Betrachtung der Leitungsdimensionierung nach TRGI in Haushalt und Gewerbe für hohe Wasserstoffmengen im Erdgas

Abschlussbericht





Impressum

Abschlussbericht

Betrachtung der Leitungsdimensionierung nach TRGI in Haushalt und Gewerbe für hohe Wasserstoffmengen im Erdgas

Erstellt im Auftrag von

Gaswirtschaftlicher Beirat

Autoren

Dipl.-Ing. Patrick Enzmann

Dipl.-Ing. Philipp Pietsch

Dipl.-Ing. Marcus Wiersig

DBI Gastechnologisches Institut gGmbH Freiberg

Halsbrücker Straße 34

D-09599 Freiberg

www.dbi-gruppe.de

Inhalt

Ab	bildung	gsverzeichnis	4
Ta	bellenv	rerzeichnis	5
1	Motivation und Zielsetzung		
2 Stand des Wissens			7
	2.1	Dimensionierung der Leitungsanlage und von Bauteilen nach TRGI	7
	2.1.1	Leitungsanlage	9
	2.1.2	Hauptabsperreinrichtung	11
	2.1.3	Gasströmungswächter	11
	2.1.4	Absperreinrichtung	12
	2.1.5	Gaszähler	13
	2.2	Bisherige Untersuchungen zum Einfluss von Wasserstoff auf die Bestandteile der Leitungsanlage nach TRGI	15
	2.2.1	Leitungsanlage	15
	2.2.2	Gasströmungswächter	16
	2.2.3	Absperreinrichtungen	17
	2.2.4	Gaszähler	17
3		nsionierung der Leitungsanlage nach TRGI G 600 für volatile Wasserstof 00 Vol% Wasserstoff	ffanteile 20
3			
3	bis 10	00 Vol% Wasserstoff	20
3	bis 10	00 Vol% Wasserstoff Vorgehensweise und Berechnungsgrundlagen	20
3	3.1 3.1.1	00 Vol% Wasserstoff Vorgehensweise und Berechnungsgrundlagen Bestimmung des Realgasfaktors	20 20 21
3	3.1 3.1.1 3.1.2	Vorgehensweise und Berechnungsgrundlagen Bestimmung des Realgasfaktors Bestimmung des volumenbezogenen Brenn- bzw. Heizwertes	20 20 21 21
3	3.1 3.1.1 3.1.2 3.1.3	Vorgehensweise und Berechnungsgrundlagen Bestimmung des Realgasfaktors Bestimmung des volumenbezogenen Brenn- bzw. Heizwertes Bestimmung der relativen Dichte und Dichte des Gasgemisches	20 20 21 21 22
3	3.1 3.1.1 3.1.2 3.1.3 3.1.4	Vorgehensweise und Berechnungsgrundlagen Bestimmung des Realgasfaktors Bestimmung des volumenbezogenen Brenn- bzw. Heizwertes Bestimmung der relativen Dichte und Dichte des Gasgemisches Bestimmung des Wobbe-Index	20 20 21 21 22 23
3	3.1 3.1.1 3.1.2 3.1.3 3.1.4 3.1.5	Vorgehensweise und Berechnungsgrundlagen Bestimmung des Realgasfaktors Bestimmung des volumenbezogenen Brenn- bzw. Heizwertes Bestimmung der relativen Dichte und Dichte des Gasgemisches Bestimmung des Wobbe-Index Bestimmung der dynamischen Viskosität	20 21 21 22 23 23
3	bis 10 3.1 3.1.1 3.1.2 3.1.3 3.1.4 3.1.5 3.2	Vorgehensweise und Berechnungsgrundlagen Bestimmung des Realgasfaktors Bestimmung des volumenbezogenen Brenn- bzw. Heizwertes Bestimmung der relativen Dichte und Dichte des Gasgemisches Bestimmung des Wobbe-Index Bestimmung der dynamischen Viskosität Ergebnisdarstellung	20 20 21 21 22 23 23
3	3.1 3.1.1 3.1.2 3.1.3 3.1.4 3.1.5 3.2 3.2.1	Vorgehensweise und Berechnungsgrundlagen Bestimmung des Realgasfaktors Bestimmung des volumenbezogenen Brenn- bzw. Heizwertes Bestimmung der relativen Dichte und Dichte des Gasgemisches Bestimmung des Wobbe-Index Bestimmung der dynamischen Viskosität Ergebnisdarstellung Leitungsanlage	20 20 21 21 22 23 23 24 24
3	bis 10 3.1 3.1.1 3.1.2 3.1.3 3.1.4 3.1.5 3.2 3.2.1 3.2.2	Vorgehensweise und Berechnungsgrundlagen Bestimmung des Realgasfaktors Bestimmung des volumenbezogenen Brenn- bzw. Heizwertes Bestimmung der relativen Dichte und Dichte des Gasgemisches Bestimmung des Wobbe-Index Bestimmung der dynamischen Viskosität Ergebnisdarstellung Leitungsanlage Gasströmungswächter	20 20 21 21 22 23 23 24 24 27
3	bis 10 3.1 3.1.1 3.1.2 3.1.3 3.1.4 3.1.5 3.2 3.2.1 3.2.2 3.2.3	Vorgehensweise und Berechnungsgrundlagen Bestimmung des Realgasfaktors Bestimmung des volumenbezogenen Brenn- bzw. Heizwertes Bestimmung der relativen Dichte und Dichte des Gasgemisches Bestimmung des Wobbe-Index Bestimmung der dynamischen Viskosität Ergebnisdarstellung Leitungsanlage Gasströmungswächter Absperreinrichtung	20 20 21 21 22 23 23 24 24 27 29 30
4	bis 10 3.1 3.1.1 3.1.2 3.1.3 3.1.4 3.1.5 3.2 3.2.1 3.2.2 3.2.3 3.2.4 3.3	Vorgehensweise und Berechnungsgrundlagen Bestimmung des Realgasfaktors Bestimmung des volumenbezogenen Brenn- bzw. Heizwertes Bestimmung der relativen Dichte und Dichte des Gasgemisches Bestimmung des Wobbe-Index Bestimmung der dynamischen Viskosität Ergebnisdarstellung Leitungsanlage Gasströmungswächter Absperreinrichtung Gaszähler Maximale Wasserstoffmenge für die Leitungsanlage im Bestand bei der Auslegung fü	20 20 21 21 22 23 23 24 24 27 29 30 r Erdgas

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Ablaufschema zur Anwendung des Tabellenverfahrens zur Leitungsdimensionierung nach [1] 8
Abbildung 2	Überprüfung der Funktion für 3 Gaszähler, vor (v.E.) und nach der Exposition (n.E.) mit Wasserstoff [6]
Abbildung 3	Einfluss der Temperaturkompensation und der Gaszusammensetzung auf die Zählgenauigkeit von Gaszählern, Balgengaszähler G4 [9] 19
Abbildung 4	Brennwert in Abhängigkeit vom Wobbe-Index für verschiedener Wasserstoffanteils in unterschiedlichen Erdgasen 24
Abbildung 5	Rohrdruckgefälle und Strömungsgeschwindigkeit für verschiedene Erdgase in Abhängigkeit des Wasserstoffanteils 25
Abbildung 6	Gasdichte und Druckverlustbeiwert ζ für verschiedene Erdgase in Abhängigkeit des Wasserstoffanteils 26
Abbildung 7	Druckdifferenz aufgrund des Höhenunterschieds zwischen Geräteanschlussarmatur und Gas- Druckregelgerät 26
Abbildung 8	Druckverlustbeiwerte in Abhängigkeit der Reynoldszahl Re für verschieden Umlenkungsradien von glatten Rohrbögen [17]
Abbildung 9	Druckverlust von Gasströmungswächtern über Spitzenbelastung für GS 4 - verschiedene Wasserstoffbeimischungen für L-Gas Holland, H-Gas Russland 28
Abbildung 10	Druckverlust von Absperreinrichtungen (ohne TAE, Eckform) in Abhängigkeit der Spitzenbelastung Q für DN 25 - verschiedene Wasserstoffbeimischungen für L-Gas Holland, H-Gas Russland
Abbildung 11	Druckverlust von Gaszählern über Nennbelastung für G10 - verschiedene Wasserstoffbeimischungen - verschiedene Wasserstoffbeimischungen für L-Gas Holland, H-Gas Russland
Abbildung 12	Druckverlust von Gaszählern über Spitzenbelastung Q für G10 - verschiedene Wasserstoffbeimischungen für L-Gas Holland, H-Gas Russland (Ausschnitt bis 60 kW Spitzenbelastung)
Abbildung 13	Druckverlust von Gaszählern über Spitzenbelastung Q für G10 - verschiedene Wasserstoffbeimischungen für L-Gas Holland, H-Gas Russland (Ausschnitt ab 60 kW Spitzenbelastung)

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Kenndaten Erdgas L für Berechnungen in DVGW G 600 / G 617			
Tabelle 2:	Rohrrauigkeit für verzinktes Stahlrohr, Kupfer- und Edelstahlrohr, Mehrschichtverbundrohr			
Tabelle 3:	Rohrrauigkeit für Wellrohr	10		
Tabelle 4:	Nenngrößen und deren Abmaße, Übersicht mit normativem Verweis	10		
Tabelle 5:	ζ-Werte für Formteile mit vollem Durchgang, metallene Leitungen [2]	10		
Tabelle 6:	Nenndurchfluss für Gasströmungswächter GS nach DIN 30652-1 und DVGW G 617	11		
Tabelle 7:	Anwendungsmerkmale für Verfahren zum GS-Abgleich [1]	12		
Tabelle 8:	Nennvolumenstrom (Mindestdurchfluss V ₁) für Absperreinrichtungen ohne TAE [4]	12		
Tabelle 9:	Nennvolumenstrom (Mindestdurchfluss V_1) für Absperreinrichtungen mit thermischauslösung [5]	cher 13		
Tabelle 10:	Kenngrößen Balgengaszähler G2,5 bis G65 [2]	14		
Tabelle 11:	Kalkulationsfaktoren für ausgewählte Brenngase / Gaszusammensetzungen [6]	16		
Tabelle 12:	Gaszusammensetzung der untersuchten Brenngase, Angaben in mol-% [14]	20		
Tabelle 13:	Stoffeigenschaften der untersuchten Brenngase [14]	21		
Tabelle 14:	Berechnungsvorgaben Leitungsanlage	25		
Tabelle 15:	Betriebsheizwert H _{I,B} und relative Dichte für ausgewählte Gaszusammensetzungen	28		
Tabelle 16:	GS-Auswahlbereich für die Betrachtung von mehreren Gasgeräten			
Tabelle 17:	Grenzwertbetrachtung von Wasserstoffanteilen in Russland Erdgas H auf den Messbere von Gaszählern	eich 32		
Tabelle 18:	Verhalten des Schließvolumenstromes im Vergleich zum Betriebsvolumenstrom Gasströmungswächtern für verschiedene Wasserstoffanteile im Erdgas	vor 33		
Tabelle 19:	Datentabelle Abbildung 4	37		
Tabelle 20:	Datentabelle Abbildung 5			
Tabelle 21:	Datentabelle Abbildung 9			
Tabelle 22:	Datentabelle Abbildung 9			
Tabelle 23:	Datentabelle Abbildung 10 39			
Tabelle 24:	Datentabelle Abbildung 11 3			

1 Motivation und Zielsetzung

Die Einspeisung von Wasserstoff ins Erdgasnetz erlangt im Rahmen der Energiewende zunehmend an Bedeutung. Derzeit existieren jedoch noch keine genauen Vorstellungen über die zukünftige Höhe des Wasserstoffanteils im Erdgasnetz. Da dieser zuzumischende Wasserstoff vornehmlich aus erneuerbaren Energiequellen stammen wird, ist davon auszugehen, dass starke tages- und jahreszeitliche Schwankungen der erzeugbaren Wasserstoffmengen auftreten können. Zudem ist die Gasabnahme aus dem Netz stetigen Änderungen unterworfen, sodass von Änderungen des Wasserstoffanteils im Erdgasnetz auszugehen ist.

Im Rahmen von realisierten (DVGW) Forschungsprojekten wurden bereits Untersuchungen zu Auswirkungen der Zumischung von Wasserstoff in Erdgas durchgeführt. Dabei wurde die Zumischung von bis zu 40 Vol.-% Wasserstoff betrachtet. Es zeigte sich, dass die signifikant verringerte Dichte bei höheren Volumenanteilen an Wasserstoff mit deutlich erhöhten Volumenströmen einhergeht, während mechanische Druckregelventile unbeeinflusst bleiben.

Im vorliegenden Bericht wird über die bisherigen Untersuchungen hinausgehend, insbesondere die Problematik der Dimensionierung von Leitungsanlagen im Bestand nach TRGI hinsichtlich steigender Volumenströme durch eine Zumischung von hohen, volatilen Anteilen von bis zu 100 Vol.-% Wasserstoff in Erdgas betrachtet.

Dabei werden auf Basis der aktuellen und älteren TRGI G 600 Arbeitsblätter die Dimensionierungen verschiedener Bauteile der Leitungsanlage betrachtet und Einspeisegrenzen für den aktuellen Bestand definiert. Diese Untersuchung scheint zwingend notwendig, da von gleichem Druck und einer gleichbleibenden Leistung am Endgerät ausgehend der zu transportierende Volumenstrom mit steigendem Wasserstoffanteil wie erwähnt deutlich steigt.

Folgende Baugruppen finden hierbei Betrachtung:

- Leitungsanlage
- Gasströmungswächter
- Kugelhähne
- Gaszähler

Folgende Untersuchungsschwerpunkte werden erarbeitet:

- Maximale Wasserstoffmenge für die Leitungsanlage im Bestand bei der Auslegung für Erdgas H und Erdgas L nach TRGI G 600
- Notwendige Druckanhebung in Abhängigkeit des Wasserstoffanteils, um Bestandsanlagen weiter betreiben zu können
- Maximale Wasserstoffmengen und Funktionsgrenzen für die einzelnen Leitungsbestandteile
- Überprüfung der Auslegungsbeiwerte
- Identifizierung notwendiger Überarbeitungen für zukünftige Regelwerke

2 Stand des Wissens

Die Auslegung nach Tabellen bzw. Diagrammen für die Dimensionierung von Leitungen und Bestandteilen nach TRGI werden in dem DVGW Arbeitsblatt G 600 erläutert. Als Grundlage für die berechneten Angaben in den Tabellen und Diagrammen der TRGI werden die Stoffwerte für L-Gas verwendet, die in Tabelle 1. zusammengefasst sind.

Tabelle 1: Kenndaten Erdgas L für Berechnungen in DVGW G 600 / G 617

Betriebsheizwert H _{I,B} [kWh/m³]	8,6
Relative Dichte d _v	0,64
Gasdichte ρ [kg/m³]	0,784
Kinematische Viskosität v [m²/s]	14,9 *10 ⁻⁶
Referenzbedingungen (t [°C]; p [hPa])	15; 1.013

Für die Anwendung der Tabellen und Diagramme aus G 600 für Brenngase mit einem anderen Betriebsheizwert als der in Tabelle 1 Angegebene, sind die Tabellen und Diagramme aus G 617 zu verwenden und mit dem entsprechenden Betriebsheizwert des für die Auslegung bereitstehenden Brenngases zu verwenden.

