



Abb. 1: Gasdruckregelanlage
am GWI – Regelstrecken
der Gasdruckregel-Anlage

HySpeed – Wasserstoff in Gasdruckregelanlagen

Im Projekt „HySpeed“ wurde untersucht, **unter welchen technischen Randbedingungen** größere Strömungsgeschwindigkeiten von Wasserstoff in Gasdruckregelanlagen zulässig sind. Hierfür wurden CFD-Simulationen **an realen Gerätegeometrien und experimentelle Untersuchungen** an mehreren praxisrelevanten Gerätekonfigurationen durchgeführt. Die Regelstrecken wurden für Erdgas ausgelegt, während die Versuche mit Wasserstoff **ohne Anpassungen durchgeführt** wurden.

von: Miriam Bäuerle, Eren Tali, Nils Janßen, Dr. Frank Burmeister & Dr. Rolf Albus (alle: Gas- und Wärme-Institut Essen e.V.)

Gasdruckregel- und -Messanlagen (GDRM-Anlagen) stellen einen sicherheitsrelevanten Bestandteil der Gasinfrastruktur dar. Ihre Funktion besteht in der zuverlässigen Reduktion und Stabilisierung von Gasdruckniveaus sowie der Absicherung nachgelagerter Netzelemente gegen unzulässige Drucküberschreitungen. Im Zuge der Transformation der Gasinfrastruktur hin zu Wasserstoff stellt sich die Frage, ob die im Erdgasbetrieb etablierten Grenzwerte für Strömungsgeschwindigkeiten in GDRM-Anlagen auf Wasserstoff übertragbar sind. Aufgrund der deutlich geringeren Dichte und volumetrischen Energiedichte von Wasserstoff sind zur Bereitstellung vergleichbarer energetischer Leistungen höhere Volumenströme erforderlich, was zu größeren Strömungsgeschwindigkeiten führt.

Im Projekt HySpeed wurde sowohl die gesamte Messanlage als auch deren einzelne funktionale Komponenten betrachtet. Methodisch werden hier Berechnungen, numerische Strömungssimulationen (CFD) sowie Messungen unter praxisnahen Betriebsbedingungen kombiniert. Durch diese Vorgehensweise soll eine wissenschaftlich fundierte Grundlage geschaffen werden, um die Auswirkungen einer Gasumstellung von Erdgas auf Wasserstoff hinsichtlich Strömungsdynamik und Betriebssicherheit umfassend beurteilen zu können.

Aufbau Messstand

Für den Versuchsaufbau wurden zwei auf Erdgas ausgelegte Gasdruckregelstrecken konstruiert, einmal mit einer Rohraufweitung hinter dem Gasdruckregler (**Abb. 1** oben) und einmal mit Rohrkrümmung (**Abb. 1** unten). Als Randbedingung wurde eine H_2 -Senke von maximal 300 Kilowatt (kW) gewählt. Hierfür wurde ein modularer (geflanschter) Aufbau der Messstrecken vorgesehen. So sind Gasdruckregelgeräte, teilweise Sicherheitsabsperrventile (SAV) und Messformstücke austauschbar. Es wurde in der oben verlaufenden Strecke (DN 25) ein Messformstück (DN 50) mit 4×9 Messstellen (vier Druckmessbohrungen auf dem Querschnitt in 90-Grad-Abständen verteilt in neun gleichmäßigen Abständen auf der Länge des Messformstücks verteilt) hinter einer Rohraufweitung/Querschnittsänderung (DN 25 auf DN 50) installiert. Für die untere Messstrecke (DN 25) wurde eine Rohrkrümmung in Form von zwei 3D-Bögen (2×90 Grad) vorgesehen. Hier sind drei Positionen für das Messformstück mit 4×9 Messstellen vorgesehen: hinter dem Reg-

ler ($5 \times DN$), hinter der ersten sowie hinter der zweiten Rohrkrümmung. Das speziell angefertigte Messformstück wird für die jeweiligen Messungen an den unterschiedlichen Positionen ein- und umgebaut. Die Messstrecken werden unabhängig voneinander betrieben und sind über Kugelhähne absperrbar. An den Messformstücken wurden an jeder Bohrung (4×9) Druckaufnehmer angebracht.

