemäß ebenfalls niedriger aus als bei der CH₄-Verbrennung. Mit steigender Leistung nimmt die Luftzahl bei

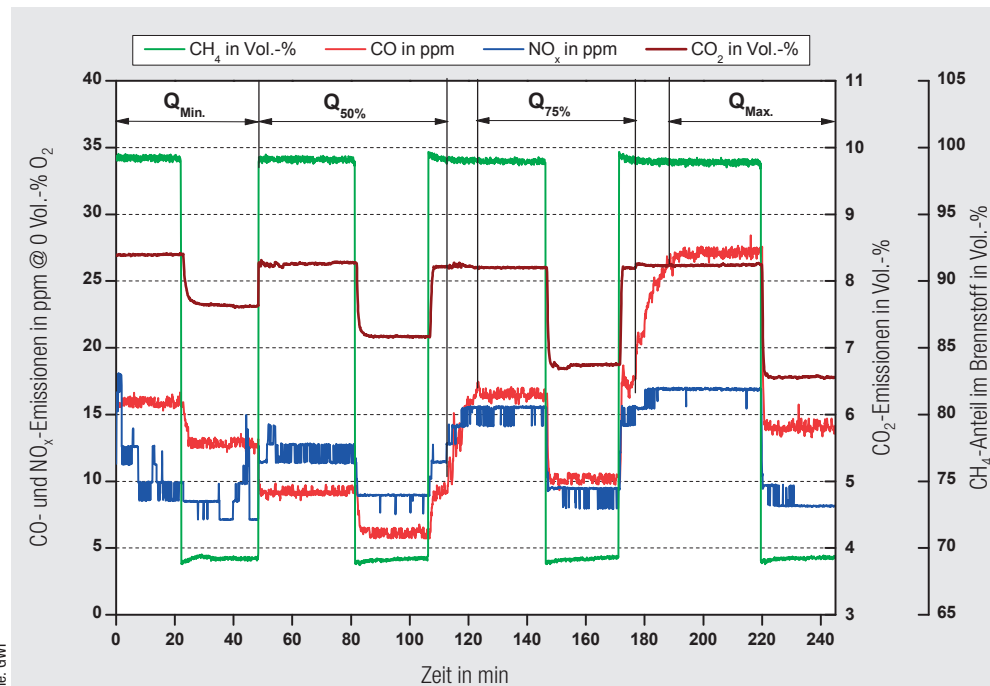


Abb. 8: CO- und NO_x-Emissionen, bezogen auf 0 Vol.-% O₂, sowie CO₂-Emissionen im trockenen Abgas bei T_{Luft} = 22 °C, Brennstoff Methan und (70 Vol.-% CH₄ + 30 Vol.-% H₂) für das Gerät 1

