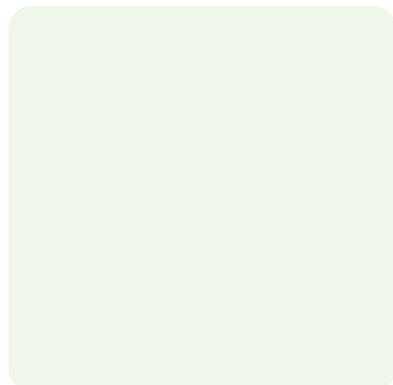
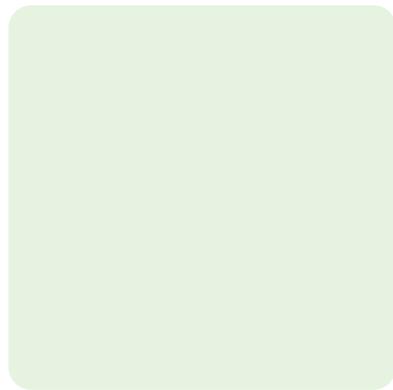
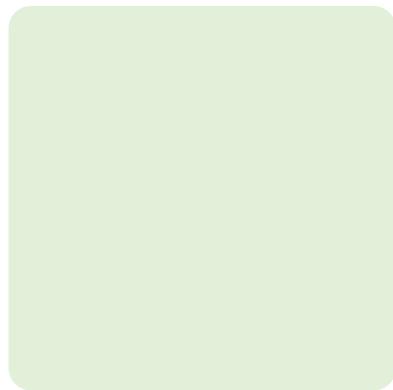
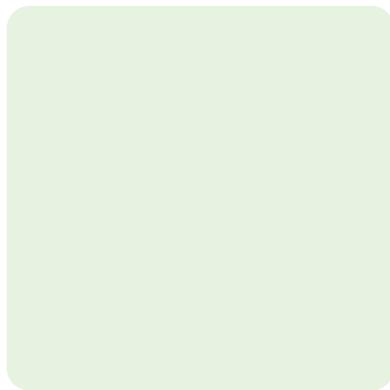


Wasserstoffwirkung auf die Gaszählung

Untersuchung des Verhaltens und der Eichgültigkeit von häuslichen und gewerblichen Gaszählern unter hohen, volatilen Wasserstoffmengen im Erdgas

Abschlussbericht



Impressum

Abschlussbericht

Wasserstoffwirkung auf die Gaszählung

Untersuchung des Verhaltens und der Eichgültigkeit von häuslichen und gewerblichen Gaszählern bei hohen, volatilen Wasserstoffmengen im Erdgas

Erstellt im Auftrag von

Gaswirtschaftlicher Beirat

Durchführung

Projektleitung

Dipl.-Ing. Pitt Götze
pitt.goetze@dbi-gruppe.de
T +49 3731 4195-327

Kontakt

DBI - Gastechnologisches Institut gGmbH Freiberg
Halsbrücker Straße 34
D-09599 Freiberg
www.dbi-gruppe.de

Wasserstoffwirkung auf die Gaszählung

Abbildungsverzeichnis	4
Tabellenverzeichnis	5
Formelzeichen-, Index- und Akronyme	6
1 Einleitung	7
2 Stand der Forschung und Technik	10
2.1 Recherche aktueller Forschungsvorhaben	10
2.2 Gasabrechnung nach DVGW Arbeitsblättern G 685-1 bis -6	11
2.3 Gasvolumenstrommessung mittels Gaszählern	12
2.4 Grundlegendes zur Prüfung von Volumengaszählern	16
2.5 Zusammenfassung zum Stand der Forschung und Technik	17
3 Konzeption und Durchführung des Prüfprogramms	18
3.1 Eruierte Versuchsdurchführungen sowie Abwägung der jeweiligen Vor- und Nachteile	18
3.1.1 Konzept 1 – Kreislaufströmung plus Flaschengas (Anhang 1 S. 35)	18
3.1.2 Konzept 2 – Offene Ausströmung plus Flaschengas (Anhang 2 S. 35)	18
3.1.3 Finale Beurteilung der Konzepte unter Berücksichtigung vorhandenen beziehungsweise zu beschaffender Messmittel	19
3.2 Beschreibung des umgesetzten Versuchstandes	20
3.3 Versuchsdurchführung	22
4 Ergebnisse der Untersuchungen	24
4.1 Grundlegendes zur Datenauswertung und zum Aufbau der Diagramme	24
4.2 Der Einfluss der Temperaturkompensation auf die Gaszählung	24
4.3 Einfluss der inneren Mechanik eines BGZ auf die Gaszählung	25
4.4 Der Einfluss der Baugröße der BGZ auf die Zählgenauigkeit	26
4.5 Einfluss der Zumischung von Wasserstoff auf den Volumenstrom	27
4.6 Zusammenfassung der experimentellen Ergebnisse	29
5 Zusammenfassung	30
Danksagung	31
Literaturverzeichnis	32
Anhang	34