CFD-Simulationen: Wiederanlegelängen

Die Simulationen wurden mit ANSYS Fluent 23R2 durchgeführt. Es wurden RANS-Modelle für stationäre, kompressible Strömungen eingesetzt. Die Turbulenzmodellierung erfolgte abhängig vom betrachteten Fall mittels realizable $k-\epsilon$ sowie $k-\omega$ SST. Die Modellierung erfolgte unter Annahme adiabater Wände.

Bei der Untersuchung einer Rohraufweitung (hier: DN 25 auf DN 50) zeigt die Simulation mit Wasserstoff qualitativ dasselbe Strömungsbild wie mit Methan: Strahlbildung im Stellgliedbereich, nachfolgende Rezirkulation sowie sukzessive Homogenisierung stromabwärts. Quantitativ ist jedoch eine signifikante Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeiten festzustellen. Die Rezirkulationszone verlängert sich von ca. 160 mm auf ca. 190 mm. Dennoch bleibt die Druckfeldhomogenität am Messort ($5 \times DN$) weiterhin hoch. Die Druckdifferenzen im Querschnitt sind vergleichbar gering wie im Methanfall. Somit ergibt sich aus den CFD-Ergebnissen kein Hinweis auf eine prinzipielle Verschlechterung der Druckmessbedingungen durch einen Wasserstoffbetrieb.

Bei der Untersuchung von Auswirkungen durch Rohrkrümmungen (hier: $2 \times 3D$ -Bögen; GDR-Gerät: HON 201) mit Wasserstoff zeigt sich, dass unmittelbar nach dem Austritt aus dem Stellglied eine beschleunigte Strömung zu erkennen ist, die infolge der Expansion des Wasserstoffs aus dem Hochdruck- in den Niederdruckbereich entsteht. Im Anschluss an diesen Expansionsbereich bildet sich eine ausgeprägte Rezirkulationszone entlang der Rohrwand aus, die durch lokale Strömungsumlenkungen und Druckgradienten verursacht wird. Der Druckverlauf zeigt, dass sich die Druckverteilung im Bereich von etwa $5 \times DN$ hinter dem GDR gleichmäßig. Insgesamt bestätigen die Simulationsergebnisse, dass die Strömung im Austrittsbereich des GDR-Geräts trotz lokaler Turbulenzen und Rezirkulationen rasch wieder in einen homogenen Zustand übergeht (**Abb. 2**). ▶