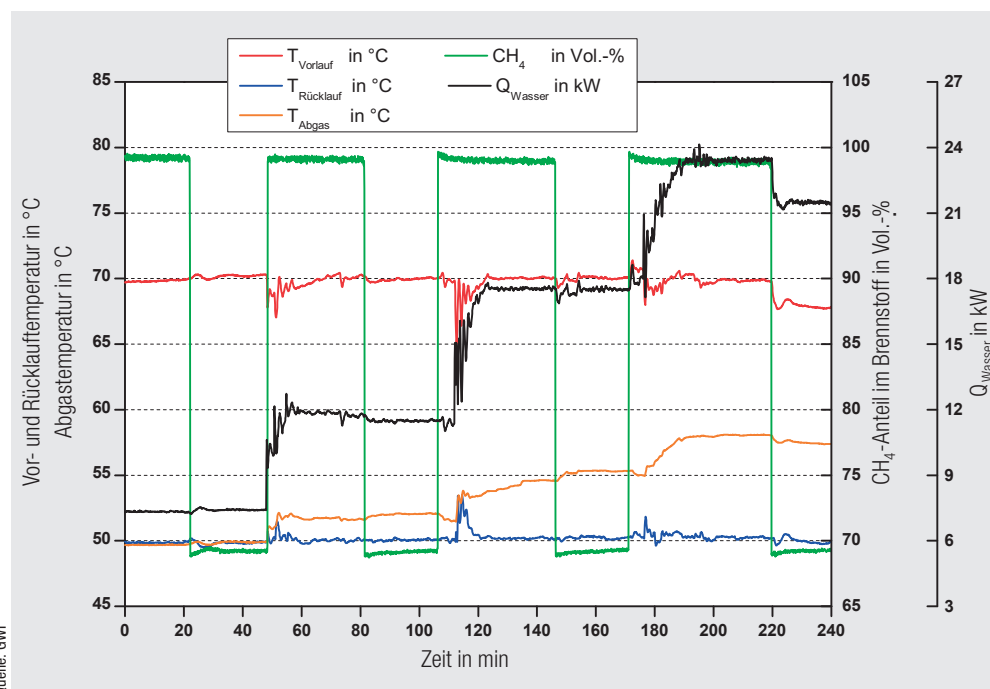


Abb. 9: Vor-, Rücklauf- und Abgastemperatur am Gerät bei T_{Luft} = 22 °C, Brennstoff CH₄ und (70 Vol.-% CH₄ + 30 Vol.-% H₂); Gerät 1

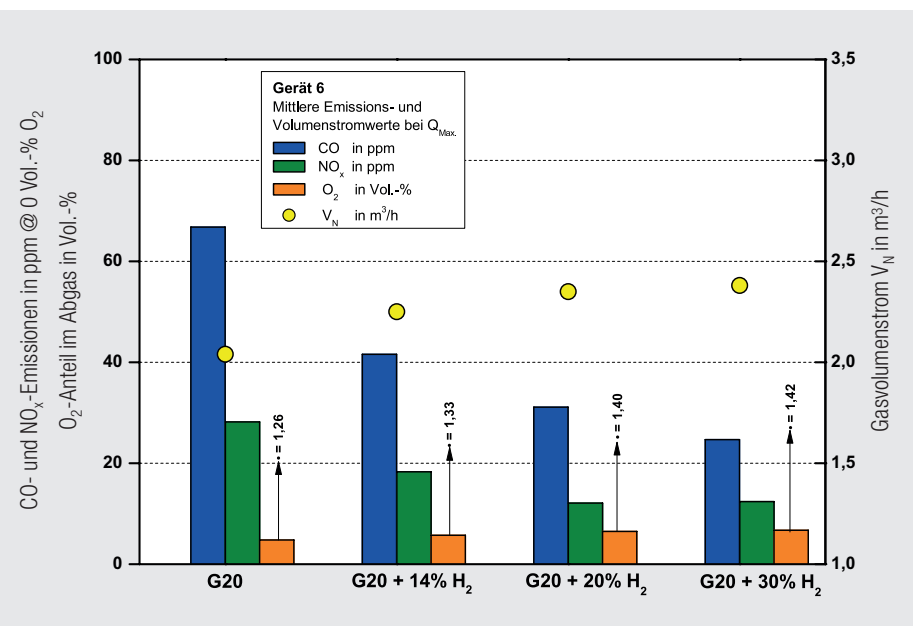


Abb. 10: CO- und NO_x-Emissionen, bezogen auf 0 Vol.-% O₂ sowie CO₂- und O₂-Anteile im trockenen Abgas, Gasvolumenströme und Luftzahlen in Abhängigkeit des Wasserstoffanteils im Brennstoff bei Q_{Max} Brennvorgang 6

der Verbrennung der CH₄/H₂-Mischung zu, dadurch sinkt der CO₂-Gehalt im trockenen Abgas weiter. Bei der CH₄-Verbrennung bleibt die Luftzahl bei Leistungsvariation annähernd konstant und dadurch ist auch der CO₂-Anteil im Abgas fast unverändert.