Wasserstoffwirkung auf die Gaszählung

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Einteilung von Messgeräten zur Durchfluss- und Mengenmessung nach [21].	13
Abbildung 2: Aufbau eines Balgengaszählers von Ludwig Eisenbeis, lizenziert unter CC BY-SA 4.0 [29].	14
Abbildung 3: Geräteverteilung in Deutschland, kulminiert über maßgebliche Marktteilnehmer basierend auf im Rahmen des laufenden Projektes „H2-Kompendium für Gasnetze“ [14], zusammengefasst für Haushalt, Gewerbe und Industrie.	15
Abbildung 4: Rohrleitungs- und Instrumentenfließschema der final umgesetzten Version des Versuchstandes.	20
Abbildung 5: Im Rahmen der Studie genutzter Prüfaufbau - dargestellt sind die Kernkomponenten Prüfstrecke (PF) inklusive Prüflingen (BGZ G4), Druck- und Temperaturlaufnehmer sowie Trommelgaszähler.	21
Abbildung 6: Einfluss der Temperaturkompensation auf die Zählgenauigkeit von Gaszählern am Beispiel von G4 Balgengaszählern	25
Abbildung 7: Einfluss der inneren Mechanik eines BGZ auf die Zählgenauigkeit von Balgengaszählern.	26
Abbildung 8: Darstellung zum Einfluss der Baugröße auf das Zählergebnis von Balgengaszählern.	27
Abbildung 9: Der Einfluss des Wasserstoffanteils auf den sich einstellenden Volumenstrom.	28

Wasserstoffwirkung auf die Gaszählung

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Überschlägige Berechnung ausgewählter Gemischeigenschaften basierend auf einer Freiburger Erdgasprobe und Wasserstoff. Die Ermittlung der angegebenen Eigenschaften erfolgte mittels CHEMCAD in Version 7.0.3.9212. Bezugsgrößen der sind 20 °C sowie 1,0132 bar (a).	8
Tabelle 2: Liste aktuell laufender Forschungsvorhaben mit Bezug auf Gaszähler sowie deren Funktionalität unter (vorwiegend reinem) Wasserstoff.	11
Tabelle 3: Essentielle Eigenschaften und Wirkungen von Faktoren auf die zu untersuchenden Gaszählertypen nach [22].	14
Tabelle 4: Mindestbedingungen Durchflussbereich gemäß Richtlinie 2014/32/EU Anhang 1 [25].	16
Tabelle 5: Erlaubte Abweichung von Balgengaszähler bei der Eichung gemäß Anhang 1 der Richtlinie EU 2014 / 32 / EU [25].	16
Tabelle 6: Zu realisierende Durchflüsse für die Eichprüfung von Balgengaszählern der Zählergrößen G 2,5 und G 4 [25].	16
Tabelle 7: Für die Messkampagne definierte Gemisch-zusammensetzungen in Volumenprozent [Vol.-%].	21
Tabelle 8: Für Untersuchungen zu realisierende Volumenströme für die Balgengaszählergröße G2,5 / 4 / 6 / 10.	21
Tabelle 9: Nach Versuchsgruppen aufgeschlüsselte Messstellenbelegung der Prüfstrecke.	22
Tabelle 10: Übersicht zu dem ermittelten Gesamtunsicherheit der Zusammensetzung der Volumenströme bereitgestellt von der installierten Gasmische.	36