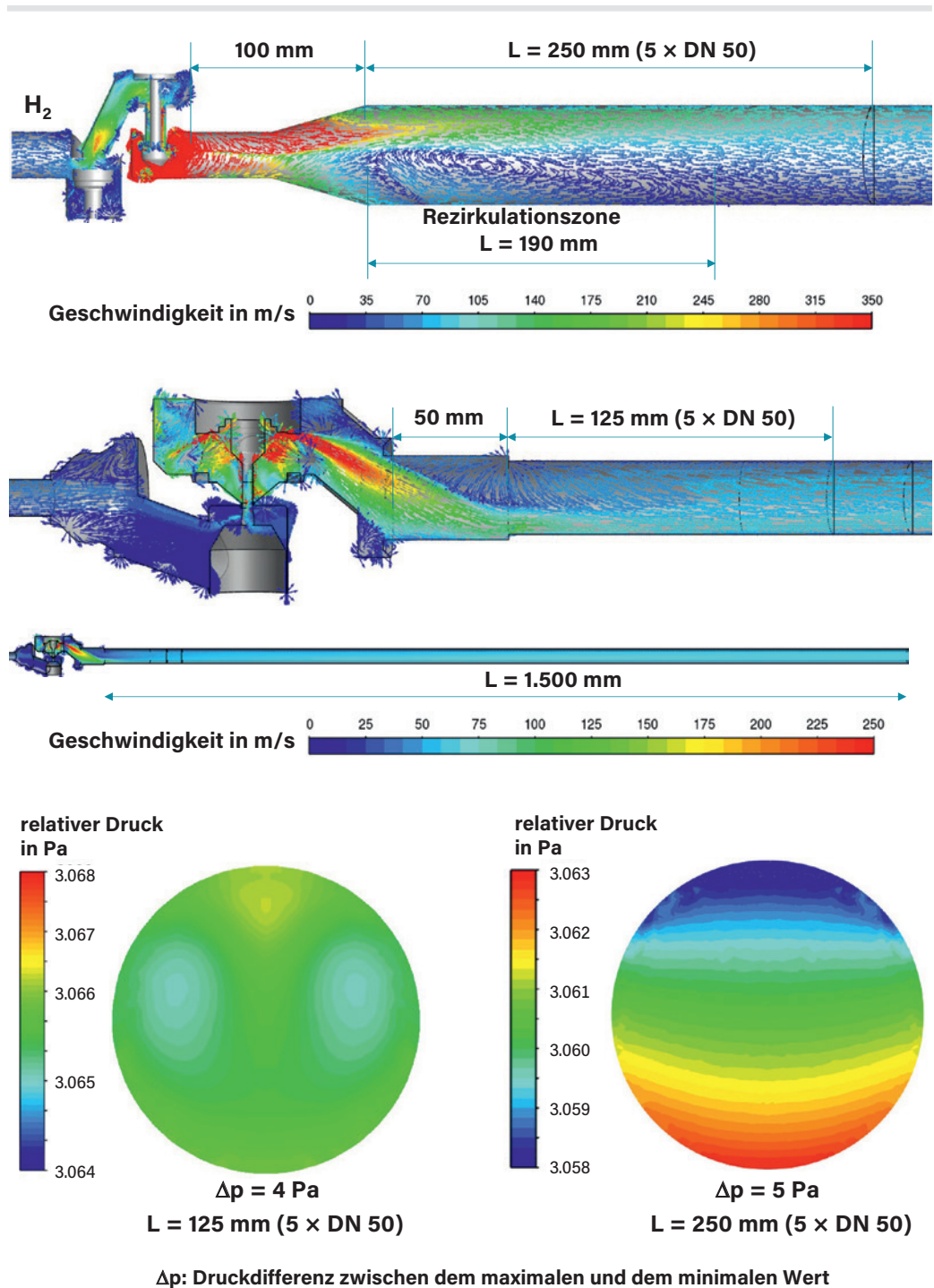


Abb. 2: Geschwindigkeitsvektoren mit der Rezirkulationszone ($p_u = 6$ bar, $p_d = 30$ mbar, Hub = 0,875 mm, H₂) nach Rohraufweitung (oben) und ohne (unten) sowie Druckverlauf im Abstand von $5 \times DN$ hinter dem GDR ($p_u = 6$ bar, $p_d = 30$ mbar, Hub = 0,875 mm, H₂) nach Rohraufweitung (oben) und ohne (unten)

Gasdruckregel-Anlage im Betrieb: Mess- und Simulationsergebnisse

Phänomen Rohraufweitung

Die Messungen mit Methan und Wasserstoff wurden bei einem Eingangsdruck von etwa 6 bar und einem Ausgangsdruck von etwa 30 mbar durchgeführt. Das Gerät wurde dabei auf eine brennwertbezogene Leistung von 300 kW im Wasserstoffbetrieb eingestellt. Diese Einstellung entsprach der Betriebsweise des Geräts im realen Einsatz und ermöglichte einen

direkten Vergleich zwischen Methan- und Wasserstoffbetrieb. Die Geschwindigkeiten wurden aus den Betriebsvolumenströmen der Gase und den Querschnittsflächen der jeweiligen Rohrdurchmesser berechnet.

Bei den Messungen der Regelstreckenkonfiguration mit Rohraufweitung liegen die Strömungsgeschwindigkeiten von Wasserstoff etwa 2,68-mal höher als die von Methan. Während sich die Geschwindigkeit im Anschlussrohr von etwa 16 m/s bei Methan auf etwa 43 m/s bei

Quelle: GWR

Wasserstoff erhöht, nimmt die Reynolds-Zahl mit einem Umrechnungsfaktor von 0,42 (Referenzgas: Methan) ab. Aufgrund des größeren Durchmessers des Messstellrohrs und des höheren Eingangsdrucks bleiben die Strömungsgeschwindigkeiten dort unter 11 m/s. Die Geschwindigkeitsverhältnisse beider Gase entsprechen jedoch weiterhin den Volumenstromverhältnissen. Damit wird deutlich, dass trotz der unterschiedlichen Dichten und Strömungsgeschwindigkeiten die Strömungscharakteristiken beider Gase im betrachteten Bereich ähnlich bleibt – das heißt, dass sich die Strömung in Bezug auf Druckverlauf, Turbulenz und Geschwindigkeitsprofil ähnlich verhält. Im zeitlichen Mittel stimmen die Verhältnisse der Strömungsgeschwindigkeiten zwischen Methan und Wasserstoff weitgehend mit den Simulationsergebnissen überein (Abb. 3).