Abbildung 9 zeigt Daten für die Vor- und Rücklauf-temperaturen sowie die Abgastemperatur am Austritt des Gerätes. Die Vor- und Rücklauf-temperaturen erreichen nach dem Gaswechsel von G 20 auf das mit 30 Vol.-% H₂-angereicherte Brenngas nach kurzer Einregulierung die vorgegebenen Sollwerte von 50 °C Rücklauf- und 70 °C Vorlauf-temperatur. Dies gilt bei fast allen Leistungsstufen, nur bei Q_{Max} erreicht die Vorlauf-temperatur nicht ihren Sollwert, sie bleibt bei ca. 68 °C. Aufgrund des niedrigeren Brennwertes des wasserstoffhaltigen Brenngases wird beim maximal möglichen Gasvolumenstrom die höchste Geräteleistung nicht erzielt, sie liegt um ca. 8,5 Prozent niedriger als bei G 20. Ein analoges Ergebnis war bereits bei den MGARCP-Messungen mit noch etwas höheren H₂-Zusmischungen beobachtet worden.

Tabelle 3 zeigt die Ionisationsstrommessung mit einer raumtemperierten Verbrennungslufttemperatur. Im Rahmen der Messgenauigkeit unterscheiden sich die Werte der beiden Brenngase nicht, was auch für die nicht Ionisationsstrom-geregelten Geräte beobachtet werden konnte.

In Abbildung 10 sind die CO-, NO_x- und CO₂-Emissionen sowie O₂-Anteile im trockenen Abgas, die Gasvolumenströme und die Luftzahlen

bei verschiedenen H₂-Anteilen im Brenngas für das Brennwertgerät 6 bei Q_{Max} aufgetragen. Je höher der H₂-Anteil im Brenngas, desto niedriger fallen auch hier die CO-, NO_x- und CO₂-Emissionen und desto höher die Luftzahl aus. Aufgrund des niedrigen Brennwertes des Wasserstoffes steigen die Gasvolumenströme entsprechend an.

In Abbildung 11 sind die mittleren CO- und NO_x-Emissionen im Abgas sowie die mittleren CO₂- und O₂-Anteile im trockenen Abgas, die Volumenströme der Brennstoffe und die Luftzahlen bei den Tests mit CH₄ und dem H₂-haltigen Gasgemisch bei Q_{Max} für alle Brennwertgeräte (Geräte 1 bis 6) zusammengestellt. Aufgrund des niedrigeren Mindestluftbedarfs der H₂-haltigen Gase nehmen die CO- und NO_x-Emissionswerte mit der Umstellung des Brenngases von G 20 auf die CH₄/H₂-Mischung ab, da u. a. die Luftzahlen steigen. Durch die höheren Luftzahlen und die kleineren Kohlenstoffanteile beim Gasgemisch nimmt der CO₂-Anteil im Abgas ebenfalls mit der Umstellung des Brenngases ab. Aufgrund des niedrigeren Brennwertes liegen die Volumenströme des Gasgemisches erwartungsgemäß höher.

Abbildung 12 zeigt die mittleren Werte der CO- und NO_x-Emissionen, die Volumenströme und die Luftzahlen bei Q_{Max} für die atmosphärischen Gasheizkessel 7 bis 10. Weil die Emissionswerte nach dem Kessel gemessen wurden, konnten die Anteile der Primär- und Sekundärluft nicht differenziert werden. Aufgrund der höheren Luftzahlen bei der Verbrennung des H₂-haltigen Gases nehmen die CO- und NO_x-Emissionswerte (außer den CO-Werten beim Gerät 9) mit der Umstellung des Brenngases von G 20 auf die CH₄/H₂-Mischung ab. Bei Gerät 9 fallen die CO-Messwerte fast gleich aus und liegen auf sehr niedrigem Niveau. Die CO₂-Anteile im Abgas nehmen ebenfalls mit der Umstellung des Brenngases ab, da die Luftzahlen höher liegen und die Kohlenstoffanteile

Tabelle 3: Ionisationsstrom-Messung bei Verwendung von CH₄ und dem CH₄/H₂-Gemisch; Gerät 1

	Ionisationsstrom in µA (T _{Verbrennungsluft} = 22 °C)	
	G 20	70 % CH ₄ + 30 % H ₂
Q _{Min}	14	14,5
Q _{50%}	16	17
Q _{75%}	17	17
Q _{Max}	18	17