Wasserstoffwirkung auf die Gaszählung

Formelzeichen-, Index- und Akronyme

Akronyme

BGZ	Balgengaszähler
DGZ	Drehkolbengaszähler
TRZ	Turbinenradzähler

Formelzeichen

$f_{Pr/N}$	Fehler	%	Fehler des Prüflings respektive Normal.
$p_{Pr/N}$	Druck	Pa	Druck absolut an Prüfling oder Normal, ggf. gemittelt über Ort / Zeit.
Q_{min}	Mindest- durchfluss	l /min m ³ /h	Der kleinste Durchfluss, bei dem der Gaszähler Messwerte anzeigt, die innerhalb der geforderten Fehlergrenzen liegen.
Q_{max}	Höchst- durchfluss	l /min m ³ /h	Der größte Durchfluss, bei dem der Gaszähler Messwerte anzeigt, die innerhalb der geforderten Fehlergrenzen liegen.
Q_t	Übergangs- durchfluss	l /min m ³ /h	Der Übergangsdurchfluss ist der zwischen dem Höchst- und dem Mindestdurchfluss auftretende Durchfluss, bei dem der Durchflussbereich in zwei Zonen, den oberen Belastungsbereich und den unteren Belastungsbereich, getrennt wird, für die jeweils verschiedene Fehlergrenzen gelten.
Q_r	Überlast- durchfluss	l /min m ³ /h	Der Überlastdurchfluss ist der höchste Durchfluss, bei dem der Zähler für einen kurzen Zeitraum ohne Beeinträchtigung arbeitet.
$T_{Pr/N}$	Temperatur	K	Temperatur an Prüfling oder Normal, ggf. gemittelt über Ort / Zeit.

Wasserstoffwirkung auf die Gaszählung

1 Einleitung

Ein zentraler Aspekt der Energiewende ist die zeitliche Entkopplung der Gewinnung und des Verbrauchs von erneuerbaren Energien. Die erneuerbare Stromproduktion aus Wind- und Sonnenkraft unterliegt von Natur aus volatilen Schwankungen. Die Folge sind regionale Überkapazitäten, welche die Abregelung von Wind- und Solarparks nach sich ziehen, wenn der überschüssige Strom nicht gespeichert werden kann. Verglichen mit anderen Energieträgern wie Öl, Gas oder Kohle lässt sich Strom jedoch nicht ohne weiteres speichern.

Eine vielversprechende Möglichkeit dieses Problem zu lösen, stellt die Power-to-Gas-Technologie dar, also die Umwandlung von (Überschuss-)Strom in Wasserstoff. Dabei wird Wasser mittels Elektrolyse in Wasserstoff und Sauerstoff aufgespalten. Der Wasserstoff kann dann entweder direkt ins bestehende Erdgas-Netz eingespeist werden - aktuell ist die Beimischung auf unter 10 Vol.-% begrenzt ([1] S. 43) – oder es erfolgt die Weiterverarbeitung zu synthetischem Erdgas, welches unbegrenzt eingespeist werden darf. Bei Letzterem wird der gewonnene Wasserstoff mit Kohlenstoffdioxid bspw. aus Biogasanlagen methanisiert.

Die direkte Einspeisung ist mit geringerem Aufwand verbunden. Auch aus diesem Grund findet eine Diskussion über die Verschiebung des Grenzwertes von Wasserstoff im Erdgasnetz statt und entsprechende Forschungsvorhaben werden vorangetrieben. Es gilt dabei zu klären, inwieweit das Erdgasnetz sowie alle nachgelagerten Anlagen und Verbraucher höhere Wasserstoffanteile tolerieren. Ein erhöhter Wasserstoffanteil kann sich auf kritische Gasanwendungen am Netz auswirken ([2] S. 34). Zudem bestehen Restriktionen, welche sich aus unterschiedlichen Regelwerken ergeben. Der Grenzwert für Wasserstoff in Tanks von Erdgasfahrzeugen bspw. ist in der DIN 51624 mit 2 Vol.-% angegeben ([3] A.2). Hintergrund ist die Versprödung der Stahltanks in Erdgasfahrzeugen bei höheren Wasserstoffanteilen ([4] S. 415–429).