Der maximal realisierbare Normvolumenstrom von Wasserstoff beträgt etwa 118 m³/h und wird nahezu vollständig ausgeschöpft, während Methan aufgrund seiner höheren Dichte rund 44 m³/h erreicht. Der experimentelle Umrechnungsfaktor von 2,68 liegt rund 5 Prozent unter dem theoretischen Wert, bedingt durch Druck- und Temperaturänderungen im Messverlauf.

Die gemessenen relativen statischen Drücke an der Messstelle und am Anlagenausgang zeigen unter den eingestellten Randbedingungen einen über die Messstrecke hinweg nahezu gleichmäßigen Verlauf. Dies verdeutlicht, dass sich hinter dem GDR-Gerät ein stabilisiertes Strömungsfeld ohne Rückströmungen oder Wirbelstrukturen ausbildet. Die Druckschwankungen sind bei Wasserstoff geringer als bei Methan. ▶

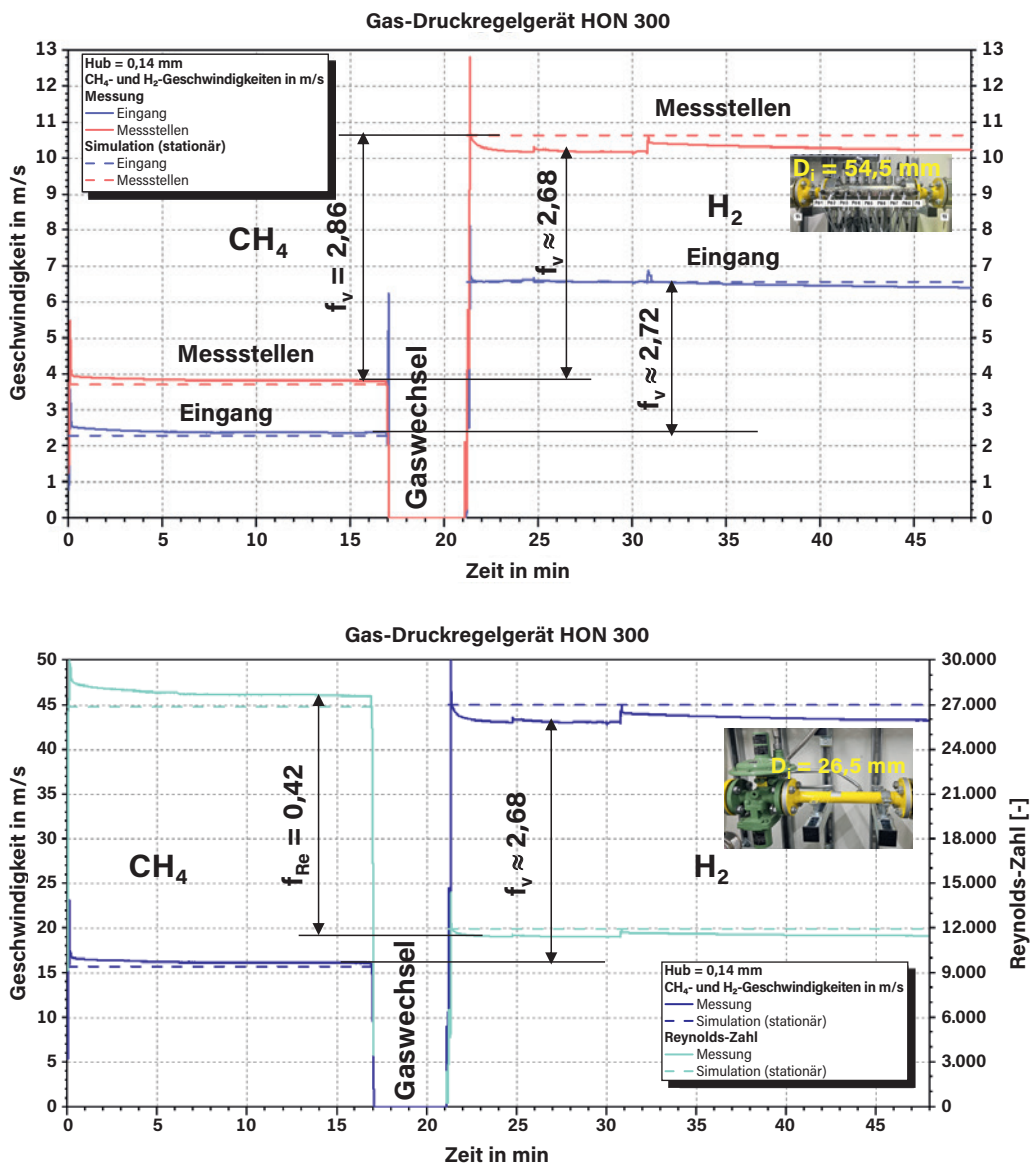
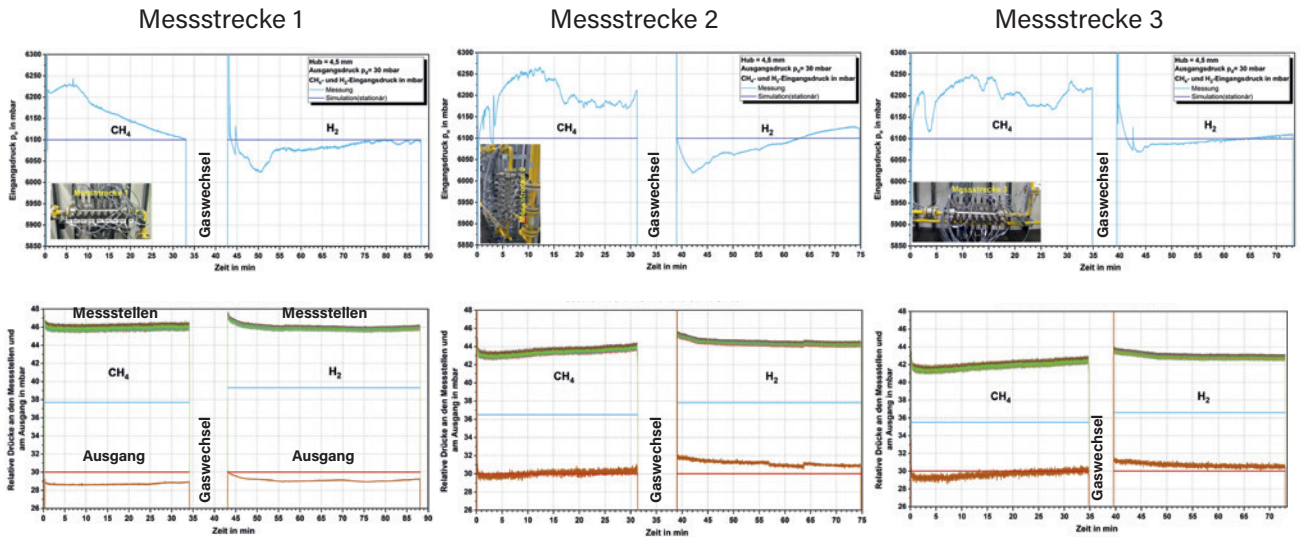


Abb. 3: Verlauf der Geschwindigkeiten im Anschluss- und Messstellrohr sowie am Eingang der Anlage während der Messung und in der Simulation ($p_d = 30$ mbar), sowie Verlauf der Reynolds-Zahl im Anschlussrohr; Regelstreckenkonfiguration: Rohraufweitung



Quelle: GWI

Abb. 4: Vergleich der gemessenen und simulierten relativen Drücke von Methan und Wasserstoff an den drei Messstellen und am Ausgang der Versuchsanlage; Regelstreckenkonfiguration: Rohrkrümmung