Der Betriebsheizwert eines Brenngases HI,B berechnet sich nach [1]:

$$H_{I,B} = H_{I,n} * \frac{273,15}{273,15+t} * \frac{p_{amb} + p_e - \varphi * p_S(t)}{1013,25}$$
(1)

Dabei gilt für die in diesem Bericht bestimmten Betriebsheizwerte:

- H_{I,n} als Heizwerte im Normzustand in kWh/m³
- p_{amb} als Luftdruck an der Messstelle in hPa, Annahme p_{amb} = 1013,25 hPa
- pe als Überdruck des Gases an der Messstelle in hPa, Annahme pe = 23 hPa
- ps(t) als Sättigungsdruck des Wasserdampfes in hPa
- t als Temperatur im Ist-Zustand, Annahme t = 25 °C
- ϕ als relative Feuchte des Brenngases (Annahme trockenes Erdgas und trockener Wasserstoff, $\phi=0$)

Die Tabellen in G 617 stellen die Druckverluste in Abhängigkeit des vorherrschenden Volumenstroms dar und damit abweichend von den Tabellen der G 600, welche die Werte auf Nenn- bzw. Spitzenbelastung beziehen.

Betrachtet werden im Folgenden die Bestandteile der Leitungsanlage nachfolgend der Hauptabsperreinrichtung HAE bis zur Geräteanschlussarmatur mit Betriebsdrücken bis zu 0,1 MPa.

2.1 Dimensionierung der Leitungsanlage und von Bauteilen nach TRGI

Nach TRGI wird unterschieden zwischen Nennbelastung \dot{Q}_{NB} , die für die Auswahl der Nenngrößen von Bauteilen der Leitungsanlage verwendet wird, sowie Spitzenbelastung \dot{Q} . Die Spitzenbelastung \dot{Q} ist maßgeblich für die Berechnung der Druckverluste in Leitung und Bauteilen, wobei gilt:

$$\dot{Q} = 0.5 * (\dot{Q}_{SB} + \dot{Q}_{NBmax}) \tag{2}$$

 \dot{Q}_{NB} ist den Herstellerangaben zum Gasgerät zu entnehmen. Davon abweichend sind Gasherde und Gassteckdosen entsprechend den Ausführungen nach DVGW-Arbeitsblatt G 600 zu betrachten. Die maximale Nennbelastung Q_{NBmax} bezieht sich auf Leitungsanlagen mit mehreren Gasgeräten, wobei die Größe nach dem Gasgerät mit der größten Belastung definiert ist. \dot{Q}_{SB} ist als Summe der Nennbelastungen aller angeschlossenen Gasgeräte zu berücksichtigen.

Der schematische Ablauf der Arbeitsschritte zur Anwendung des Tabellenverfahren sind im Arbeitsblatt G 600 detailliert beschrieben. Die Abbildung 1 fasst den schematischen Ablauf grafisch zusammen.

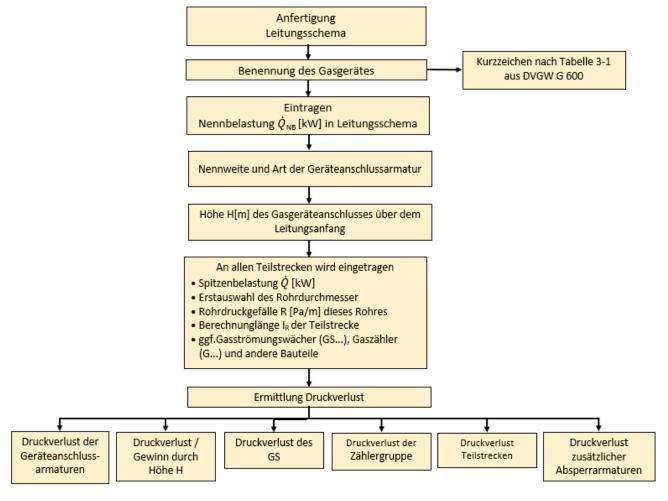


Abbildung 1 Ablaufschema zur Anwendung des Tabellenverfahrens zur Leitungsdimensionierung nach [1]

In der TRGI sind für die Auslegung nach dem Diagrammverfahren Diagramme hinterlegt, mit denen sich in Abhängigkeit der Nennbelastung und der berechneten Leitungslänge die Dimensionierung der Leitungsanlage inklusive Bauteile durchführen lässt. Für die Anwendung des Diagrammverfahrens müssen folgende Voraussetzungen erfüllt sein [1]:

- Anwendung nur bei Einzelzuleitungen
- Einsatz der Bauteile und Rohrquerschnitte wie im Diagramm entsprechend der Belastung angegeben.

Weiterhin gilt:

- Vorgabe des Gesamtdruckverlust der dimensionierten Leitungsanlage von 300 Pa, Angabe der maximalen Leitungslänge bei gegebener Nennbelastung in Diagrammen
- Auslegung der Gaszähler bis 80 % vom maximal Durchfluss Q_{max} des Gaszählers
- Auswahl der Bestandteile der Leitungsanlage durch Schnittpunkt von Nennbelastung mit berechneter Leitungslänge definiert
- Beinhaltung des GS-Abgleichs, getrennte Berücksichtigung von GS K und GS M
- Wahl des größeren Rohrquerschnitts bei Überschreitung der Grenzlinien
- Die Installation einer zusätzlichen Absperrarmatur in Eckform nach Gaszählern erfordert einen Längenzuschlag von 3 m auf die berechnete Leitungslänge
- Zusätzliche Absperrarmatur in Durchgangsform nach Gaszähler erfordert keinen Zuschlag

Die Berechnungslänge der Leitungsanlage lässt sich bestimmen durch [1]:

$$l_R = l + n * l_W \tag{3}$$

- I Leitungslänge
- n Anzahl der Bögen
- I_W Längenzuschlag für 90° Bögen nach Tabelle L.10 aus G 600

Entgegen dazu wird mit dem Tabellenverfahren, ausgehend von Angaben bzw. Schemata zur bemessenden Leitungsanlage, der Druckverlust ermittelt. Dazu stehen Tabellen für die Auswahl der Leitungsbestandteile und zur Nachrechnung der Druckverluste in Arbeitsblatt G 600 zur Verfügung. Als Grenzwert zur Auslegung der Leitungsanlage wird ein Druckverlust von 300 Pa angeben, der sich an den üblichen Werten für Ausgangsdrücke des Gas-Druckregelgerätes von 2.300 Pa und dem am Gasgerät notwendigen Fließdruck von 2.000 Pa orientiert. In den nachfolgenden Unterabschnitten werden die Berechnungsmethoden des Tabellenverfahrens näher beschrieben. Dabei werden die Bestandteile der Leitungsanlage nach dem Gas-Druckregelgerät bzw. nach der Hauptabsperreinrichtung betrachtet.

2.1.1 Leitungsanlage

Als Vorauswahl des Rohrdurchmessers einer Teilstrecke wird ein Rohrdruckgefälle je m Leitungsrohr mit R < 10 Pa/m durch das Arbeitsblatt G 600 angegeben. Als Bestimmungsgröße wird die berechnete Spitzenbelastung \dot{Q} nach Gleichung (2) verwendet. In Abhängigkeit des Rohrmaterials wird an dieser Stelle auf die Tabellen der Tafel 2 in der TRGI verwiesen. Die Berechnung der Tabellenwerte erfolgt nach den Formeln aus dem DVGW-Arbeitsblatt G 617. Der Rohrdruckverlust Δp_R berechnet sich aus dem Rohrdruckgefälle R sowie der berechneten Leitungslänge l_R nach Gleichung (3).

$$\Delta p_R = R * l_R \tag{4}$$

Für das Rohrdruckgefälle R gilt [2]:

$$R = \frac{\lambda}{d_i} * \frac{\rho}{2} * w^2 \tag{5}$$

Die mittlere Fließgeschwindigkeit w ist abhängig vom Leitungsquerschnitt und dem anliegenden Gasvolumenstrom.

$$w = \frac{\dot{V}}{\frac{\pi}{4} d_i^2} \tag{6}$$

Für den Rohrreibungsbeiwert λ werden in Abhängigkeit der Strömungsart (laminar, Übergangsbereich, turbulent) bzw. in Abhängigkeit der Reynolds-Zahl Re in der Literatur verschiedenen Berechnungswege vorgeschlagen. Die Reynolds-Zahl Re berechnet sich mit:

$$Re = \frac{w * d_i}{v} \tag{7}$$

In der G 617 wird für die Ermittlung des Rohrreibungsbeiwertes λ der Ansatz nach Zanke verwendet.

$$\lambda = \left[-0.868 * \frac{(\ln Re)^{1.2}}{Re} + 0.27 * \frac{k}{d_i} \right]^{-2}$$
 (8)

Die Rohrrauigkeit k für verschiedene Rohrtypen wird in Tabelle 2 aufgelistet.

Tabelle 2: Rohrrauigkeit für verzinktes Stahlrohr, Kupfer- und Edelstahlrohr, Mehrschichtverbundrohr

Rohrtyp	Verzinktes Stahlrohr Kupfer- und Edelstahlrohr		Mehrschichtverbundrohr
Rohrrauigkeit k [mm]	0,15	0,0015	0,007

Analog listet die Tabelle 3 in Abhängigkeit verschiedener Rohrquerschnitte die Rohrrauigkeiten für Wellrohr

auf.

Tabelle 3: Rohrrauigkeit für Wellrohr

Wellrohr Nenndurchmesser	DN 15	DN 20	DN 25	DN 32	DN 40	DN 50
Rohrrauigkeit k [mm]	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8

Zur Bestimmung der Rohrinnendurchmesser für Leitungsanlagen mit definierten Nenndurchmesser werden auf die entsprechenden Normen nach Tabelle 4 verwiesen.

Tabelle 4: Nenngrößen und deren Abmaße, Übersicht mit normativem Verweis

Rohrtyp	Verzinktes Stahlrohr	Kupferrohr	Edelstahlrohr
Norm	DIN EN 10255	DIN EN 1057	DVGW GW 541

Die G 600 gibt für die Erstauswahl des auszuwählenden Rohrdruckgefälles von ≤ 10 Pa/m abweichend ≤ 5 Pa/m für die Ausnahmen:

- Verteilungsleitung mit Steigleitungen,
- Steigleitungen in Verteilungsleitungen

an. Die kinematische Viskosität v ist eine temperaturabhängige Stoffgröße, deren Berechnung für Stoffgemische im Abschnitt 3.1.5 dieser Studie detailliert beschrieben wird.

Die Bestimmung von Druckverlusten, für in Leitungssystemen enthaltene Form- und Verbindungsstücke, berechnen sich über eine äquivalente Länge, die als Längenzuschlag auf die Leitungslänge I einer Teilstrecke addiert wird. Dabei gilt für die Berechnungslänge I_R [2]:

$$l_R = l + \Sigma l_{\ddot{a}g} \tag{9}$$

mit der äquivalenten Rohrlänge:

$$l_{\ddot{a}q} = \frac{\zeta}{\lambda} * d_i \tag{10}$$

Die Tabelle 5 stellt die ζ-Werte für bestimmte Formteile von metallenen Leitungen dar.

Tabelle 5: ζ-Werte für Formteile mit vollem Durchgang, metallene Leitungen [2]

	ζ
90° Bogen	0,6
90° Winkel	1,3
T-Stück-Abzweig	1,3
T-Stück-Durchgang	vernachlässigt
Kupplungen	vernachlässigt
Muffen	vernachlässigt
Etagenbögen	vernachlässigt
Reduzierungen	vernachlässigt
Doppelnippel	vernachlässigt

Die Tabelle L.10 der Tafel 2 in der G 600 gibt für die genannten Formteile in Abhängigkeit des Querschnitts die für das entsprechende Formteil zur berücksichtigende äquivalente Länge läg an.

Zusätzlich wird bei der Dimensionierung von Leitungsanlagen die Höhendifferenz zwischen Gas-Druckregelgerät und Geräteanschlussarmatur mit in die Berechnungen integriert. Als Druckerhöhung für den Fall, dass die Geräteanschlussarmatur über dem Gas-Druckregelgerät bzw. der HAE installiert ist. Ein zusätzlicher Druckverlust ergibt sich im umgekehrten Fall, bei einer Installation der Geräteanschlussarmatur unterhalb des Gas-Druckregelgerätes. Für die Druckdifferenz Δρ_H gilt [1]:

$$\Delta p_H = (\rho_G - \rho_L) * g * H \tag{11}$$

Mit:

- ρ_G als Dichte des Brenngases
- ρ∟ als Dichte von Luft
- g als Erdbeschleunigung 9,81 m/s
- H als Höhenunterschied

2.1.2 Hauptabsperreinrichtung

Die Hauptabsperrungen befinden sich im Eigentum des Netzbetreibers und sind demnach nicht in den Bemessungsvorschriften der G 600 enthalten.

2.1.3 Gasströmungswächter

Die Regeln zur Auswahl des Installationsortes des Gasströmungswächters GS sind dem Arbeitsblatt G 600 zu entnehmen. Die Größenauswahl des GS erfolgt nach Tabelle L.0 in der Tafel 1 nach der G 600. Bei der Auswahl des GS wird zwischen Einzelzuleitungen sowie Verbrauchs- und Verteilungsleitungen unterschieden. Für letzteres wird die Summenbelastung \dot{Q}_{SB} als Auswahlkriterium verwendet. Zu berücksichtigen ist, im Fall von mehreren an einer Leitungsanlage installierten Geräten, dass die höchste Nennbelastung eines angeschlossenen Gerätes den Auswahlbereich als Einzelgerät nicht übersteigt. Für Details zu Einsatzgrenzen von GS und die Bedingungen für den Einsatz von den Bauteiltypen GS K und GS M wird an dieser Stelle auf das DVGW Arbeitsblatt G 600 verwiesen.

Die Druckverluste für Gasströmungswächter in Abhängigkeit der Spitzenbelastung \dot{Q} nach Tabelle L.1 aus der TRGI werden nach Gleichung (12) berechnet [2].

$$\Delta p_{GS} = 50 * \left[\frac{\dot{V}}{\dot{V}_N} \right]^2 \tag{12}$$

Dabei ist \dot{V} der Gasvolumenstrom bei Spitzenbelastung \dot{Q} , sowie $\dot{V}_{\rm N}$ der Nenndurchfluss des Gasströmungswächters, der abhängig von der ausgewählten Nenngröße ist. Die G 617 verweist dabei auf die DIN 30652-1, in der angegeben wird, dass Gasströmungswächter bei Nenndurchfluss $\dot{V}_{\rm N}$ maximal 50 Pa Druckverlust aufweisen [3]. In der Tabelle 6 sind dazu die Werte aus der DIN 30652-1 mit den Auswahlwerten nach G 617 aufgelistet.

Tabelle 6: Nenndurchfluss für Gasströmungswächter GS nach DIN 30652-1 und DVGW G 617

Nennwert GS	Nenndurchfluss \dot{V}_N (Luft) nach DIN 30652-1 [m ³ /h]	Auswahlbereich Gasvolumenstrom für Leitungsanlagen mit Einzelgeräten nach DVGW G 617 [m³/h]	Auswahlbereich Gasvolumenstrom für Leitungsanlagen mit mehreren Gasgeräten nach DVGW G 617 [m³/h]
GS 2,5	2,0	bis 2,0	bis 2,5
GS 4	3,2	2,1 – 3,2	2,6 – 4
GS 6	4,8	3,3 – 4,8	4,1 – 6
GS 10	8,0	4,9 – 8,0	6,1 – 10
GS 16	12,8	8,1 – 12,8	10,1 – 16

Die DVGW G 617 gibt den Nenndurchfluss \dot{V}_N für einen Gasströmungswächter GS 4 nach Umrechnung mit den Stoffeigenschaften von Erdgas L mit 4 m³/h an.