Darüber hinaus ist davon auszugehen, dass starke tages- und jahreszeitliche Schwankungen der erzeugbaren Wasserstoffmengen auftreten und folglich der Wasserstoffanteil im Erdgasnetz stetigen Änderungen unterworfen sein wird. So geht der geringere Verbrauch in den Sommermonaten mit einem geringeren Gasdurchsatz und einer verminderten Fließgeschwindigkeit einher. Dies führt bei der direkten Wasserstoffeinspeisung zu einer geringeren Vermischung mit dem im Netz befindlichen Erdgas, wodurch Wasserstoffblasen und lokale, sehr hohe Wasserstoffkonzentrationen entstehen können. Auch absatzschwache Gasverteilnetze können von diesem Problem betroffen sein ([5] S. 27).

Der Einfluss des Wasserstoffanteils auf die Stoffeigenschaften des Gases im Netz ist in Tabelle 1 dargestellt. Es bedingt die Änderung der Gaszusammensetzung eine Veränderung der Gasgemisch-Eigenschaften. Ein relevanter Faktor ist die Reduktion des Heiz- und Brennwertes mit steigendem Wasserstoffanteil im Gas. Bei einem Anteil von bspw. 10 Vol.-% Wasserstoff sinkt der Heizwert des Gasgemischs um ca. 7 % (vgl. Tabelle 1). Durch volatile Wasserstoffanteile im Gasgemisch entsteht eine Heiz-/ Brennwertschwankung, welche die Abrechnung nach Energiemenge im Endkundenbereich erschwert. Diese Thematik ist offenkundig, stellt jedoch nicht den Kern dieser Studie dar.

Ziel dieses Projekts ist es, den Einfluss von volatilen Wasserstoffanteilen im Erdgas auf die Funktion, die Sicherheit und die Eichgültigkeit von verschiedenen Gaszählerarten zu ermitteln. Wie aus Tabelle 1 ersichtlich, sind neben dem Heiz- und Brennwert auch weitere Gaseigenschaften unmittelbar vom Wasserstoffanteil bzw. der Gaszusammensetzung abhängig. Es betrifft u. a. die Dichte, die Gaskonstante, die kinematische Viskosität sowie die Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität.

Es ist zu vermuten, dass dadurch wiederum die verschiedenen Prinzipien der Volumen(-strom-)messung, gegebenenfalls in unterschiedlicher starker Ausprägung, beeinflusst werden. Die Fehlerkurve mittelbarer Zähler, also Zählern, welche das Volumen ohne Messkammer indirekt bestimmen (Turbinenradzähler, Schraubenradzähler, etc.), ist exemplarisch von der Dichte des Gases abhängig. Bei unmittelbaren oder Verdrängungszählern, also Zählern, welche das Volumen über eine definierte Messkammer bestimmen, sind nach [6] Leckagen durch geringe, im Laufe der Zeit durch Verschleiß des Materials größer werdende Spalte zwischen den festen und beweglichen Bauteilen des Zählers, die maßgebliche Ursache für Messfehler.

Wasserstoffwirkung auf die Gaszählung

Tabelle 1: Überschlägige Berechnung ausgewählter Gemischeigenschaften basierend auf einer Freiburger Erdgasprobe und Wasserstoff. Die Ermittlung der angegebenen Eigenschaften erfolgte mittels CHEMCAD in Version 7.0.3.9212. Bezugsgrößen der sind 20 °C sowie 1,0132 bar (a).