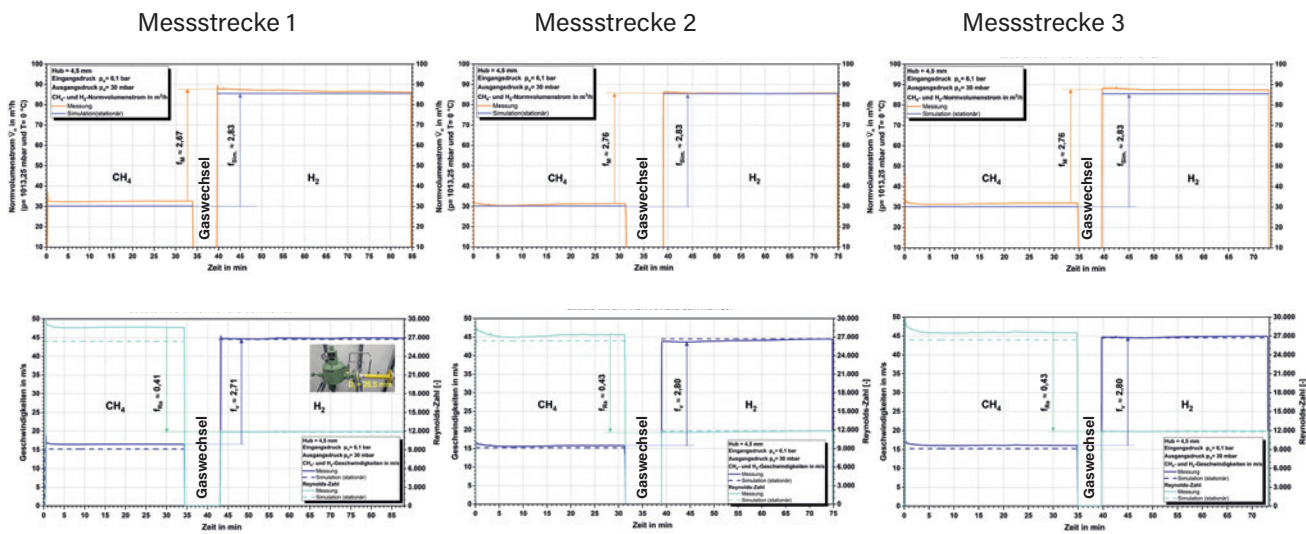
Phänomen Rohrkrümmung

Bei den Messungen der Regelstreckenkonfiguration mit Rohrkrümmung stabilisieren sich die Eingangsdrücke von Wasserstoff schneller als die von Methan, da die höheren Volumenströme infolge der höheren Strömungsgeschwindigkeiten zu einem schnelleren Druckausgleich führen. Während der Messungen wurde der Ausgangsdruck auf etwa 30 mbar eingestellt. Die Drücke in den drei Messstrecken passten sich entsprechend an und zeigen einen annähernd linearen Verlauf. Dies deutet darauf hin, dass hinter den Rohr-

bögen in den Messstrecken weder Rückströmungen noch Wirbelbildungen auftreten und die Strömung im Messbereich annähernd stationär verläuft. Aufgrund der Länge der Messleitung mit zwei Umlenkungen sind die gemessenen relativen Drücke an den Messstrecken 2 und 3 um etwa 2 mbar bzw. 4 mbar niedriger als der relative Druck an Messstrecke 1. Während die gemessenen Druckschwankungen bei Methan im Bereich von etwa 2 mbar liegen, betragen sie bei Wasserstoff etwa 1 mbar. In den Simulationen werden Rohrleitungsabschnitte und Um-

lenkungen außerhalb der Symmetrieebene vernachlässigt, wodurch die berechneten relativen Drücke etwas kleiner ausfallen als die gemessenen Werte. Tendenziell zeigen die Simulationsergebnisse denselben Effekt wie die Messungen (Abb. 4): Je kürzer der Rohrabschnitt zwischen Messstelle und Ausgang, desto niedriger ist der relative Druck.