Nach der Auswahl des Gasströmungswächters ist die Wirksamkeit des GS mit einem Abgleich zu beweisen. Abhängig vom eingesetzten Typ und Installationsbedingungen kann der Abgleich entfallen. Für den Abgleich des GS können zwei Verfahren angewendet werden:

 das vereinfachte Verfahren bei GS K, die die Überprüfung der Mindestnennweiten aus Tabelle L.0 aus G 600 beinhaltet - der direkte Abgleich, bei dem unter Berücksichtigung des Schließvolumenstroms der Druckverlust der Leitungsanlage inkl. Bestandteile bestimmt wird. Der zulässige Druckverlust bei direktem Abgleich darf den Ausgangsdruck des Gas-Druckregelgerätes (in der Regel 2.300 Pa) nicht überschreiten. In dem Fall ist die Funktion des GS bewiesen. Die Tafeln 3 und 4 in der G 600 bilden den Druckverlust bei Schließvolumenstrom ab. Für Leitungsanlagen mit Mehrschichtverbundrohren sind die Angaben der Hersteller zu berücksichtigen. Abweichend gilt dabei, dass bei einem Ausgangsdruck von 2.300 Pa der maximal zulässige Druckverlust 1.400 Pa nicht überschritten werden darf [1].

Die Voraussetzungen für das vereinfachte Verfahren bzw. Bedingungen, bei denen der direkte Abgleich als Verfahren durchgeführt werden muss, stellt die Tabelle 7 zusammenfassend dar.

Tabelle 7: Anwendungsmerkmale für Verfahren zum GS-Abgleich [1]

	Voraussetzungen für vereinfachtes Verfahren bei GS K	Anwendungspflicht für direkten Abgleich des GS
Anwendungsmerkmale	der erste GS K und der Gaszähler befinden sich in einer Teilstrecke	Einsatz von GS K in metallenen Leitungen: - Anordnung von zwei Zählern in Reihe - Berechnungslänge mit Mindestnennweite > 10 m - Bemessung des Gesamtdruckverlust der Leitungsanlage > 300 Pa
	nur ein Gaszähler im Fließweg	Metallene Leitungen mit GS M
	Gesamtdruckverlust der Leitungs- anlage < 300 Pa	Leitungsanlagen mit Mehrschichtverbundrohr und GS-T K

2.1.4 Absperreinrichtung

Für Absperreinrichtungen, z.B. Kugelhähne, wird in der TRGI, Tafel 1, Tabelle L.4 der Druckverlust für verschiedene Nenngrößen in Abhängigkeit der Spitzenbelastung \dot{Q} angegeben. Die Tabelle L.3 aus der TRGI stellt die Druckverlustwerte entsprechend für Geräteanschlussarmaturen mit thermischem Auslöser dar. Beide Typen von Absperreinrichtungen werden demzufolge nach den Bauformen "Eckform" und "Durchgangsform" unterschieden. Die Angaben in Tabelle L.4 gelten für Absperreinrichtungen ohne thermische Auslösung (TAE). Als Grundlage für die in den Tabellen der TRGI berechneten Werte für Geräteanschlussarmaturen GA sowie Absperreinrichtungen AE wird die Formel (13) verwendet [2].

$$\Delta p = d_V * \Delta p_1 * \left[\frac{\dot{V}}{\dot{V}_1}\right]^2 \tag{13}$$

Dabei sind \dot{V} der Gasvolumenstrom bei Spitzen- bzw. Nennbelastung sowie \dot{V}_1 der Mindestdurchfluss bzw. Nennvolumenstrom laut Armaturennorm DIN EN 331 für Absperreinrichtungen ohne TAE nach Tabelle 8 bzw. DIN 3586 für thermisch auslösende Absperreinrichtungen nach Tabelle 9.

Tabelle 8: Nennvolumenstrom (Mindestdurchfluss \dot{V}_1) für Absperreinrichtungen ohne TAE [4]

Nenngröße DN	Nennvolumenstrom Durchgangsform [m³/h]	Nennvolumenstrom Eckform [m³/h]
6	1	-
8	2	-
10	3	2
12	3,5	2,5
15	5	3,5

20	10	6
25	16	10
32	27	18
40	40	28
50	65	36
65	100	nicht anwendbar
80	170	nicht anwendbar
100	230	nicht anwendbar

Tabelle 9: Nennvolumenstrom (Mindestdurchfluss V_1) für Absperreinrichtungen mit thermischer Auslösung [5]

Nenngröße DN	Nennvolumenstrom Durchgangsform [m³/h]	Nennvolumenstrom Eckform [m³/h]	Druckverlust [Pa]
6	0,7	-	100
8	1,4	-	100
10	2,1	1,4	100
12	2,5	1,8	100
15	3,5	2,5	100
20	7,1	4,2	100
25	11,3	7,1	100
32	19,1	12,7	100
40	28,3	19,8	100
50	46,0	25,5	100
65	36,0	-	20
80	51,0	-	20
100	92,0	-	20
125	132,0	-	20
150	189,0	-	20

Die relative Gasdichte d_V für Erdgas L kann aus Tabelle 1 abgeleitet werden. Δp_1 ist der Druckverlust aus den Armaturennormen, der für den Mindestdurchfluss \dot{V}_1 mit 100 Pa angegeben ist [2, 4, 5].

Als Einheit für den berechneten Druckverlust laut Formel (13) wird vom Regelwerk Pa angegeben [2].

2.1.5 Gaszähler

Gaszähler werden nach den Vorgaben des Netzbetreiber bzw. des Messstellenbetreibers mittels der Summenbelastung \dot{Q}_{SB} dimensioniert. Zur Berechnung des Druckverlustes wird an Stelle der Summenbelastung \dot{Q}_{SB} die Spitzenbelastung \dot{Q} verwendet. In der Tabelle L.2 der TRGI sind Druckverluste als Werte der Zählergruppe angegeben. Neben dem Zähler gehören zur Zählergruppe nach [2]

- für Einstutzenzähler Variante 1: Anschlussstück, Zählereckabsperreinrichtung sowie ein Bogen,
- für Einstutzenzähler Variante 2: Einstutzenzählerabsperreinrichtung sowie ein Bogen,
- für Zweistutzenzähler: Zählereckabsperreinrichtung sowie drei Bögen.

Die dargestellten Druckverlustwerte sind für Zählergruppen mit Balgengaszähler der Nenngrößen G2,5 bis G65 gültig. Für Balgengaszähler größerer Nennweite als G65, oder auch Turbinenradzähler sowie Drehkolbengaszähler, verweist das DVGW Arbeitsblatt G 617 auf die Produktunterlagen der entsprechenden Hersteller.

Die Berechnung der Druckverlust von Balgengaszählers Δpz in Pa mit Maximalwerten nach [2] erfolgt nach

Formel (14):

$$\Delta p_Z = \Delta p_M + b * \left[\frac{\dot{V}}{Q_{max}} \right]^2 \tag{14}$$

Dabei gilt für b:

$$b = d_V * (\Delta p_L - 30) \tag{15}$$

Die in beiden Formeln verwendeten Nenngrößen werden durch nachfolgende Zusammenhänge nach [2] definiert:

- Δp_M als mechanischer Druckverlust, entspricht 30 Pa
- V als Gasvolumenstrom bei Spitzenbelastung Q
- \dot{Q}_{max} als Volumenstrom bei maximal zulässigen Druckverlust ΔpL nach Tabelle 10
- d_V als relative Gasdichte, für L-Gas nach Tabelle 1 mit d_V = 0,64
- Δp_{\perp} als maximal zulässiger Druckverlust des Gaszählers bei \dot{Q}_{\max} (mit Luft gemessen) nach Tabelle 10

Tabelle 10: Kenngrößen Balgengaszähler G2,5 bis G65 [2]

Nennwert Gaszähler	$\dot{m{Q}}_{\sf max}$ [m 3 /h]	Δp∟ [Pa]	b nach Formel (15) [Pa]
G2,5	4	200	109
G4	6	200	109
G6	10	200	109
G10	16	300	173
G16	20	300	173
G25	40	300	173
G40	65	400	237
G65	100	400	237

Die Formel (16) zur Berechnung des Druckverlustes der Zählergruppe nach dem DVGW-Arbeitsblatt G 617 wird für die Betrachtungen in dieser Studie hinsichtlich Wasserstoffeinfluss nicht angewendet. Die in dieser Studie beschriebene Vorgehensweise berücksichtigt die Dichte des Gasgemisches, sodass auch die Stoffwerte von Erdgas-Wasserstoffgemischen in die Ergebnisse der Druckverlustberechnung von Gaszählern mit einfließen. Mit Formel (16) und den in G 617 vordefinierten Werten für b ist dieser Einfluss nicht darstellbar.

$$\Delta p_{ZG} = 30 + b * \left[\frac{\dot{V}}{1.5 * G_N} \right]^2 \tag{16}$$

- Δpzg als Druckverlust der Zählergruppe
- b als Variable in Abhängigkeit der Zählernenngröße G_N nach [2]

2.2 Bisherige Untersuchungen zum Einfluss von Wasserstoff auf die Bestandteile der Leitungsanlage nach TRGI

Verschiedene Untersuchungen zum Thema Beständigkeit von zulässigen Materialien nach TRGI hinsichtlich Wasserstoffanteilen bis zu 100 Vol.-% im Erdgas konnten eine Eignung nachweisen [6], [7]. Bezüglich der Materialbeständigkeit wurde diese auch für Kunststoffleitungen aus PE erklärt [6]. Bei der Betrachtung von Permeation durch die nach TRGI zulässigen Leitungsmaterialien konnten keine sicherheitstechnisch kritische Erkenntnisse festgestellt werden [6]. Auch für PE-Leitungen liegen die Leckagemengen bei Permeation unterhalb der nach TRGI zulässigen Grenzwerte [6]. Für Wellrohrleitungen und Mehrschichtverbundrohre kann aufgrund nicht vorhandener Erkenntnisse, die Aussage nicht übernommen werden. Weiterhin konnten Untersuchungen nachweisen, dass die nach TRGI zulässigen Leitungen für Gas-Inneninstallationen technisch dicht sind [6],[8].

2.2.1 Leitungsanlage

Zum Bestandteil einer Leitungsanlage nach TRGI gehören Verbindungsglieder, die Formteile, wie z.B. Bögen, Reduzierung, Armaturen und Ventile miteinander verknüpfen und daraus ein Leitungssystem bilden. In Untersuchungen wurden dazu Press- sowie Glattrohrverbinder bzw. auch Dichtungen und damit die Materialien auf eine Beständigkeit gegenüber Wasserstoff geprüft [6]. Als Prüflinge wurden Verbinder von verschiedenen Herstellern und bestehend aus unterschiedlichen Materialien bzw. Größen eingesetzt. Zum Beginn der Untersuchungen wurde zur Kontrolle die Dichtheit der Prüflinge nach DIN 3387-1 im Wasserbad bei 550 kPa Druckluft untersucht. Anschließend wurde die gleiche Prüfung ebenfalls mit 100 Vol.-% Wasserstoff bei 550 kPa durchgeführt. Danach erfolgten Belastungstests. Die Prüflinge wurden tordiert sowie zehn-malig demontiert und wieder montiert. Dem folgend wurden die Dichtheitsprüfungen mit Druckluft und Wasserstoff wiederholt. Zusammenfassend lässt sich aus den Versuchsergebnissen ableiten, dass gebräuchliche Press- und Glattrohrverbinder, unabhängig ob metallisch oder weichdichtend, auch nach einer mechanischen Beanspruchung unter Wasserstoffeinfluss technisch dicht sind.

Zusätzlich wurden Alterungsversuche durchgeführt, um Langzeitauswirkungen von Wasserstoff auf die Verbinder und Dichtungsmaterialien zu erkennen. Nach sechsmonatiger Beaufschlagung der Verbinder mit Wasserstoff wurden die Dichtheitsversuche nach DIN 3387-1 erneut durchgeführt. Dabei waren die weichdichtenden Glattrohrverbinder mit FKM- und FPM-Dichtungen versehen. Im Ergebnis konnte ausgehend von den Dichtheitsversuchen kein Altern der Materialien festgestellt werden [6].

Weiterhin wurden für vier verschiedene Verbinder (zwei Press- und zwei Glattrohrverbinder, alle weichdichtend) Permeationsversuche mit Wasserstoff durchgeführt [6]. Aus den Ergebnissen sollten insbesondere Rückschlüsse auf die Anwendung gängiger Dichtungsmaterialien unter Wasserstoffeinfluss gezogen werden können. Um Dichtheit der Prüflinge im Ausgangszustand zu kontrollieren, wurden zunächst Permeationstests mit Wasserstoff und Methan durchgeführt. Das permeierte Gas wurde über 24 Stunden hinweg in Messzellen unter Stickstoffatmosphäre bei einem Innendruck von 50 kPa aufgefangen und anschließend gaschromatographisch analysiert. Die Verbindungsstücke standen unter einem Innendruck von 550 kPa. Nach den Eingangsversuchen wurden die Prüflinge einer mechanischen Beanspruchung ausgesetzt. Zur Erfassung von Langzeitauswirkungen bzw. zur Erkennung von Alterungserscheinungen der Verbinder bzw. Materialien wurden die Prüflinge sechs Monate lang mit 100 Vol.-% Wasserstoff beaufschlagt. Nach der Alterung wurden die Permeationstests mit Wasserstoff wiederholt.

Bei den Kontrollprüfungen wurde an keinem Prüfling gaschromatographisch gemessenes Methan oder Wasserstoff dokumentiert. Alle Verbindungen erwiesen sich als dicht. Das gleiche Ergebnis ergab die Messung der mechanisch beanspruchten Prüflinge. Nur ein Prüfling wies eine höhere Permeationsrate auf [6]. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass bei den getesteten Glattrohrverbindern selbst nach 6-monatiger Konditionierung mit Wasserstoff keine Permeation beobachtet werden konnte.

Bezüglich der Leitungsdimensionierung stellte eine Untersuchung dar, dass nach TRGI unter Berücksichtigung des Betriebsheizwertes H_{I,B} für Brennstoffe verschieden von L-Gas, welches als Grundlage für die Tabellen und Diagramme aus TRGI verwendet wird, das Tabellen- sowie das Diagrammverfahren unter der Anwendung eines Kalkulationsfaktors f(x) (dimensionslos) anzuwenden sind [6].

$$f(x) = \frac{H_{I,B}(L - Gas)}{H_{I,B}(x)} \tag{17}$$

In der Formel (17) wird H_{I,B}(L-Gas) als Brennwert des in Tabelle 1 definierten L-Gases verwendet. H_{I,B}(x) ist der Betriebsheizwert des Gases, für das die Leitung kalkuliert werden soll. Tabelle 11 stellt dazu ausgewählte Gase und die dazugehörigen Kalkulationsfaktoren gegenüber. Daraus ergibt sich, dass der Kalkulationsfaktor für H-Gas mit 23 Vol.-% Wasserstoff dem Kalkulationsfaktor von L-Gas entspricht. Für diesen Fall wären keine Anpassungen hinsichtlich der Leitungsdimensionierung erforderlich. Für eine Beimischung von 30 Vol.-% Wasserstoff in Erdgas H-Gas beträgt der Berechnungsfaktor f(x) 1,06. In der Praxis wäre der Unterschied zur referenzierten Dimensionierung von L-Gas vernachlässigbar [6].