Quelle: GWI

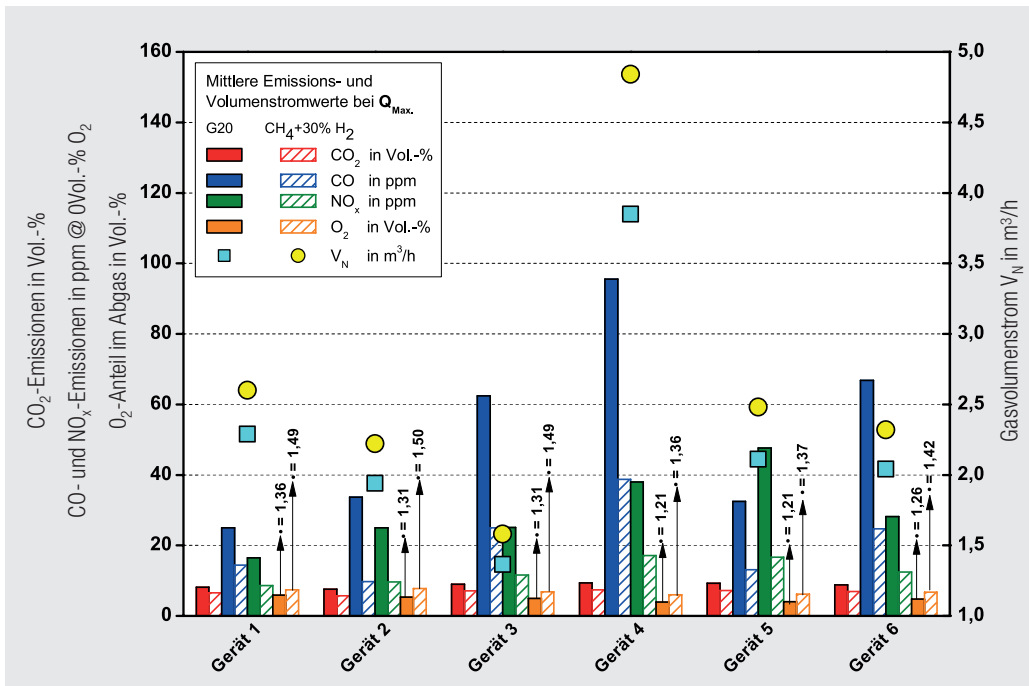


Abb. 11: CO_2 - und NO_x -Emissionen, bezogen auf 0 Vol.-% O_2 sowie CO_2 - und O_2 -Anteile im trockenen Abgas, Gasvolumenströme und Luftzahlen bei Q_{Max} für Brennwertgeräte, Brennstoff CH_4 und (70 Vol.-% CH_4 + 30 Vol.-% H_2)-Gasgemisch