Für die Regelstreckenkonfiguration mit Rohrkrümmung wurden die Reynolds-Zahlen ebenfalls für beide Gase im Anschlussrohr berechnet und dar-



Quelle: GWI

Abb. 5: Vergleich der gemessenen und simulierten Strömungsgeschwindigkeiten und Reynolds-Zahlen von Methan und Wasserstoff in den drei Messstrecken im Anschluss- und Messstellrohr sowie am Eingang der Anlage ($p_e = 30$ mbar); Regelstreckenkonfiguration: Rohrkrümmung

gestellt. Während sich die Strömungsgeschwindigkeiten im Anschlussrohr von etwa 16 m/s bei Methan auf rund 45 m/s bei Wasserstoff erhöhen, nehmen die Reynolds-Zahlen mit einem Umrechnungsfaktor von 0,41 bzw. 0,43 (Referenzgas: Methan) ab. Aufgrund des um 2 mm größeren Durchmessers des Messstellrohrs liegen die Strömungsgeschwindigkeiten dort um etwa 14 Prozent niedriger als im Anschlussrohr. Die Geschwindigkeitsverhältnisse beider Gase entsprechen jedoch weiterhin annähernd den Volumenstromverhältnissen.

Trotz der unterschiedlichen Dichten, Strömungsgeschwindigkeiten und Reynolds-Zahlen bleiben auch bei dieser Konfiguration die Strömungscharakteristiken für beide Gase im Bereich der drei Messstrecken vergleichbar. Das bedeutet, dass sich die Strömungen hinsichtlich Druckverlauf, Turbulenzen und Geschwindigkeit qualitativ ähnlich verhalten. Die Strömungsgeschwindigkeiten und Reynolds-Zahlen für Methan und Wasserstoff in den drei Messstrecken stimmen weitgehend mit den Simulationsergebnissen überein (Abb. 5). Die kleinen Abweichungen zwischen Messung und Simulation treten insbesondere bei den Messungen mit Methan auf. Die simulierten Geschwindigkeiten entsprechen den über die jeweilige Querschnittsfläche gemittelten Mittelwerten der Strömungsgeschwindigkeiten.

Fazit

Die experimentellen Untersuchungen bestätigen die Simulationsergebnisse und verdeutlichen die charakteristischen Unterschiede zwischen Wasserstoff und Methan unter realen Betriebsbedingungen. Der Wasserstoff-Volumenstrom ist um den Faktor von ca. 2,7 größer als bei Methan – einen gleichen Eingangsdruck vorausgesetzt. Die experimentell bestimmten Umrechnungsfaktoren stimmen eng mit den theoretisch erwarteten Werten überein. Trotz der höheren Strömungsgeschwindigkeiten weist Wasserstoff niedrigere Reynolds-Zahlen und geringere Druckschwankungen auf. Auch

die Druckverläufe entlang der Messstrecken zeigen für Wasserstoff ein schneller ausgebildetes und homogeneres Strömungsfeld. Insgesamt bestätigen die Messdaten die theoretischen Zusammenhänge zwischen Volumenstrom, energetischen Kennwerten, Strömungsdynamik und Druckverhalten und liefern wertvolle Grundlagen für die Auslegung und Bewertung wasserstofftauglicher Gasregelstrecken. Die Wiederanlegelängen sind in beiden Fällen sehr ähnlich, sodass keine Beeinflussung an einzelnen Druckmessbohrungen erkennbar war.

Die Autoren danken dem DVGW für die Förderung des Projekts „HySpeed – Zulässige Strömungsgeschwindigkeiten von Wasserstoff in Gasdruckregelanlagen“ mit der Fördernummer G 202330 sowie den Projektpartnern der DBI-Gruppe und Honeywell Gas Technologies für die gute Zusammenarbeit. ■

Die Autoren

Miriam Bäuerle ist Projektleiterin in der Abteilung Brennstoff- und Gerätetechnik am Gas- und Wärme-Institut Essen e. V. (GWI).

Eren Tali ist Koordinator für CFD-Simulationen in der Abteilung Brennstoff- und Gerätetechnik am GWI.

Nils Janßen ist Prüfenieur in der Abteilung Prüflabor am GWI.

Dr. Frank Burmeister ist Abteilungsleiter Brennstoff- und Gerätetechnik sowie Prüflabor am GWI.

Dr. Rolf Albus ist geschäftsführender Vorstand des GWI.

Kontakt:

Miriam Bäuerle

Gas- und Wärme-Institut Essen e.V.

Hafenstr. 101, 45356 Essen

Tel.: 0201 3618-193

E-Mail: miriam.baeuerle@gwi-essen.de

Internet: www.gwi-essen.de

Das Kundenmagazin der wvgw media: kostenlos abonnieren oder direkt online lesen.

wvgw.de/wvgw-aktuell/