Tabelle 11: Kalkulationsfaktoren für ausgewählte Brenngase / Gaszusammensetzungen [6]

Gasart	H _{I,B} [kWh/m³]	f(x)
L-Gas	8,6	1,00
LL-Gas	7,5	1,15
H-Gas	10,3	0,83
10 Vol.% H ₂ + H-Gas	9,8	0,88
23 Vol.% H ₂ + H-Gas	8,6	1,00
30 Vol.% H ₂ + H-Gas	8,1	1,06
100 Vol.% H ₂	3,0	2,87

Bei Auslegungen mit dem Tabellenverfahren ist aufgrund der Änderungen in der Gaszusammensetzung das Rohrdruckgefälle mitzubeachten. Es wird bei steigendem Wasserstoffgehalt durch eine steigende kinematische Viskosität, jedoch auch durch eine sinkende Reynoldszahl beeinflusst. Da Wasserstoff eine geringere Dichte als L- bzw. H-Gas hat, verringert sich auch die Dichte des Gasgemisches und unter der Annahme einer konstanten Verbrennungsleistung erhöht sich die durchschnittliche Strömungsgeschwindigkeit. Als Fazit stellt die Untersuchung hervor, dass ein mit dem Tabellenverfahren auf L-Gas ausgelegtes Gasleitungssystem für ein 23 Vol.-% Wasserstoff-H-Erdgas-Gemisch ausreichend ausgelegt ist [6]. Es wird weiterhin in der Untersuchung angemerkt, dass der nach dem DVGW Arbeitsblatt G 600 für eine Leitungsanlage maximale Gesamtdruckverlust von 300 Pa als Auslegungsgrenze von Wasserstoffanteilen im Erdgas nicht beeinflusst wird und demnach bei der Dimensionierung von Leitungsanlagen (neu oder Bestand) mit wasserstoffhaltigen Brenngasen weiterhin Gültigkeit besitzt [6]. Der Hintergrund dieser Feststellung sind die in Abschnitt 2.1 beschrieben Ausgangsdrücke am Gas-Druckregelgerät sowie die erforderlichen Fließdrücke an der Geräteanschlussarmatur.

2.2.2 Gasströmungswächter

Als aktive Sicherheitseinrichtung überwachen Gasströmungswächter den Gasdurchfluss, der beim Überschreiten des Schließvolumenstrom mechanisch gesperrt wird. Aufgrund eines niedrigeren Heizwertes von Wasserstoff gegenüber Erdgas bzw. Methan führt ein steigender Wasserstoffgehalt in Erdgasen zu einem sinkenden Heizwert des Gasgemisches. Für das Erreichen der gleichen Verbrennungsleistung muss infolge einer Wasserstoffbeimischung die Brennstoffzufuhr erhöht werden. Dazu wurde in einer Untersuchung die Funktionsweise von Gasströmungswächtern unter Wasserstoffeinfluss näher betrachtet [6]. Das Aufzeigen der Auswirkungen veränderter physikalischer Eigenschaften des Betriebsmediums sowie des Einflusses einer erhöhten Brennstoffzufuhr als Anpassung auf eine Wasserstoffbeimischung auf das Schließverhalten, war das

Ziel dieser Versuche. Als Prüflinge wurden verschiedene Typen Gasströmungswächter von unterschiedlichen Herstellern verwendet. Zunächst wurde zu Beginn mit dem Medium Luft die Funktion der Prüflinge gemäß DVGW G5305-2 sichergestellt. Die Kontrolle wurde mit Methan als Betriebsmedium wiederholt. Die Versuche mit Wasserstoff erfolgten meist mit einem 10 zu 90 Vol.-% Wasserstoff-Methan-Gemisch. Um ggf. Trends aufzuzeigen, wurde auch eine Mischung von ca. 30 Vol.-% Wasserstoff verwendet. Mit steigendem Wasserstoffgehalt bis zu 30 Vol.-% und trotz der damit verbundenen Erhöhung der Brennstoffzufuhr zur Aufrechterhaltung einer konstanten Verbrennungsleistung ist die Differenz von Schließdurchfluss zum Betriebsvolumen so groß, dass die Funktion des Gasströmungswächters gewährleistet werden kann. Somit erfolgt keine Sperrung der Gaszufuhr durch den Gasströmungswächter aufgrund veränderter physikalischer Eigenschaften sowie erhöhten Brennstoffbedarfs in Folge einer Wasserstoffbeimischung ins Erdgas. Die Untersuchung gibt als Fazit an, dass die Dimensionierung nach den aktuellen technischen Regeln bis 20 Vol.-% Wasserstoff im Erdgas beibehalten werden kann [6].

2.2.3 Absperreinrichtungen

Absperreinrichtungen, wie Absperrhähne, Sicherheitsabsperrventile und Magnetventile wurden für industrielle Anwendungen im Vorhaben "Einfluss von Wasserstoffanteilen im Erdgas auf Bauteile der DIN EN 746-2" untersucht [8]. Die Funktions- und Dichtheitsprüfungen wurden mit 100 Vol.-% Wasserstoff durchgeführt. Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigten, dass die Bauteile auch nach wiederholenden Prüfungen nach bis zu 3 Monaten keine erhöhten Leckagen aufwiesen. Auch die korrekte Funktion der untersuchten Komponenten war gegeben. Funktionsprüfungen wurden dabei auch nach einer einwöchigen Konditionierung mit Wasserstoff sowie nach Abschluss der 6-monatigen Alterungsversuche durchgeführt. Alle Überprüfungen zeigten die gleichen Resultate der ersten Funktionsüberprüfung. Im Anschluss der Versuche wurden die geprüften Bauteile nach Anleitung demontiert, sodass die Dichtungswerkstoffe und Membranen auf optische Mängel nach Wasserstoffkonditionierung untersucht werden konnten. Es wurden dabei keine Mängel oder Erscheinungen von wasserstoffinduzierter Degradation festgestellt.

2.2.4 Gaszähler

Verschiedene Studien haben den Einfluss von Wasserstoff-Erdgasgemischen auf Gaszähler untersucht, deren Ergebnisse im Folgenden zusammengefasst werden sollen [6, 9].

In [6] wurden Wasserstoffversuche an neun Gaszähler dreier verschiedener Typen (Balgengaszähler, Ultraschallgaszähler, thermische Gaszähler) in einer Prüfstation durchgeführt. Die Gaszähler waren dabei in Reihe geschaltet und wurden über einem Ventilator mit verschiedenen Medien beaufschlagt. Nach einer einmonatigen Exposition mit reinem Wasserstoff wurden Funktionstests durchgeführt, zunächst als Vergleich mit Luft bzw. Stickstoff. Die Tests zeigten keinen negativen Einfluss auf die Funktion der Gaszähler durch die Beaufschlagung mit Wasserstoff. Beispielhaft zeigt die Abbildung 2 die Funktionstests für 3 Gaszähler bei 3 Messdurchläufen mit Luft / Stickstoff vor und nach der Exposition mit Wasserstoff.

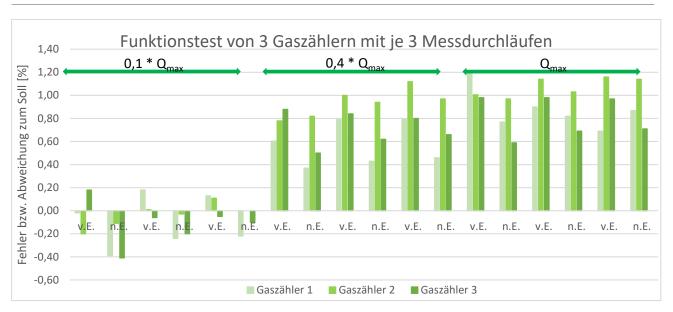


Abbildung 2 Überprüfung der Funktion für 3 Gaszähler, vor (v.E.) und nach der Exposition (n.E.) mit Wasserstoff [6]

Die in der DVGW-Forschungsstelle durchgeführten Prüfungen an Gaszählern ergaben unter beiden Bedingungen keine Funktionsänderungen in Bezug auf Wiederholbarkeit bzw. Messunsicherheit. Beim Einsatz von Wasserstoff als Medium reagierten die Gaszähler mit großen Messungenauigkeiten jedoch völlig gegensätzlich. Ultraschall- und thermische Gaszähler waren von den Messungenauigkeiten insbesondere betroffen. Darüber hinaus konnte für Ultraschallgaszähler festgestellt werden, dass bei einem Wasserstoffgehalt von 60 Vol.-% die Messwertanzeige nicht funktionsfähig war. Anzumerken ist, dass die Eichgültigkeit der Gaszähler mit der Beimischung von Wasserstoffanteilen nicht mehr gegeben und auch eine Auslegung der untersuchten Gaszähler auf die bei der Untersuchung verwendeten Wasserstoffgehälter nicht vorhanden war.

Mit dem Hintergrund, dass bei Gaszählern elektrische Bauteile vom Gasstrom erfasst werden und der zündfähige Bereich bei Erdgas-Wasserstoff-Luft-Gemischen größer ist als bei reinen Erdgas-Luft-Gemischen, wurden Zündversuche nach DIN EN 13611:2015 mit zündfähigen Gemischen aus Propan-Luft- und Propan-Wasserstoff-Luft-Gemischen durchgeführt. Die Prüfungen erfolgten nach der Exposition mit Wasserstoff und mit einer Beimischung von 10 Vol.-% sowie 30 Vol.-% Wasserstoff. Im Ergebnis konnte festgestellt werden, dass keiner der getesteten Gaszähler eine Zündung verursachte [6].

Mit den Untersuchungen von [9] sollte das Verhalten von Balgengaszählern unter Wasserstoff hinsichtlich der sich vom Erdgas unterscheidenden Stoffeigenschaften genauer betrachtet werden. Dabei stellte sich heraus, dass die mechanischen Temperaturkompensation einen vergleichsweise großen Einfluss auf die Zählweise von Balgengaszähler besitzt. Dieser Einfluss kann als weitreichender eingeschätzt werden als der Einfluss der Gaszusammensetzung und der damit einhergehenden Änderungen der stofflichen Eigenschaften des Brenngasgemisches. Die Beimischung von Wasserstoff ins Erdgas erfolgte bis zu einem Anteil von 40 Vol.% Wasserstoff. Weiterhin wurde vermutet, dass die Abweichungen der Messwerte zu den Referenzwerten mit Leckagen durch Spalte der Balgengaszähler zustande kamen. Die Referenzwerte wurden indes mit Trommelgaszählern unter dem Medium Luft gemessen. Schlussgefolgert wird diese Vermutung aus der Tatsache, dass die Abweichung der Messwerte zum Referenzwert mit zunehmenden Volumenstrom abnimmt. Darüber hinaus liegt die Mehrzahl der Messergebnisse mit Balgengaszählern unterhalb der Referenzwerte. In der Fachliteratur sind unterstützende Argumente zu dieser These zu finden [10]. In den Versuchen von [9] wurden Balgengaszähler der Größe G4 dargestellt.

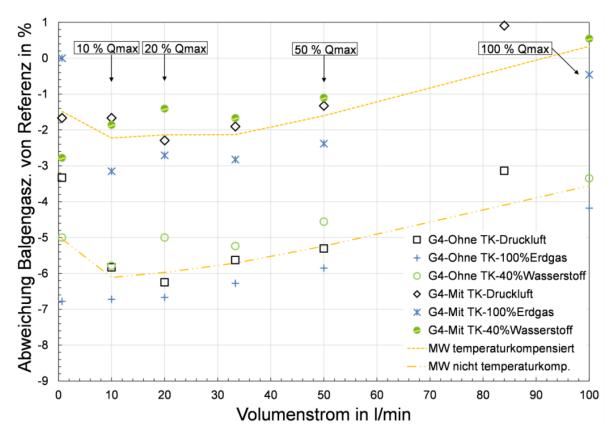


Abbildung 3 Einfluss der Temperaturkompensation und der Gaszusammensetzung auf die Zählgenauigkeit von Gaszählern, Balgengaszähler G4 [9]

Die dargestellten Ergebnisse verdeutlichen, dass Gaszähler mit Temperaturkompensation (TK) deutlich weniger vom Referenzwert abweichen. Unter der Berücksichtigung weiterer Störgrößen, damit sind z.B. die beschriebenen Leckagen an Balgengaszählern gemeint, kann für die geprüften Balgengaszähler für ein Gasgemisch mit 40 Vol.-% Wasserstoff in Erdgas eine Abweichung von weniger als 1 % zum Referenzwert als Fazit angeführt werden.

3 Dimensionierung der Leitungsanlage nach TRGI G 600 für volatile Wasserstoffanteile bis 100 Vol.-% Wasserstoff

Mit dem DVGW Merkblatt G 655 wird bereits ein Leitfaden für Projekte mit Erdgas-Wasserstoffgemischen von 10 Vol.-% bis 20 Vol.-% gegeben. Darin wird angemerkt, dass sich die "chemischen und physikalischen Eigenschaften von wasserstoffreichen Brenngasen bis 20 Vol.-% H₂" in Abhängigkeit der Gaszusammensetzung von den Eigenschaften von Erdgas nach [11] unterscheiden können. Besonders relevant ist demnach die relative Dichte, die je nach Wasserstoffgehalt nicht mehr in den nach [11] definierten Grenzen liegt. Für diese Fälle werden "Einzelfallprüfungen erforderlich" [12]. Weiterhin wird auf das DVGW-Forschungsvorhaben G 201824 Roadmap Gas 2050, Teilprojekt 3 [13] verwiesen, in dem u.a. die Eignung von Bauteilen der Leitungsanlage für Wasserstoff untersucht wurde. Zusätzlich wird ein Zertifizierungsprogramm durch die DVGW Cert GmbH entwickelt, das zukünftig u.a. Verwendbarkeitsnachweise für bestimmte Bauteile für den Betrieb mit Wasserstoff ausstellen kann. Hinsichtlich der Dimensionierung der Leitungsanlage für Wasserstoff-Erdgasgemische bis 20 Vol.-% Wasserstoff wird die Aussage entsprechend der aus Abschnitt 2.2.1 etwas konservativer formuliert. Bei Auslegung der Leitungsanlage sowie des Gasströmungswächters nach den in Abschnitt 2.1 beschriebenen Verfahren nach TRGI auf Grundlage eines Heizwertes von 8,6 kWh/m³ kann "von einer ausreichenden Toleranz auch bei Betrieb mit wasserstoffreichem Brenngas bis 20 Vol.-% H2" ausgegangen werden [12]. Bei einer Dimensionierung der Leitungsanlage für Brenngase mit höheren Heizwerten (H-Gas, 10 kWh/m³) analog den Ausführungen in Abschnitt 2 und 2.2.1 kann die Aussage nicht übernommen werden, sodass eine Überprüfung der Dimensionierung und "ggf. Anpassung der Leitungsausführung erforderlich" ist [12]. Für die Dimensionierung einer Leitungsanlage und Bestandteile wie Gasströmungswächter für eine Anwendung mit 100 Vol.-% Wasserstoff als Brenngas sowie Leitungsdrücken bis 100 hPa wurden Tafeln analog dem Arbeitsblatt G 600 erstellt [12].