Quelle: GWI

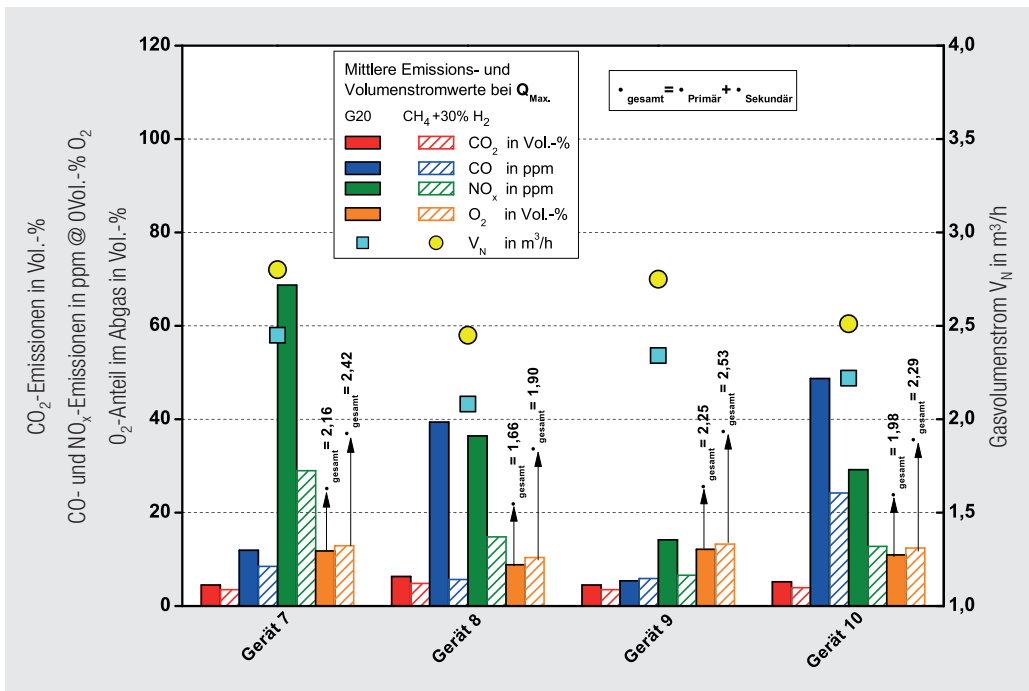


Abb. 12: CO_2 - und NO_x -Emissionen, bezogen auf 0 Vol.-% O_2 sowie CO_2 - und O_2 -Anteile im trockenen Abgas, Gasvolumenströme und Luftzahlen bei Q_{Max} für atmosphärische Gasheizkessel, Brennstoff CH_4 und (70 Vol.-% CH_4 + 30 Vol.-% H_2)-Gasgemisch

Quelle: GWI

le im Gasgemisch sinken. Die Maximalleistung bei Verwendung des Gemisches ist wieder um ca. 10 Prozent niedriger als bei G 20.

Die getesteten Geräte starteten mit einem Gasgemisch aus 70 Vol.-% CH_4 und 30 Vol.-% H_2 bei Raumtemperatur und auch bei gekühlter Verbrennungsluft ($T_L = -15 \text{ °C}$) einwandfrei. Alle Geräte funktionierten bestimmungsgemäß trotz eines Worst-Case-Testprogramms. Die Wirkungsgrade fielen je nach Gerät für das 30 Vol.-% H_2 -haltige Brenngas bei Q_{max} um ca. 0,4 bis 2,9 Prozent kleiner aus. Alle Geräte erreichten mit H_2 -reichem Brenngas nicht die

gleiche maximale Leistung Q_{max} wie mit G 20 oder Erdgas, je nach Gerätetyp war Q_{max} aufgrund des Brennwertes und der Begrenzung des maximalen Gasvolumenstroms um 3,8 bis 11,5 Prozent reduziert. Zwei von zehn Gasgeräten zeigten leichte akustisch wahrnehmbare Effekte (etwas höhere Strömungsgeräusche) beim Betrieb mit dem wasserstoffhaltigen Brenngas.

Wasserstoffreiches Brenngas führt unter den vorliegenden Randbedingungen fast immer zu einer Reduktion der CO_2 -, CO - und NO_x -Emissionen, nur bei einem Gerät blieben die CO -Werte fast gleich im einstelligen Vol.-ppm-Bereich.

Tabelle 4: Wesentliche Daten und Ergebnisse der Felduntersuchung

Anzahl installierter Gasgeräte	174
davon Brennwertkessel	139
davon Umlaufwasserheizer	18
davon Herde und Küchengeräte (Haushalt und Gewerbe)	9
davon Brenner mit Gebläse	4
davon BHKW	1
davon andere	3
Dauer der H₂-Einspeisung	2.683 h
davon intermittierend 2 Vol.-%, 3 Vol.-%, 4 Vol.-%	433 h
davon kontinuierlich 4 Vol.-%	427 h
davon kontinuierlich 6,5 Vol.-%	988 h
davon kontinuierlich 9 Vol.-%	835 h
Anzahl der Messungen an installierten Geräten im Feld	422
Anzahl CO-Messwerte > 500 ppm	9*
CO-Messwert > 500 ppm	2,1 %

* bei drei Geräten lag kein H₂ bei den Messungen vor

Quelle: E.ON/DVGW-EBI

Zusammenfassend war das Ergebnis der Untersuchung von zehn handelsüblichen Gasgeräten, dass für den häuslichen Bereich selbst bei 30 Vol.-% H₂ keine nennenswerten Funktionseinschränkungen bei den getesteten Geräten auftraten.