Wasserstoffbeimischungen, die zwischen 20 Vol.-% und 100 Vol.% liegen werden in den genannten Arbeitsund Merkblättern nicht behandelt, sodass diese Bereiche hinsichtlich Leitungsdimensionierung näher betrachtet werden sollten. Die Berechnungsmethoden, die im Abschnitt 2 für die Leitungsdimensionierung und Auslegung von Bauteilen der Leitungsanlage beschrieben wurden, werden in den nachfolgenden Abschnitten für Wasserstoff-Erdgasgemische zwischen 20 Vol.% und 100 Vol.% Wasserstoff untersucht.

3.1 Vorgehensweise und Berechnungsgrundlagen

Um den Einfluss verschiedener Wasserstoffkonzentration in Erdgas rechnerisch darzustellen, werden mathematische Beziehungen benötigt, die die Stoffeigenschaften und deren Änderungen bei verschiedenen Gasgemischen wiedergeben. Als Grundlage für diese Betrachtungen wurden drei kalorisch verschiedene Brenngase betrachtet, deren Gaszusammensetzung in Tabelle 12 veranschaulicht wird.

Tabelle 12: Gaszusammensetzung der untersuchten Brenngase, Angaben in mol-% [14]

Bestandteil / Gasart	Russland Erdgas H [mol-%]	Nordsee Erdgas H [mol-%]	Holland Erdgas L [mol-%]
Methan CH ₄	96,96	88,71	83,64
Stickstoff N ₂	0,86	0,82	10,21
Kohlenstoffdioxid CO ₂	0,18	1,94	1,68
Ethan C ₂ H ₆	1,37	6,93	3,56
Propan C ₃ H ₈	0,45	1,25	0,61

Butane C ₄ H ₁₀	0,15	0,28	0,19
Pentane C ₅ H ₁₂	0,02	0,05	0,04
Hexane und höhere			
Kohlenwasserstoffe C ₆₊	0,01	0,02	0,07

Die Brenngase wurden aus nachfolgenden Gründen für weitere Betrachtungen ausgesucht. L-Gas, weil gerade die westlichen Bundesländer über Jahrzehnte mit L-Gas beliefert wurden und die Leitungen dementsprechend auf L-Gas dimensioniert sind. Durch die Einstellung der vollumfänglichen L-Gasbelieferung bis 2030 und den Ersatz durch Erdgas-H, erscheint diese Betrachtung in diesem Kontext relevant zu sein. Erdgas H der Sorte Russland ist demgegenüber eine auf dem deutschen Markt relevante Erdgas-Spezifikation und zeigt aufgrund seines hohen Methananteils wichtige Erkenntnisse hinsichtlich der Stoffeigenschaften bei Zunahme von Wasserstoffanteilen, speziell bezüglich der relativen Dichte. Erdgas H der Sorte Nordsee ist als alternative Spezifikation mit einem deutlich geringeren Methangehalt und dafür höheren Anteil von höherkalorischen Gasen im Hinblick auf die Stoffeigenschaften zusätzlich gewählt wurden. Die wichtigsten Stoffeigenschaften der betrachteten Erdgase fasst die Tabelle 13 zusammen.

Tabelle 13: Stoffeigenschaften der untersuchten Brenngase [14]

Stoffeigenschaft / Gasart	Russland Erdgas H	Nordsee Erdgas H	Holland Erdgas L
Brennwert [kWh/m³]	11,2	11,6	10,2
Heizwert [kWh/m³]			
(eigene Berechnungen)	10,1	10,5	9,2
Normdichte [kg/m³]	0,74	0,81	0,83
Wobbe-Index [kWh/m³]	14,8	14,7	12,8

Für die Berechnung der Stoffeigenschaften von Brenngasgemischen werden u.a. Formeln und Stoffwerte aus DIN EN ISO 6976 verwendet, die nachfolgend vorgestellt werden [15]. Als Berechnungsgrundlage dienen die Stoffmengenanteile der Gaszusammensetzungen.

3.1.1 Bestimmung des Realgasfaktors

Der Realgasfaktor Z wird für die Überführung von Stoffwerten aus der Betrachtung eines idealen Gases zu einem realen Gas verwendet, um die Abweichung von Realgaszustand zum Idealgaszustand zu berücksichtigen [15].

$$Z(t_2, p_2) = 1 - \frac{p_2}{p_0} \times \left[\sum_{j=1}^{N} x_j * s_j(t_2, p_0) \right]^2$$
(18)

Dabei gilt:

- t₂, p₂ als Referenzbedingungen, bei denen das zu verbrennende Brennstoffvolumen bestimmt wird
- p₀ als Basiswert des Druckes mit p₀ = 101,325 kPa
- zur Vereinfachung der Berechnung wird angenommen, dass p₂ = p₀ = 101,325 kPa
- xi als Stoffmengenanteil
- s_i(t₂,p₀) als Summenfaktor nach den Tabellen in [15]

3.1.2 Bestimmung des volumenbezogenen Brenn- bzw. Heizwertes

Der volumenbezogene Brennwert (Hv)G unter Realgasbedingungen berechnet sich nach [15] durch:

$$(H_V)_G(t_1; t_2, p_2) = \frac{(H_c)_{G,O}(t_1)}{V}$$
(19)

mit dem molaren Idealgas-Brennwert des Gemisches (Hc)G,O(t1)

$$(H_c)_{G,O}(t_1) = \sum_{j=1}^{N} x_j * [(H_c)_{G,O}]_j(t_1)$$
(20)

wobei

- [(Hc)G,O)]_j(t₁) als molarer Idealgas-Brennwert der Komponente j nach [15]
- x_i als Stoffmengenanteil der Komponente
- V als das reale molare Volumen des Gemisches

definiert sind. Die Referenzbedingung t₁ stellt die Bedingungen bei der Verbrennung dar. Für die Berechnungen wurden:

- die Referenztemperatur t₁ = 25 °C
- die Referenztemperatur t₂ = 0 °C

gewählt.

Das reale molare Volumen des Gemisches V berechnet sich mit:

$$V = Z(t_2, p_2) * R * \frac{T_2}{p_2}$$
 (21)

sowie

- R= 8,31451 J/(mol*K) als Gaskonstante.

Analog berechnet sich der volumenbezogene Heizwert für das reale Gasgemisch (Hv)N:

$$(H_V)_N(t_1, t_2, p_2) = \frac{(H_C)_{N,O}(t_1)}{V}$$
(22)

Dabei bestimmt sich (Hc)N,O(t1), als der molare Heizwert des idealen Gasgemisches aus:

$$(H_C)_{N,O}(t_1) = (H_C)_{G,O}(t_1) - \sum_{j=1}^{N} x_j * \frac{b_j}{2} * L_O(t_1)$$
(23)

mit

- bi als Anzahl der vorhanden Wasserstoffatome in den Molekülen der Komponente i nach [15]
- L₀(t₁) als Standard-Enthalpie einer Wasserverdampfung bei der Temperatur t₁ nach [15].

3.1.3 Bestimmung der relativen Dichte und Dichte des Gasgemisches

Die relative Dichte d_V des realen Gasgemisches wird nachfolgend für die Bestimmung des Wobbe-Wertes benötigt. Die Dichte des realen Gasgemisches ρ ist Grundlage für die Berechnung bestimmter Stoffeigenschaften sowie für Faktoren, mit den sich der Leitungsdruckverlust nach Abschnitt 2.1 berechnen lässt.

Zunächst erfolgt die Bestimmung der relativen Dichte dy des realen Gasgemisches nach [15]

$$d_V = \frac{G_0 Z_{Luft}(t_2, p_2)}{Z(t_2, p_2)}$$
 (24)

mit Go definiert als relative Dichte des Idealgasgemisches, wobei gilt:

$$G_O = \frac{M}{M_{Luft}} \tag{25}$$

Die molare Masse des Gasgemisches M berechnet sich aus den molaren Massen der Brenngasbestandteile Mi mit:

$$M = \sum_{i=1}^{N} x_j M_j \tag{26}$$

Die molare Masse von trockener Luft M_{Luft} mit entsprechender Referenzzusammensetzung wird in [15] mit $M_{Luft} = 28,96546$ kg/kmol angegeben. Mit den beschrieben Referenzbedingungen $t_2 = 0$ °C und $p_2 = 101,325$ kPa lässt sich für den Realgasfaktor trockener Luft $Z_{Luft} = 0,999419$ in [15] ermitteln.

Die Realgasdichte ρ bestimmt sich aus [15] durch:

$$\rho(t_2, p_2) = \frac{M * p_2}{R * T_2 * Z(t_2, p_2)} \tag{27}$$

3.1.4 Bestimmung des Wobbe-Index

Der Wobbe-Index W_G, der als definierte Größe die Ersetzbarkeit eines Brenngases mit einem anderen beschreibt, sodass sich bei gleichem Wobbe-Index von verschiedenen Brenngasen eine ähnliche Belastung am Brenner vorfinden lässt. Der Wobbe-Index W_G für das reale Gas berechnet sich nach [14] aus:

$$W_G = \frac{(H_V)_G(t_1; t_2, p_2)}{\sqrt{d_V}} \tag{28}$$

3.1.5 Bestimmung der dynamischen Viskosität

In dieser Untersuchung wird für die Bestimmung der dynamischen Viskosität η_{Gem} für Gasgemische die Methode von Wilke angewendet [16]:

$$\eta_{Gem} = \sum_{i=1}^{N} \eta_i * \frac{1}{\left[1 + \sum_{\substack{j=1 \ j \neq i}}^{N} F_{ij} * \frac{x_j}{x_i}\right]}$$
(29)

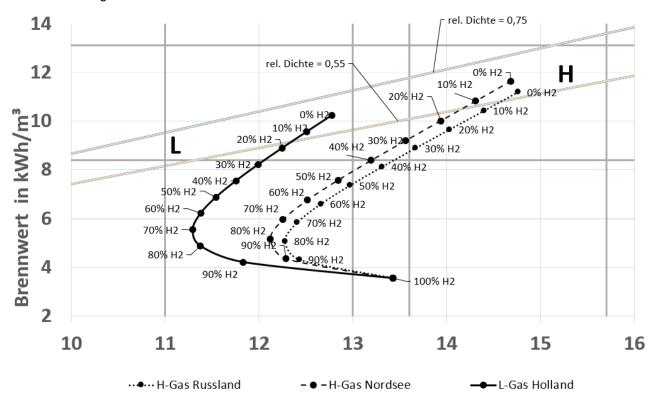
Dabei ist η_i die dynamische Viskosität der Komponente. Der Faktor F_{ij} bestimmt sich durch:

$$F_{ij} = \frac{\left[1 + \sqrt{\frac{\eta_i}{\eta_j}} * \sqrt[4]{\frac{M_i}{M_i}}\right]^2}{\sqrt{8 * \left(1 + \frac{M_i}{M_j}\right)}}$$
(30)

Die dynamischen Viskositäten der Erdgaskomponenten $\eta_i(t_2)$ stammen aus den Stoffwertetabellen des VDI-Wärmeatlas [17].

3.2 Ergebnisdarstellung

Zum Vergleich und zur Einordnung verschiedener Brenngase wird üblicherweise der Wobbe-Index herangezogen. Die Abbildung 4 stellt die Entwicklung des Wobbe-Index für verschiedene Wasserstoffanteile für die Erdgase aus Tabelle 12 dar. Dabei wird sichtbar, dass für steigende Wasserstoffanteile, beginnend bei reinem Erdgas, der Wobbe-Index ein Minimum $W_{G,min}(H_2)$ erreicht und anschließend mit weiter steigendem Wasserstoffgehalt sich erhöht. Die untere Grenze für die relative Dichte $d_V = 0,55$ wird von Erdgas H der Sorte Russland bereits bei ca. 5 mol-% Wasserstoff unterschritten. Für die beiden anderen Sorten, L-Gas Holland sowie H-Gas Nordsee geschieht das zwischen 10 mol-% und 20 mol-% Wasserstoff.



Wobbe-Index in kWh/m³

Abbildung 4 Brennwert in Abhängigkeit vom Wobbe-Index für verschiedener Wasserstoffanteils in unterschiedlichen Erdgasen

3.2.1 Leitungsanlage

Mit den in Abschnitt 2.1.1 erläuterten Berechnungen zum Rohrdruckgefälle in Leitungsanlagen und den in Abschnitt 3.1 vorgestellten Verfahren zur Bestimmung der Stoffeigenschaften von Gasgemischen wurde das Rohrdruckgefälle für die Erdgase nach Tabelle 12 mit Wasserstoffanteilen von 0 bis 100 mol-% berechnet. Zusätzlich wurden die in Tabelle 14 aufgelisteten Vorgaben zur Leitungsanlage festgelegt.

Tabelle 14: Berechnungsvorgaben Leitungsanlage

	Annahmen zur Leitungsanlage
Belastung Gasgerät [kW]	30
Nennweite Rohr	DN 20
Materialauswahl	Unlegiertes Stahlrohr, mittlere Reihe,
Rohrauigkeit k [mm]	0,15
Art des Leitungssystem	Einzelzuleitung

Daraus resultierend ergeben sich die in Abbildung 5 dargestellten Rohrdruckgefälle sowie das Verhalten der Strömungsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit des vorhanden Wasserstoffgehaltes für die betrachteten Erdgase. Das Gasverbrauchsgerät wird dabei unabhängig von der Gaszusammensetzung bei einer konstanten Belastung von 30 kW betrachtet.

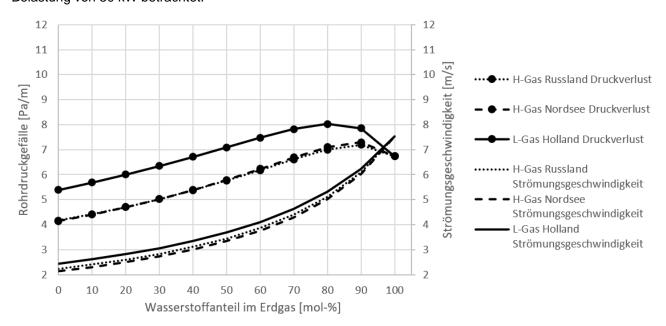


Abbildung 5 Rohrdruckgefälle und Strömungsgeschwindigkeit für verschiedene Erdgase in Abhängigkeit des Wasserstoffanteils

Mit steigendem Wasserstoffanteil und damit resultierend sinkenden Heizwert des Gasgemisches muss der Volumenstrom erhöht werden, um eine konstante Belastung am Gasgerät zu gewährleiten. Mit höherem Volumenstrom steigt demnach auch die Strömungsgeschwindigkeit im Rohrsystem bei gleichbleibendem Querschnitt. Im Vergleich dazu, verhält sich der dargestellte Verlauf des Rohrdruckgefälles verschieden von dem der Strömungsgeschwindigkeit. Je nach Gasart entstehen zwischen 80 mol-% und 90 mol-% Wasserstoff Maxima für den Druckverlust pro laufenden Meter Leitungsstrecke. Ausschlagegeben ist die stärkere Reduzierung der berechneten Dichten der Gasgemische nach Abbildung 6, in der zusätzlich der Verlauf der Druckverlustbeiwerte dargestellt sind. Auch wenn der Zusammenhang zwischen Rohrdruckgefälle und Strömungsgeschwindigkeit quadratisch zu beschreiben ist, erfolgt eine Reduktion der Dichte auf ca. 10 % des Ausgangswert unter reinem Erdgas.

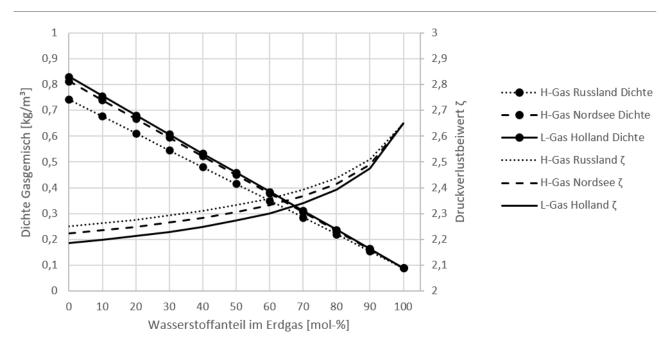


Abbildung 6 Gasdichte und Druckverlustbeiwert ζ für verschiedene Erdgase in Abhängigkeit des Wasserstoffanteils

Das Verhalten des Drucksprunges bei einem Höhenunterschied zwischen Geräteanschlussarmatur und Gas-Druckregelgerät für unterschiedliche Gaszusammensetzung stell die Abbildung 7 grafisch dar. Es lässt sich ableiten, dass mit steigendem Wasserstoffanteil im Erdgas-Wasserstoffgemisch die Druckdifferenz aufgrund einer fallenden Dichte zunimmt. Das Vorzeichen gibt an, ob die Druckdifferenz als Druckgewinn (negatives Vorzeichen) oder als Druckverlust (positives Vorzeichen) in der Dimensionierung des Leitungssystems zu berücksichtigen ist.

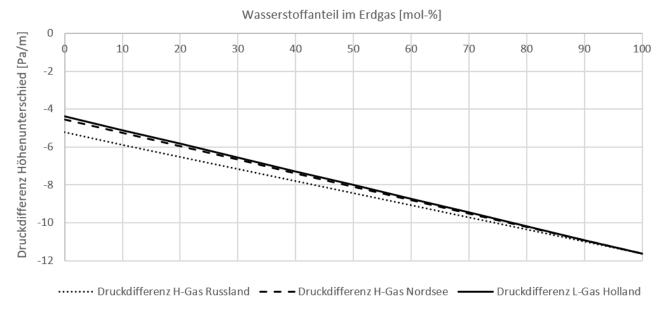


Abbildung 7 Druckdifferenz aufgrund des Höhenunterschieds zwischen Geräteanschlussarmatur und Gas-Druckregelgerät

Untersuchungen zu Rohrbögen haben ergeben, dass der Druckverlustbeiwert für Rohrbögen vom Verhältnis des Umlenkradius zum Rohrinnendurchmesser sowie von der Reynoldszahl nach Abbildung 8 abhängig ist [17].

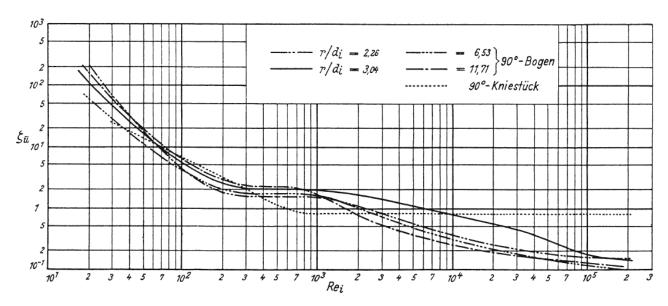


Abbildung 8 Druckverlustbeiwerte in Abhängigkeit der Reynoldszahl Re für verschieden Umlenkungsradien von glatten Rohrbögen [17]

Aus den Berechnungen zum Rohrdruckgefälle R geht hervor, dass sich für die vorgegeben Leitungsanlage nach Tabelle 14 die Reynoldszahl mit steigenden Wasserstoffgehalt von Re ~ 4.000 auf Re ~ 1800 reduziert. Damit würde für die in Abbildung 8 dargestellten glatten Rohrbögen für ein Verhältnis von $r/d_i = 2,26$ der ζ -Wert von ~ 0,7 auf ~1,2 steigen. Dies soll verdeutlichen, dass für Rohrbögen die Annahme eines konstanten ζ -Wertes für variable Wasserstoffanteile in Erdgas ungenaue Ergebnisse liefert. Daraus schlussfolgernd ist für detailliertere Betrachtungen hinsichtlich Druckverluste bei Formteilen mit veränderlichen Gaszusammensetzungen eine genauere Untersuchung der ζ -Werte für Rohrbögen bzw. auch für Abzweige in Folgestudien erforderlich.

3.2.2 Gasströmungswächter

In Abschnitt 2.1.3 wurde beschrieben, wie die Druckverlustberechnungen für Gasströmungswächter für von Erdgas L verschiedene Brenngas nach G 617 durchgeführt werden. Näher betrachtet werden im Folgenden 100 mol-% Wasserstoff, die Erdgase H-Gas Russland und L-Gas Holland sowie deren Wasserstoffgemische mit 20 mol-% und 80 mol-% bzw. 90 mol-% Wasserstoff. Die Abbildung 9 stellt beispielhaft die Druckverluste in Abhängigkeit der Spitzenleistung \dot{Q} für einen Gasströmungswächter GS 4 sowie verschiedene Gaszusammensetzungen dar.

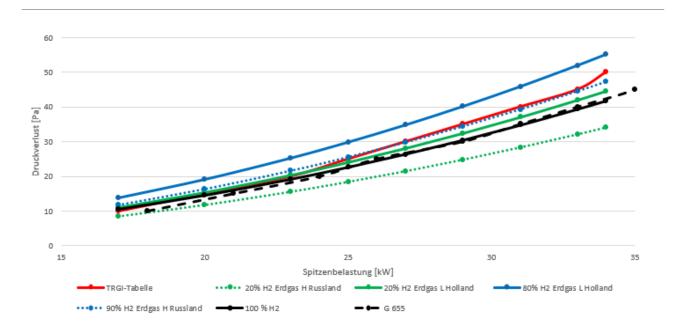


Abbildung 9 Druckverlust von Gasströmungswächtern über Spitzenbelastung für GS 4 - verschiedene Wasserstoffbeimischungen für L-Gas Holland, H-Gas Russland

Die für die Berechnung verwendeten Betriebsheizwerte können der Tabelle 15 entnommen werden.

Tabelle 15: Betriebsheizwert H_{I,B} und relative Dichte für ausgewählte Gaszusammensetzungen

	Betriebsheizwert H _{I,B} [kWh/m³]	Relative Gasdichte d _V
TRGI-Tabelle	8,6	0,64
TRGI-Nachrechnung Erdgas L	8,6	0,64
20 mol-% H ₂ & Russland Erdgas H	8,9	0,47
20 mol-% H ₂ & Holland Erdgas L	8,2	0,53
80 mol-% H ₂ & Holland Erdgas L	4,3	0,18
90 mol-% H ₂ & Russland Erdgas H	3,8	0,12
100 mol-% H2	3,1	0,07

Die Tabellenwerte für Druckverluste aus der G 600 ermöglichen einen Ausgangspunkt für den Vergleich mit anderen Gaszusammensetzungen. Diese Tabellenwerte wurden mit der Methode nach Abschnitt 2.1.3 für Erdgas L mit den Vorgaben aus Tabelle 1, die als Grundlage für die TRGI-Tabellen verwendet werden, nachgerechnet. Die Abweichungen zwischen den Werten aus der TRGI-Tabelle und den nachgerechneten Werten werden mit zunehmender Spitzenbelastung \dot{Q} immer geringer. Die maximale Abweichung beträgt dabei 22 % und die minimale Abweichung 2 %. Aus diesem Grund wurde verzichtet, die nachgerechneten Werte in Abbildung 9 darzustellen. 20 mol-% Wasserstoff in Russland Erdgas H weisen dabei die geringsten Druckverluste im Vergleich der betrachteten Gasgemische auf. Die berechneten Werte für 100 mol-% Wasserstoff nach den Formeln der G 617 entsprechen den Tabellenwerten aus G 655. Anzumerken ist, dass selbst die Druckverluste für ein Brenngasgemisch bestehend aus 90 mol-% Wasserstoff-Erdgasgemisch in etwa den Druckverlustwerten der TRGI-Tabelle gleichkommen.

Die Auswahl der Gasströmungswächter wird in G 617 auf den Anschlusswert V_A sowie den Summenvolumenstrom ΣV_A bezogen, die sich nach den nachfolgenden Formeln aus Betriebsheizwert $H_{I,B}$, Nennbelastung \dot{Q}_{NB} und Summenbelastung \dot{Q}_{SB} berechnen lassen [2].

$$V_A = \frac{\dot{Q}_{NB}}{H_{LB}} \tag{31}$$

$$\Sigma V_A = \frac{\dot{Q}_{SB}}{H_{I,B}} \tag{32}$$

Der Summenvolumenstrom ΣV_A entspricht dabei dem Nenndurchfluss in Abhängigkeit der Stoffeigenschaften des betrachteten Brenngases. Der Anschlusswert entspricht nach [1] 80% des Summenvolumenstrom ΣV_A . Somit können die Auswahlbereiche für verschiedene Gaszusammensetzungen mit den Stoffeigenschaften nach Tabelle 15 bestimmt werden. Die Auswahlbereiche von Gasströmungswächtern für die Betrachtung mit mehreren Gasgeräten und somit der Summenbelastung \dot{Q}_{SB} stellt die Tabelle 16 für ausgewählte Gaszusammensetzungen beispielhaft vor.

Tabelle 16: GS-Auswahlbereich für die Betrachtung von mehreren Gasgeräten

	Ż ₃в für Erdgas L	\dot{Q}_{SB} für 100 mol-% H_2 nach G 655		\dot{Q}_{SB} für 90 mol-% H_2 in Russland Erdgas H
GS 2,5	bis 21	bis 22	bis 25	bis 21
GS 4	22 – 34	23 – 36	26 – 41	22 – 35
GS 6	35 – 51	37 – 54	42 – 61	36 – 52
GS 10	52 – 86	55 – 90	62 – 103	53 – 87
GS 16	87 – 138	91 – 145	104 – 164	88 – 140

Der berechnete Auswahlbereich für ein 90 mol-% Wasserstoff-Erdgasgemisch stimmt demnach nahezu dem Auswahlbereich für Erdgas L nach [1] überein. Für geringere Anteile Wasserstoff im Brenngasgemisch kann festgestellt werden, dass sich der Auswahlbereich vergrößert. Die steigenden Volumenströme werden durch das Funktionsprinzip des Gasströmungswächtern zum Teil über den reduzierten Druckverlust über den GS kompensiert, sodass die Nennbelastung weniger stark sinkt, als es die Reduktion des Heizwertes vermuten lässt.

3.2.3 Absperreinrichtung

Die Berechnung der Druckverluste für Absperreinrichtungen für von L-Gas nach TRGI verschiedene Brenngase nach G 617 wurde in Abschnitt 2.1.4 beschrieben. Die Ergebnisse der Berechnungen für 100 mol-% Wasserstoff, die Erdgase H-Gas Russland und L-Gas Holland sowie deren Wasserstoffgemische mit 20 mol-% und 80 mol-% bzw. 90 mol-% Wasserstoff werden in Abbildung 10 veranschaulicht. Zusätzlich werden in der Darstellung Werte aus der G 655 für ein Brenngas bestehend aus 100 mol-% Wasserstoff aufgeführt. Die dargestellten Druckverluste wurden für ein Absperrventil in Eckform, ohne thermischen Auslöser der Nenngröße DN 25 bestimmt. Die dazu verwendeten Stoffwerte der Gaszusammensetzungen sind in Tabelle 15 aufgelistet.

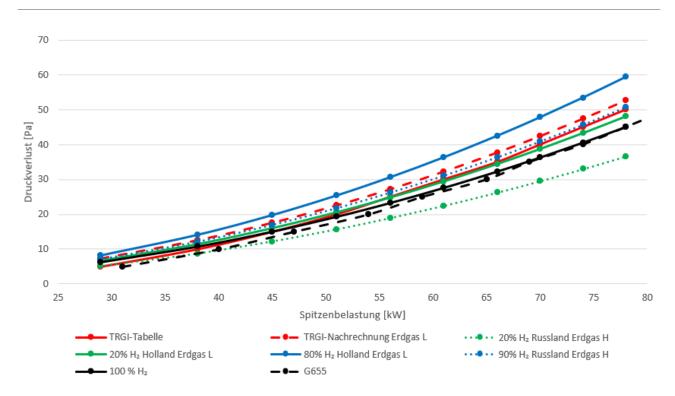


Abbildung 10 Druckverlust von Absperreinrichtungen (ohne TAE, Eckform) in Abhängigkeit der Spitzenbelastung Q für DN 25 - verschiedene Wasserstoffbeimischungen für L-Gas Holland, H-Gas Russland

Die Abbildung gibt wieder, dass die höchsten Druckverluste an Absperreinrichtungen für ein Erdgas Holland-L-Wasserstoffgemisch mit 80 mol-% Wasserstoff zu erwarten sind. Interessant ist, dass die Werte von 90 mol-% Wasserstoff in Erdgas H der Sorte Russland sich zwischen den nachgerechneten Werten der TRGI (L-Gas) und den TRGI-Tabellenwerten befinden. Die Abweichungen zwischen den TRGI-Tabellenwerten und den nachgerechneten TRGI-Werten mit Erdgas L entstehen mutmaßlich aus Rundungen auf ganzzahlige Werte. Die Differenzen zwischen den Tabellenwerten aus G 655 für 100 mol-% Wasserstoff und 100 mol-% Wasserstoff nach den Berechnungsformel nach G 617 können damit ebenso erklärt werden. Daraus lässt sich ableiten, dass der in G 617 beschriebene Berechnungsweg für Druckverluste an Absperreinrichtungen verlässliche Werte liefern kann. Nichtdestotrotz sollten diese Werte labormesstechnisch überprüft werden.

3.2.4 Gaszähler

Die Ergebnisse der Druckverlustberechnung für Gaszähler nach der in Abschnitt 2.1.5 erläuterten Methode aus G 617 werden in Abbildung 11 dargestellt. Diagrammausschnitte zur detaillierteren Betrachtung der grafisch dargestellten Ergebnisse sind dem Anhang 1 beigefügt. Die Auswahl der betrachteten Gaszusammensetzungen erfolgte analog den vorhergehenden Abschnitten für 100 mol-% Wasserstoff, die Erdgase H-Gas Russland und L-Gas Holland sowie deren Wasserstoffgemische mit 20 mol-% und 80 mol-% bzw. 90 mol-% Wasserstoff. Zusätzlich fließen die Tabellenwerte aus G 655 für 100 mol-% Wasserstoff in die Betrachtung mit ein. Die verwendeten Stoffeigenschaften der Gaszusammensetzung sind in Tabelle 15 zusammengefasst. Im folgenden Diagramm werden die Ergebnisse für einen G 10 Gaszähler veranschaulicht.