Feldversuch Wasserstoffeinspeisung

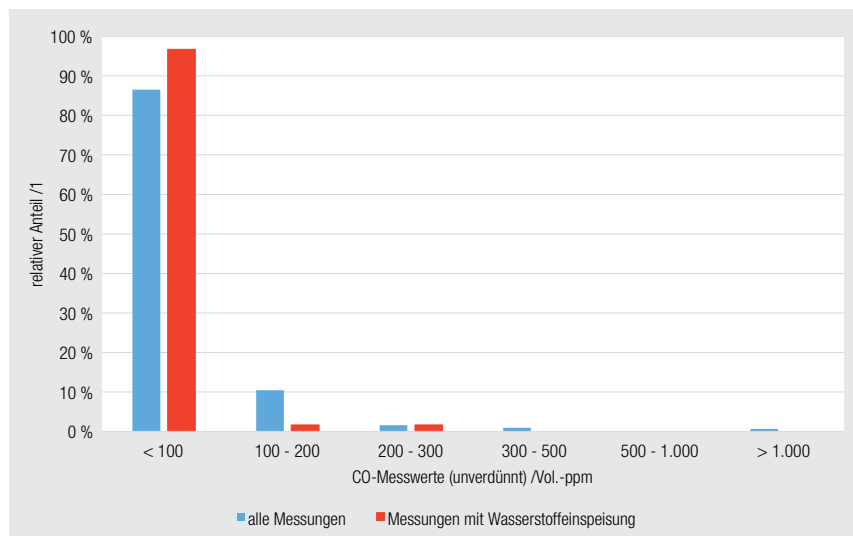
Die positiven Laborergebnisse mit dem Nachweis eines sicheren und zuverlässigen Betriebs verschiedener Gerätetypen bei unterschiedlichen Versuchsbe-

dingungen bei bis zu 30 Vol.-% und teilweise höheren H₂-Zumischungen waren eine Grundlage zur Durchführung des Feldtests. Zusammen mit einer vollständigen Erfassung der installierten Gerätetechnik im ausgewählten Verteilnetz konnte eine Störung oder gar Gefährdung der Netzkunden aufgrund der H₂-Zumischung < 10 Vol.-% ausgeschlossen werden. Vorbereitung, Durchführung und Ergebnisse des Feldtestes sind bereits ausführlich in [1] beschrieben. Hier werden die wesentlichen Daten und Ergebnisse zur Gerätetechnik zusammengefasst.

Die in dem relativ kleinen Netzgebiet erfasste Gerätetechnik ist bezüglich Gerätetypen, Hersteller und Gerätealter von einer großen Vielfalt geprägt und wurde während des Feldversuches mit einer steigenden H₂-Zumischung zum Erdgas bis maximal 9 Vol.-% für insgesamt fast 2.700 Stunden beaufschlagt. Bei der Erfassung der Geräte wurden diese, außer in einem Fall mit unzulässig hohen CO-Emissionen, weder in der Einstellung verändert noch gewartet. Für die Wiederholungsmessungen während der Einspeisung wurde eine sehr sorgfältige Geräteauswahl durchgeführt, sodass Gerätetypen, Hersteller und Alter repräsentativ vertreten waren. Insbesondere wurden auch Geräte ausgewählt, die nicht an ihrem optimalen Betriebspunkt arbeiteten. Dabei wurden mager eingestellte Geräte stärker berücksichtigt. Auf diese Weise wurde abgesichert, dass die erzielten Ergebnisse auf übliche Praxisfälle übertragen werden können. Zusätzlich erfolgte bei jeder Emissionsmessung eine Kontrollmessung des eingespeisten Wasserstoffanteils mittels eines portablen H₂-Sensors vor Ort am Gerät. Eine Übersicht ist in **Tabelle 4** dargestellt.