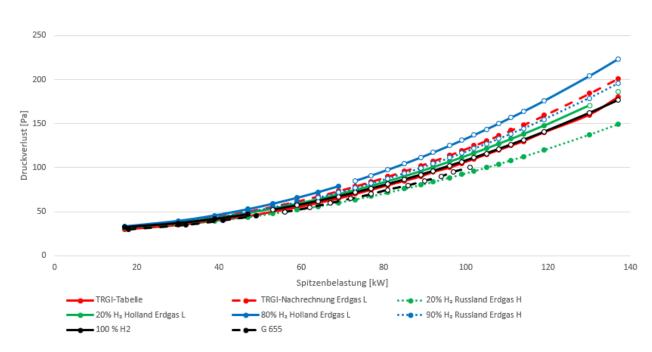


Abbildung 11 Druckverlust von Gaszählern über Nennbelastung für G10 - verschiedene Wasserstoffbeimischungen - verschiedene Wasserstoffbeimischungen für L-Gas Holland, H-Gas Russland

Anzumerken ist, dass die Werte aus den Tabellen der G 600 sowie der G 655 Druckverluste für die gesamte Zählergruppe einbeziehen. Entsprechend den Ausführungen aus Abschnitt 2.1.5 werden dabei neben dem Gaszähler in Abhängigkeit der Zählergruppenvariante eine Absperreinrichtung und eine definierte Anzahl an Formteilen mit beachtet [2]. Für die Darstellung der Druckverlustwerte, denen ein Volumenstrom zugrunde liegt, der sich oberhalb des Zählermessbereiches befindet, wurden leere Punkte ausgewählt. Das bedeutet beispielhaft für das Gasgemisch 80 mol-% Wasserstoff in Erdgas-L der Sorte Holland, dass ab einer Spitzenbelastung von \dot{Q} = 73 kW der Gasvolumenstrom außerhalb vom Messbereich liegt. Der maximale Durchfluss \dot{Q}_{max} für einen G10 Zähler entspricht einem Gasvolumenstrom von 16 m³/h.

Die in Abbildung 11 aufgeführten Druckverlustverläufe in Abhängigkeit der Spitzenbelastung \dot{Q} stimmen hinsichtlich eines Vergleiches von Tabellenwerten aus G 600 und G 655 mit den berechneten Werten für Erdgas L und 100 mol-% Wasserstoff mit den Erwartungen nicht überein. Erwartet wurden Abweichungen hinsichtlich der Berechnungen nach Abschnitt 2.1.5, aufgrund der Nichtberücksichtigung der Druckverluste von Bauteilen, die als Zählergruppe definiert sind. Jedoch müssten in diesem Fall die Druckverluste aus den DVGW Tabellen größer sein als die Berechneten. Weiterhin fällt auf, analog den Ausführungen zu Absperreinrichtungen in Abschnitt 0, dass der Druckverlauf für das Gasgemisch 90 mol-% Wasserstoff in Erdgas H der Sorte Russland sich sehr dem Verlauf der TRGI-Nachrechnung mit Erdgas L ähnelt. Für das Brenngas 20 mol-% Wasserstoff in Erdgas H der Sorte Russland wurden die geringsten Druckverluste in Abhängigkeit der Spitzenbelastung \dot{Q} berechnet.

3.3 Maximale Wasserstoffmenge für die Leitungsanlage im Bestand bei der Auslegung für Erdgas H und Erdgas L nach TRGI G 600

Für Leitungsanlagen im Bestand, die zukünftig mit Wasserstoffanteilen betrieben werden sollen, ist die ursprüngliche Auslegung der Leitungsanlage und derer Bauteile von entscheidender Bedeutung. Leitungsanlagen, die auf Erdgas H ausgelegt sind, müssen grundsätzlich hinsichtlich der Leitungsdimensionierung geprüft und ggf. angepasst werden. Dies wird auch in der G 655 bereits beschrieben [12]. Auf L-Gas dimensionierte Leitungsanlagen müssen unterschieden werden nach Leitungsanlagen, die nach Tabellen bzw. nach Diagrammverfahren ausgelegt wurden. Demzufolge ist die Sichtung der Dokumentationsunterlagen generell

vorzunehmen. Wie in Abschnitt 2.1.1 beschrieben wurde, werden Leitungsanlagen nach dem Diagrammverfahren auf einen Druckverlust von 300 Pa ausgelegt. D.h., sollte sich im Zuge einer Wasserstoffbeimischung der Druckverlust erhöhen, würden die entsprechenden von Gasgeräteherstellern geforderten Fließdrücke an der Geräteanschlussarmatur von etwa 20 mbar nicht mehr anliegen. In so einem Fall wäre die Bauteildimensionierung zu überprüfen. Für den allgemeinen Fall, bei dem sich ein Druckverlust größer als 300 Pa ergibt, merkt das DVGW-Arbeitsblatt G 600 nachfolgendende Überprüfungsmöglichkeiten und Reihenfolge der Änderungsmaßnahmen an [1]:

- keine Vergrößerung der Rohrnennweiten entlang des Fließweges ab Hauptabsperreinrichtung bzw. Gas-Druckregelgerät
- gleiche oder n\u00e4chstkleinere Nennweite der Ger\u00e4teanschlussarmatur gegen\u00fcber der Einzelzuleitung bzw. Abzweigleitung
- Vergrößerung der Rohrnennweite des Leitungsabschnittes mit dem größten Rohrdruckgefälle R
- für Fälle mit kleinerer Nennweite der Geräteanschlussarmatur gegenüber Rohrnennweite, Austausch der Geräteanschlussarmatur mit größerer Nennweite

Für nach Tabellenverfahren dimensionierte Leitungsanlagen sind zunächst auf ihren Gesamtdruckverlust sowie auf die Einstellung des Gas-Druckreglers hin zu überprüfen. Im Fall einer ursprünglichen Überdimensionierung der Leitungsanlage kann unter Umständen die Leitungsanlage im vorgefundenen Zustand mit Wasserstoffbeimischungen betrieben werden. Jedoch ist eine Überprüfung der Druckverluste des Leitungssystems vorzunehmen. Bei nicht vorhandener bzw. ausreichender Überdimensionierung sind Änderungsmaßnahmen analog der bereits beschrieben durchzuführen. Sollten die beschriebenen Maßnahmen nicht ausreichen, den Druckverlust auf unter 300 Pa zu reduzieren, ist eine Betriebsdruckerhöhung innerhalb des Anwendungsbereichs der TRGI bis 100 hPa möglich. Das Arbeitsblatt DVGW G 600 merkt dazu an, dass bei einem neuen Betriebsdruck der Leitungsanlage, der größer ist, als der Prüfdruck der letztmaligen Prüfung, die gesamte Leitungsanlage nach den Vorschriften der TRGI geprüft werden müssen [1].

Rein auf die Funktion bezogen ist im Kontext dieser Studie der Gaszähler die kritischste Komponente der Leitungsanlage. Wie die Ergebnisse aus Abbildung 11 zeigen, steigen die Gasvolumenströme bei größeren Wasserstoffanteilen so stark an, dass die Messbereichsgrenzen für Gaszähler überschritten werden können. Die Tabelle 17 gibt in Abhängigkeit der Nenngröße des Gaszählers die Wasserstoffgrenzen zur Einhaltung der Messbereiche an. Dabei wird Erdgas H der Sorte Russland und der Auslegungsbereich für Gaszähler bis zu einer definierten Leistungsgrenze der Spitzenbelastung \dot{Q} betrachtet. Hierbei wurde sich an den Leistungsangaben der Tabelle L.2 aus G 600 für einen Druckverlust von 100 Pa orientiert [1]. Diese Leistungsgrenzen, die von der Zählergröße abhängen, werden in der Tabelle 17 zusätzlich mit aufgeführt. Es wird darauf hingewiesen, dass diesen Leistungswerten Berechnungen mit L-Gas zugrunde liegen.

Tabelle 17: Grenzwertbetrachtung von Wasserstoffanteilen in Russland Erdgas H auf den Messbereich von Gaszählern

Gaszähler Nennweite	Maximal Durchfluss \dot{Q}_{max} [2] [m³/h]	Leistungsgrenze [1] [kW]	Wasserstoffgrenze [mol-%]
G2,5	4	31	34
G4	6	43	44
G6	10	57	63
G10	16	96	59
G16	20	138	47
G25	40	217	67
G40	65	347	68
G65	100	564	64

Für einen Gaszähler der Größe G10 mit einem maximalen Durchfluss \dot{Q}_{max} = 16 m³/h wird in [1] für einen Druckverlust der Zählergruppe von 100 Pa eine Spitzenbelastung \dot{Q} von 96 kW angegeben. Bei einem Wasserstoffgehalt von 58 mol-% entspricht das einem Gasvolumenstrom von 15,9 m³/h. Der Heizwert des Wasserstoff-Erdgasgemisches beträgt 6,03 kWh/m³. Die in dieser Studie dargelegten Betrachtungen beruhen auf den Angaben der DVGW Arbeitsblätter G 600 und G 617, sodass hier ausschließlich Balgengaszähler G2,5

bis G65 berücksichtigt werden können.

Aufgrund der steigenden Gasvolumenströme bei steigendem Wasserstoffgehalt und dabei konstanter Belastung eines Gasgerätes ist eine Überprüfung der Betriebsvolumenströme in Bezug auf das Schließverhalten von Gasströmungswächtern analog den Betrachtungen aus [6] für Wasserstoffanteile größer 30 Vol.-% vorzunehmen. Mit den Annahmen aus Abschnitt 2 und der Verwendung der Stoffwerte von Russland Erdgas H werden die Schließvolumenströme eines Gasströmungswächters mit den Betriebsvolumenströmen in Tabelle 18 gegenübergestellt.

Tabelle 18: Verhalten des Schließvolumenstromes im Vergleich zum Betriebsvolumenstrom von Gasströmungswächtern für verschiedene Wasserstoffanteile im Erdgas

Brenngas-Was- serstoffgemisch [mol-%]	Relative Dichte	Nenndurch- fluss [m³/h]	Schließvolumen- strom [m³/h]	Betriebsheizwert [kWh/m³]	Betriebsvolumen- strom [m³/h]
100 Russland-H / 0 H ₂	0,57	6,33	8,06	10,32	2,91
90 Russland-H / 10 H ₂	0,52	6,63	8,45	9,59	3,13
80 Russland-H / 20 H ₂	0,47	6,98	8,89	8,86	3,39
70 Russland-H / 30 H ₂	0,42	7,39	9,40	8,13	3,69
60 Russland-H / 40 H ₂	0,37	7,87	10,02	7,41	4,05
50 Russland-H / 50 H ₂	0,32	8,47	10,78	6,68	4,49
40 Russland-H / 60 H ₂	0,27	9,22	11,74	5,96	5,04
30 Russland-H / 70 H ₂	0,22	10,22	13,01	5,23	5,73
20 Russland-H / 80 H ₂	0,17	11,64	14,81	4,51	6,65
10 Russland-H / 90 H ₂	0,12	13,86	17,65	3,79	7,92
0 Russland-H / 100 H ₂	0,07	18,20	23,17	3,06	9,79

Dabei wurden folgende Annahmen für die Berechnung getroffen:

- die Belastung des Heizgerätes ist 30 kW und konstant für alle Brenngas-Wasserstoffgemische
- der Schließfaktor fs wird mit einem Wert von 1,3 angegeben [3]
- Auswahl eines GS 6

Weiterhin ist der Nenndurchfluss \vec{V}_N abhängig vom betrachteten Brenngasgemisch, sodass die Werte aus Tabelle 6 für den Nenndurchfluss des Gasgemisches \vec{V}_{NG} auf die Stoffeigenschaften der Brenngase nach Gleichung (33). umgerechnet werden.

$$\dot{V_{NG}} = \dot{V_N} * \sqrt{\frac{1}{d_V}} \tag{33}$$

Der Schließvolumenstrom \dot{V}_S berechnet sich nach [3] durch:

$$\dot{V_S} = \dot{V_{NG}} * f_S \tag{34}$$

Nach dieser Betrachtungsweise wäre der Betriebsvolumenstrom stets kleiner als der Nenndurchfluss des entsprechenden Brenngasgemisches, sodass demnach die Schließfunktion für Gasströmungswächter im Bestand für beliebige Wasserstoffgemische aufgrund einer Vergrößerung des Gasvolumenstromes durch Änderung der Gaszusammensetzung nicht ausgelöst wird. Diese theoretischen Betrachtungen werden derzeit in einem Forschungsvorhaben überprüft [13].

4 Zusammenfassung

Die Bestrebungen zukünftig Wasserstoff ins Erdgasnetz einzuspeisen, werden immer größer. In dem im September 2021 neu erschienenen DVGW Arbeitsblatt G 260 wurde die neue Gasfamilie 5 für reinen Wasserstoff hinzugefügt [14]. Zusätzlich wurde die maximal mögliche Beimischung von Wasserstoff ins Erdgas auf 20 Vol.-% erhöht, auch wenn hier weiterhin die Dichtegrenzen zu beachten sind. Auch zahlreiche Forschungsvorhaben befassen sich mit Wasserstoff oder bestimmten Einspeiseszenarien. Dazu zählen auch Reallabore der Energiewende, wie beispielsweise das Projekt "Westküste 100" mit dem Aufbau einer regionalen Wasserstoffwirtschaft, die zum Teil auch das Haushaltsnetz betrifft [18]. Es ist jedoch noch unklar, wie die zukünftige Gasversorgung mit integriertem Wasserstoff vollumfänglich aussehen wird. Angenommen wird jedoch, dass auch schwankende Wasserstoffanteile im Erdgasnetz mittelfristig eine Rolle spielen werden. Schwankend deshalb, weil die Wasserstoffproduktion aus "Erneuerbarem Strom" umweltbedingten Einflüssen unterstehen, die von tagesaktuellen bzw. saisonalen Einflüssen abhängig sind.

Ziel des vorliegenden Berichtes ist es, für verschiedene Wasserstoff-Erdgas-Szenarien einen Überblick zur Vorgehensweise der Leitungsdimensionierung im Anwendungsbereich der TRGI zu geben und um dabei Aussagen zu Leitungssystemen im Bestand treffen zu können.

Der Bericht hat für verschiedene Gaszusammensetzung den Einfluss des Wasserstoffs auf den Wobbe-Index gezeigt. Das Unterschreiten vordefinierter Grenzen der relativen Dichte zwischen etwa 5 mol-% und 15 mol-% Wasserstoff in Erdgas macht deutlich, dass zukünftig eine Änderung der vorgegebenen Grenze erforderlich ist. Weiterhin wurde gezeigt, dass das Rohrdruckgefälle mit steigenden Wasserstoffanteilen im Erdgas bis zu einem Maximum ansteigt und bei weiter steigenden Wasserstoffanteilen bis 100 mol-% wieder geringfügig fällt. Demnach ist das Maximum abhängig von der betrachteten Gaszusammensetzung. Für Formteile ist es mit den Vorgaben der DVGW Arbeitsblätter G 600 und G 617 nicht möglich den Einfluss von Wasserstoff auf den Druckverlust darzustellen. Aussagen zu Berechnungsvorgängen der Druckverlustbeiwerte (ζ -Werte) von Formteilen, die abhängig von der Reynoldszahl und damit auch abhängig vom Anteil Wasserstoff in Erdgas sind, fehlen in den Regelwerken des DVGW. Untersuchungen, analog der G 616, könnten diesbezüglich Ergebnisse liefern [19]. Die Ergebnisse des vorliegenden Berichts werden dementsprechend auch dem DVGW zur Verfügung gestellt, um neue Erkenntnisse hinsichtlich der Bestimmung von Druckverlustbeiwerten in der DVGW-Forschung anzustoßen.

Mit den im TRGI-Regelwerk beschriebenen Verfahren zur Leitungs- und Bauteildimensionierung konnten für beliebige Wasserstoffanteile der Einfluss von Wasserstoff bestimmt werden. Die Theorie zeigt, dass keine erhöhten Druckverluste an den Bauteilen bei den zukünftig erwartbaren Gaszusammensetzungen (L-Gas-Wasserstoffgemische können dabei nach jetzigem Kenntnisstand ausgeklammert werden) auftreten. Die theoretischen Werte sollten in Nachfolgeprojekten durch Praxisuntersuchungen validiert werden, wobei auch geprüft werden sollte, ob vom Wasserstoffanteil abhängige ζ-Werte für Bauteile der TRGI genauere Ergebnisse liefert bzw. ob die bisherigen Methoden hinreichend genaue Werte für die Leitungsdimensionierung bereitstellen. Darüber hinaus konnten die Wasserstoffgrenzen in Abhängigkeit verschiedener Gaszusammensetzungen für den Mess- bzw. Auswahlbereich von Gaszählern bestimmt werden. Der Auswahlbereich von Gasströmungswächtern in Abhängigkeit der Gaszusammensetzung konnte ebenso definiert werden. Das berechnete Schließverhalten von Gasströmungswächtern ergab zudem keine kritischen Wasserstoffzumischraten. Es wird jedoch empfohlen auch diesen Sachverhalt im Prüflabor zu überprüfen. "Sonstige Bauteile" nach TRGI, wie z.B. Gasfilter, zu denen die TRGI auf Angaben der Hersteller verweist, wurden im vorliegenden Bericht nicht überprüft.

Generell ist es nicht möglich für Bestandsanlagen Aussagen zur Leitungsdimensionierung für verschiedene Wasserstoffszenarien zu treffen. Möglich sind jedoch Einzelfallbetrachtungen zu Anlagen im Bestand, bei denen die ursprüngliche Dimensionierung des Leitungssystems mitberücksichtigt wird.

Literaturverzeichnis

- [1] DVGW Regelwerk: DVGW G 600 (A). Technische Regel Arbeitsblatt, Technische Regel für Gasinstallationen (DVGW-TRGI) **2018**.
- [2] DVGW Regelwerk: DVGW G 617 (A). Berechnungsgrundlagen zur Dimensionierung der Leitungsanlage von Gasinstallationen **2018**.
- [3] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., DIN 30652-1, Gasströmungswächter Teil 1: Gasströmungswächter für die Gasinstallation, Beuth Verlag GmbH **2021**.
- [4] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., DIN EN 331, Handbetätigte Kugelhähne und Kegelhähne mit geschlossenem Boden für die Gas-Hausinstallation, Beuth Verlag GmbH **2016**.
- [5] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN 3586, Thermisch auslösende Absperreinrichtungen für Gas Anforderungen und Prüfungen*, Beuth Verlag GmbH **2003**.
- [6] K. SCHOLTEN, H. DÖRR, M. WERSCHY, Mögliche Beeinflussung von Bauteilen der Gasinstallation durch Wasserstoffanteile im Erdgas unter Berücksichtigung der TRGI **2018**.
- [7] European Insdustrial Gases Association (EIGA). Hydrogen Pipeline Systems. **2014**.
- [8] P. PIETSCH, M. WIERSIG, M. WERSCHY, Einfluss von Wasserstoffanteilen im Erdgas auf Bauteile der DIN EN 746-2 **2018**.
- [9] P. Götze, Wasserstoffwirkung auf die Gaszählung Untersuchung des Verhaltens und der Eichgültigkeit von häuslichen und gewerblichen Gaszählern unter hohen, volatilen Wasserstoffmengen im Erdgas **2020**.
- [10] GRINDAIX GMBH, GRX-Q Verdrängungszähler, https://grindaix.de/magazin/verdraengungszaehler/.
- [11] DVGW Regelwerk: DVGW G 260 (A). Gasbeschaffenheit: Technische Regeln Arbeitsblatt 2013.
- [12] DVGW Regelwerk: DVGW G 655 (M). Leitfaden H2-Readiness Gasanwendung 2021.
- [13] DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V., Roadmap Gas 2050, Entwicklung einer Roadmap zur Umsetzung des DVGW-Energie-Impulses bis zum Jahr 2050 (Förderkennzeichen G 201824) 2019 2022.
- [14] DVGW Regelwerk: DVGW G 260 (A). Gasbeschaffenheit: Technische Regel Arbeitsblatt 2021.
- [15] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., DIN EN ISO 6976: Erdgas Berechnung von Brenn-- und Heizwert, Dichte, relativer Dichte und Wobbeindex aus der Zusammensetzung **2016**.
- [16] S. Mathur, S.C. Saxena, Viscosity of polar gas mixtures: Wilke's method. Appl. sci. Res. 15, 404–410 1966.
- [17] Springer-Verlag Berlin Heidelberg, VDI-Wärmeatlas, 10. Auflage 2006.
- [18] Forschungsvorhaben "Westküste 100" Reallabore der Energiewende, https://www.westkueste100.de/#ProjektHome zuletzt geprüft am 30.11.2021.
- [19] DVGW Regelwerk: DVGW G 616 (A). Ermittlung von Zeta-Werten für Formteile und Verbindungsstücke in Rohrleitungen der Gas-Inneninstallation: Technische Regel Arbeitsblatt **2020**.

Anhang

Anhang 1:

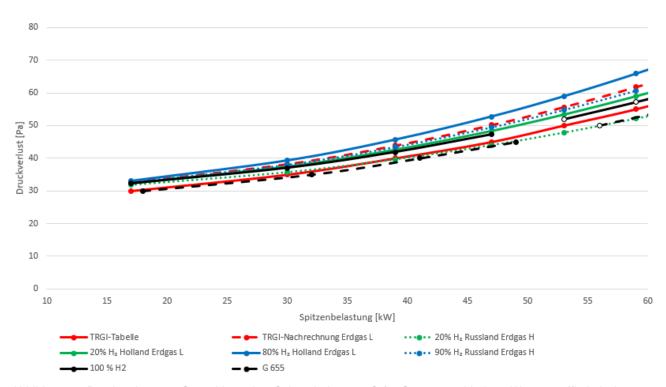


Abbildung 12 Druckverlust von Gaszählern über Spitzenbelastung Q für G10 - verschiedene Wasserstoffbeimischungen für L-Gas Holland, H-Gas Russland (Ausschnitt bis 60 kW Spitzenbelastung)

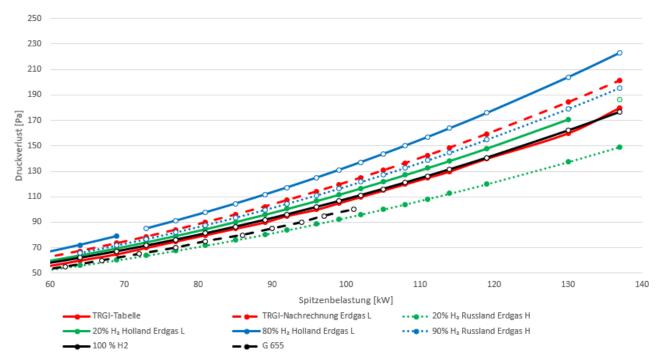


Abbildung 13 Druckverlust von Gaszählern über Spitzenbelastung Q für G10 - verschiedene Wasserstoffbeimischungen für L-Gas Holland, H-Gas Russland (Ausschnitt ab 60 kW Spitzenbelastung)

Anhang 2

Tabelle 19: Datentabelle Abbildung 4

Wasserstoffanteil [mol-%]				Brennwert [kWh/m³]		
	Russland	Nordsee	Holland	Russland	Nordsee	Holland
	Erdgas H	Erdgas H	Erdgas L	Erdgas H	Erdgas H	Erdgas L
0	14,76	14,68	12,77	11,19	11,64	10,24
10	14,40	14,31	12,51	10,42	10,83	9,56
20	14,03	13,93	12,25	9,65	10,01	8,89
30	13,67	13,56	11,99	8,88	9,20	8,22
40	13,32	13,19	11,76	8,12	8,39	7,55
50	12,97	12,84	11,54	7,35	7,58	6,88
60	12,66	12,52	11,38	6,59	6,77	6,21
70	12,41	12,25	11,30	5,83	5,96	5,54
80	12,28	12,12	11,38	5,07	5,16	4,88
90	12,43	12,29	11,83	4,30	4,35	4,21
100	13,43	13,43	13,43	3,54	3,54	3,54

Tabelle 20: Datentabelle Abbildung 5

Wasserstoffanteil [mol-%]	Rohrdruckgefälle [Pa/m]			Strömungsgeschwindigkeit [m/s]			
	Russland	Nordsee	Holland	Russland	Nordsee	Holland	
	Erdgas H	Erdgas H	Erdgas L	Erdgas H	Erdgas H	Erdgas L	
0	4,17	4,15	5,39	2,23	2,14	2,44	
10	4,42	4,41	5,69	2,40	2,31	2,62	
20	4,71	4,70	6,00	2,60	2,50	2,82	
30	5,02	5,02	6,34	2,83	2,73	3,06	
40	5,37	5,39	6,71	3,11	3,00	3,35	
50	5,76	5,79	7,09	3,45	3,34	3,69	
60	6,18	6,23	7,48	3,87	3,76	4,11	
70	6,61	6,69	7,82	4,40	4,30	4,63	
80	7,00	7,10	8,02	5,11	5,01	5,31	
90	7,20	7,30	7,86	6,08	6,02	6,23	
100	6,74	6,74	6,74	7,52	7,52	7,52	

Tabelle 21: Datentabelle Abbildung 5

Spitzenbe [kW]	elastung	Druckverlust [Pa]						
				20 mol-%	20 mol-%	90 mol-%	80 mol-%	
			TRGI-Nach-	H₂ Erdgas-	H₂ Erdgas-	H₂ Erdgas-	H₂ Erdgas-	100
nach	nach	TRGI-	rechnung	Н	L	Н	L	mol-%
G 600	G 655	Tabelle	Erdgas L	Russland	Holland	Russland	Holland	H ₂
17	18	10	12,21	8,50	11,15	11,79	13,78	10,45
20	21	15	16,90	11,76	15,43	16,32	19,08	14,47
23	24	20	22,35	15,56	20,41	21,59	25,23	19,13
25	26	25	26,41	18,38	24,12	25,50	29,81	22,60
27	29	30	30,80	21,44	28,13	29,75	34,77	26,36
29	31	35	35,53	24,73	32,45	34,32	40,11	30,41
31	33	40	40,60	28,26	37,08	39,21	45,83	34,75
33	35	45	46,01	32,03	42,02	44,44	51,94	39,38
34	36	50	48,84	34,00	44,61	47,17	55,13	41,80

Tabelle 22: Datentabelle Abbildung 5

Spitzenbe [kW]	elastung	Druckverlust [Pa]						
				20 mol-%	20 mol-%	90 mol-%	80 mol-%	
			TRGI-Nach-	H₂ Erdgas-	H₂ Erdgas-	H₂ Erdgas-	H₂ Erdgas-	100
nach	nach	TRGI-	rechnung	Н	L	Н	L	mol-%
G 600	G 655	Tabelle	Erdgas L	Russland	Holland	Russland	Holland	H ₂
17	18	10	12,21	8,50	11,15	11,79	13,78	10,45
20	21	15	16,90	11,76	15,43	16,32	19,08	14,47
23	24	20	22,35	15,56	20,41	21,59	25,23	19,13
25	26	25	26,41	18,38	24,12	25,50	29,81	22,60
27	29	30	30,80	21,44	28,13	29,75	34,77	26,36
29	31	35	35,53	24,73	32,45	34,32	40,11	30,41
31	33	40	40,60	28,26	37,08	39,21	45,83	34,75
33	35	45	46,01	32,03	42,02	44,44	51,94	39,38
34	36	50	48,84	34,00	44,61	47,17	55,13	41,80

Tabelle 23: Datentabelle Abbildung 10

Spitzenbe [kW]	lastung	Druckverlust [Pa]						
				20 mol-%	20 mol-%	90 mol-%	80 mol-%	
			TRGI-Nach-	H₂ Erdgas-	H₂ Erdgas-	H₂ Erdgas-	H₂ Erdgas-	100
nach	nach	TRGI-	rechnung	Н	L	Н	L	mol-%
G 600	G 655	Tabelle	Erdgas L	Russland	Holland	Russland	Holland	H ₂
29	31	5	7,28	5,07	6,65	7,03	8,21	6,23
38	40	10	12,50	8,70	11,41	12,07	14,10	10,69
45	47	15	17,52	12,20	16,00	16,92	19,78	15,00
51	54	20	22,51	15,67	20,55	21,74	25,40	19,26
56	59	25	27,14	18,89	24,78	26,21	30,63	23,23
61	65	30	32,20	22,41	29,41	31,10	36,34	27,56
66	69	35	37,69	26,24	34,42	36,40	42,55	32,26
70	74	40	42,40	29,51	38,72	40,95	47,86	36,29
74	78	45	47,39	32,98	43,28	45,76	53,49	40,56
78	82	50	52,65	36,64	48,08	50,84	59,42	45,06

Tabelle 24: Datentabelle Abbildung 11

Spitzenbe [kW]	elastung	Druckverlust [Pa]						
				20 mol-%	20 mol-%	90 mol-%	80 mol-%	
			TRGI-Nach-	H₂ Erdgas-	H₂ Erdgas-	H₂ Erdgas-	H₂ Erdgas-	100
nach	nach	TRGI-	rechnung	Н	L	Н	L	mol-%
G 600	G 655	Tabelle	Erdgas L	Russland	Holland	Russland	Holland	H ₂
17	18	30	32,6	31,8	32,4	32,5	33,0	32,3
30	32	35	38,2	35,7	37,5	37,9	39,3	37,0
39	41	40	43,9	39,7	42,7	43,4	45,7	41,9
47	49	45	50,2	44,0	48,4	49,5	52,8	47,3
53	56	50	55,6	47,8	53,4	54,8	58,9	51,9
59	62	55	61,8	52,1	59,0	60,7	65,9	57,2
64	67	60	67,4	56,0	64,1	66,1	72,2	62,0
69	72	65	73,5	60,2	69,7	72,0	79,0	67,2
73	77	70	78,6	63,9	74,4	77,0	84,9	71,6
77	81	75	84,1	67,7	79,4	82,3	91,1	76,3
81	86	80	89,9	71,7	84,7	87,8	97,6	81,2
85	90	85	95,9	75,9	90,2	93,7	104,4	86,4
89	94	90	102,3	80,3	96,0	99,8	111,6	91,9
92	97	95	107,2	83,8	100,5	104,6	117,2	96,1
96	101	100	114,1	88,5	106,8	111,2	124,9	102,0
99		105	119,4	92,3	111,7	116,4	131,0	106,6
102		110	125,0	96,1	116,7	121,7	137,2	111,3
105		115	130,6	100,0	121,9	127,2	143,6	116,1
108		120	136,5	104,1	127,2	132,8	150,2	121,1
111		125	142,4	108,3	132,7	138,6	156,9	126,2
114		130	148,6	112,6	138,3	144,5	163,9	131,5
119		140	159,2	120,0	148,0	154,8	175,9	140,6
130		160	184,2	137,4	170,9	179,0	204,1	162,0
137		180	201,3	149,2	186,4	195,4	223,3	176,6