Alle Untersuchungen an den ausgewählten Geräten mit in der Praxis typischen Einstellungen und einer 100-Prozent-Kontrolle der H₂-Konzentration vor Ort ergaben: In dem mehrmonatigen Einspeisezeitraum konnten keine negativen Effekte im Bestand aufgrund der H₂-Zumischung gefunden werden. Der technische Betrieb der Gasendgeräte war nicht beeinträchtigt. Die CO-Emissionen verringerten sich sogar im Schnitt und die Anzahl der auffälligen Geräte lag unter den Vergleichszahlen des Zentralinnungsverbands der Schornsteinfeger [6], siehe beispielhaft die Ergebnisse an Brennwertkesseln in **Abbildung 13**.

Damit ist der sichere und zuverlässige Gerätebetrieb bei Einspeisung bis 9 Vol.-% Wasserstoff unter den vor Ort angetroffenen Bedingungen in der Praxis eines Verteilnetzes nachgewiesen.



Quelle: E.ON/DVGW-EBI

Abb. 13: Häufigkeitsverteilung der CO-Messergebnisse an Brennwertkesseln. 99,4 Prozent der Geräte waren mängelfrei. Zwei Geräte waren laut Kehr- und Überprüfungsordnung (KÜO) zu bemängeln und wurden in einen ordnungsgemäßen Zustand überführt.

Fazit, Handlungsempfehlungen und Ausblick

Im Rahmen des Projekts wurden in umfangreichen Labor- und Prüfstandsuntersuchungen H₂-Zumischungen bis zu 30 Vol.-% und vereinzelt sogar höher bis 55 Vol.-% zu Erdgas untersucht. Die H₂-Zumischung verringerte den Brennwert, den Wobbe-Index, den Luftbedarf und damit die spezifischen CO₂-Emissionen des Brenngases. Neben dem Ziel der Reduktion von CO₂-Emissionen wurden fast durchgehend ebenfalls positive Effekte bezüglich verringerter CO- und NO_x-Emissionen beobachtet. Die Untersuchungen zeigten zudem ein unproblematisches Regel-, Start-, Stopp- und Laufverhalten selbst bei hohen H₂-Konzentrationen und Worst-Case-Bedingungen. Einzig die maximale Leistung der handelsüblichen Geräte wurde aufgrund des geringeren Brennwertes und oberen Begrenzung der Gaszufuhr bei 30 Vol.-% H₂ um wenige Prozentpunkte nicht erreicht. Dies dürfte in der Praxis bei Haushaltsgeräten keine Komforteinbuße nach sich ziehen und bei einstelliger H₂-Zumischung kaum messbar sein.

Dies wurde durch die zahlreichen Messungen des Feldtestes mit mehrmonatiger H₂-Einspeisung bestätigt und darüber hinaus auch unter Praxisbedingungen bezüglich Klima, Nutzerverhalten, Einbauzustand und Geräteeinstellung ein sicherer, zuverlässiger und emissionsarmer Betrieb nachgewiesen. Die Anzahl auffälliger Geräte lag unter dem langjährigen Schnitt der Schornsteinfegerstatistik und die CO-Emissionen sanken bei den H₂-Zumischungen von bis zu 9 Vol.-%.

Das DVGW-Regelwerk ermöglicht eine H₂-Einspeisung in ein Erdgasverteilnetz im einstelligen Prozentbereich. Der Netzbetreiber muss allerdings im Vorfeld der Einspeisung eine detaillierte Planung durchführen. Die Gasbeschaffheiten müssen auch bei H₂-Zumischung weiterhin im zulässigen Bereich des Regelwerks lie-

gen, hier sollte aber das Regelwerk hinsichtlich H₂-haltiger Gase überarbeitet werden.

Nach Prüfung der Netztopologie auf möglicherweise besondere Verbraucher, wie z. B. CNG-Tankstellen oder industrielle Thermoprozessanlagen, ist eine frühzeitige Information und Einbindung industrieller und gewerblicher Nutzer notwendig, um eventuelle spezifische Anforderungen an die Prozesse durch das H₂-haltige Erdgas entsprechend zu berücksichtigen. Ebenso müssen die Behörden in die Planung und den Bau der Wasserstoffeinspeiseanlage und das Eichamt bei der Einrichtung von Brennwertzonen und die Ermittlung des Abrechnungsbrennwertes eingebunden werden.

Die umfassenden Laboruntersuchungen bis mindestens 30 Vol.-% H₂-Zumischung und die Felduntersuchungen erbrachten keine Ergebnisse oder Hinweise, die eine Einschränkung der bestehenden Grenzen für die Wasserstoffeinspeisung in den DVGW-Arbeitsblättern G 260 und G 262 erforderlich machen.

Die Einspeisung von regenerativ erzeugten Wasserstoff bietet der Gaswirtschaft eine weitere Möglichkeit der Dekarbonisierung (greening) von Erdgas und einen hocheffizienten H₂-Nutzungspfad und kann im Rahmen der Energiewende einen nicht unerheblichen Beitrag zur Minderung der CO₂-Emissionen leisten. ■

Literatur

- [1] Nitschke-Kowsky Dr. P. W. Weßing, Dr. H. Dörr und K. Kröger, 2015. Praxiserfahrungen mit der Wasserstoffeinspeisung in ein Erdgasverteilnetz. DVGW energie | wasser-praxis, Oktober 2015, S. 20–27.
- [2] Schröder, V., 2002. Explosionsgrenzen von Wasserstoff und Wasserstoff/Methan-Gemischen, Forschungsbericht 253 der BAM, Berlin
- [3] GRI 3.0 Smith, G. P., et al., 1997. GRI 3.0 Mechanismus, www.me.berkeley.edu/gri_mech/
- [4] Kröger et al., 2016. Abschlussbericht: Untersuchungen zur Einspeisung von Wasserstoff in ein Erdgasverteilnetz – Auswirkungen auf den Betrieb von Gasanwendungstechnologien im Bestand, auf Gas-Plus-Technologien und auf Verbrennungsregelstrategien, 04/2016, DVGW G 05/01/12.
- [5] Final-Report, 2012. CEN BT WG 197 No 310. Standardization in the field of gas qualities, Mandate CE M400 Phase 1; 2012
- [6] ZIV, 2015. Erhebungen des Schornsteinfegerhandwerks 2011 bis 2015, www.schornsteinfeger.de/Erhebungen.html. (Zugriff am 01.09.2015).

Die Autoren

Dr. Holger Dörr ist am DVGW-EBI für Forschungsprojekte zu Anwendungstechnologien und Gasbeschaffheiten verantwortlich.

Kerstin Kröger ist Projektingenieurin am DVGW-EBI und im Rahmen dieses Projektes Projektleiterin.

Dr. Frank Graf ist Leiter der Gastechologie an der DVGW-Forschungsstelle des Engler-Bunte-Instituts.

Wolfgang Köppel ist Gruppenleiter der Gastechologie an der DVGW-Forschungsstelle des Engler-Bunte-Instituts.

Frank Burmeister ist Abteilungsleiter Brennstoff- und Gerätetechnik am Gas- und Wärme Institut Essen e. V.

Janina Senner ist Teamleiterin Brennstofftechnik am Gas- und Wärme Institut Essen e. V.

Dr. Petra Nitschke-Kowsky ist Projektleiterin bei E.ON Metering.

Werner Weßing ist Programmmanager Gasverteilung im E.ON Konzern und Mitglied im DVGW TK Gasverteilung.

Kontakt:

Dr. Holger Dörr
DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie
Engler-Bunte-Ring 3, 76131 Karlsruhe
Tel.: 0721 96402-62
E-Mail: doerr@dvwg-ebi.de
Internet: www.dvbw-ebi.de

Frank Burmeister
Gas- und Wärme-Institut Essen e. V.
Hafenstr. 101, 45356 Essen
Tel.: 0201 3618-245
E-Mail: burmeister@gwi-essen.de
Internet: www.gwi-essen.de

Dr. Petra Nitschke-Kowsky
E.ON Metering GmbH
Gladbecker Str. 404, 45326 Essen
Tel.: 0201 184-8775
E-Mail: petra.nitschke-kowsky@eon.com
Internet: www.eon.com