Komponente		M0	M1	M2	M3	M4	M5
Methan	Vol.-%	96,1	86,5	76,9	62,5	48,1	0
Ethan	Vol.-%	2,4	2,2	1,9	1,6	1,2	0
Stickstoff	Vol.-%	0,7	0,6	0,6	0,5	0,4	0
Propan	Vol.-%	0,5	0,5	0,4	0,3	0,3	0
Kohlendioxid	Vol.-%	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0
Wasserstoff	Vol.-%	0	10	20	35	50	100
Stoffwert							
Heizwert	kWh/m ³	10,1	9,4	8,7	7,6	6,6	3
Brennwert	kWh/m ³	11,2	10,5	9,7	8,5	7,4	3,55
Dichte	kg/m ³	0,75	0,68	0,61	0,52	0,42	0,09
Gaskonstante R	J/kg/K	503	551	609	723	893	4128
kin. Viskosität	m ² /s	1,6E-05	1,7E-05	1,9E-05	2,3E-05	2,9E-05	1,1E-04
Wärmeleitfähigkeit	W/m/K	0,032	0,040	0,048	0,062	0,078	0,170
Wärmekapazität	kJ/kg/K	2,17	2,33	2,52	2,90	3,47	14,26

Zusätzlich wird der Realgas- oder Kompressibilitätsfaktor von den veränderlichen Gaseigenschaften beeinflusst. Dieser findet Anwendung, um das Verhalten realer Gase zu beschreiben und ist abhängig vom Druck, dem Volumen oder der spez. Gaskonstante und der Temperatur des Gases (G 685-6, [7]). Gerade bei höheren Drücken sind der Faktor, sowie der Einfluss des Wasserstoffgehalts auf diesen, von Relevanz. Hiervon betroffen ist der klassischerweise im Hochdruckbereich eingesetzte Drehkolbengaszähler.

Im Rahmen von realisierten (DVGW) Forschungsprojekten erfolgten bereits Untersuchungen zu Auswirkungen der Zumischung von Wasserstoff zu Erdgas. Dabei fand einerseits eine Wasserstoffzumischung im Rahmen des aktuellen DVGW-Arbeitsblattes G 260 „Gasbeschaffenheit“ von kleiner als 10 Vol.-%, als auch die Zumischung von höheren Volumenanteilen statt.

In diesem Projekt soll, über die bisherigen Untersuchungen hinausgehend, insbesondere die Problematik einer Zumischung von hohen, volatilen Anteilen von Wasserstoff bis 40 Vol.-% auf die Funktion, Sicherheit und Eichgültigkeit von verschiedenen Gaszählerarten und -größen betrachtet werden. Dafür sind Literaturrecherchen und umfangreiche experimentelle Untersuchungen im DBI-Technikum geplant.

Wasserstoffzumischungen beeinflussen die Viskosität, die Dichte und den Brennwert des Brenngases. Dementsprechend wirken sich mehrere Parameter auf den veränderten Betrieb der Gaszähler aus. Die Auswirkungen hinsichtlich:

- Eichgültigkeit,
- Sicherheit und Dichtheit,
- Dimensionierung,
- Verhalten bei schnellem Gasbeschaffenheits- und Lastwechsel,

sind im Projekt nach Möglichkeit zu untersuchen.

Wasserstoffwirkung auf die Gaszählung

Diese Aussage bezieht sich im Detail auf nachstehend genannte Zählertypen:

- Balgengaszähler,
- Drehkolbengaszähler,
- Turbinenradgaszähler.

Bei den durchzuführenden praxisnahen Untersuchungen ist eine stufenweise Änderung des Wasserstoffanteils von 10 Vol.-% bis 40 Vol.-% vorgesehen. Dafür findet zunächst eine Betrachtung des Standes der Technik und Forschung, dargestellt in Abschnitt 2, statt. Dem schließen sich wesentlich Grundlagen der Gasabrechnung, Gasvolumenstrommessung und Prüfung von Gaszählern an.

Kapitel 3 stellt verschiedene, mögliche Versuchskonzepte gegenüber und bewertet diese, gefolgt von Beschreibung des letztlich umgesetzten Versuchstands und wesentlicher Punkte der Vorgehensweise während der Untersuchungen. Die Darstellung und Diskussion der Ergebnisse der Studie erfolgt in Kapitel 4. Die Zusammenfassung der Studie ist entsprechend in Kapitel 5 wiedergegeben.

Die erreichten Ergebnisse werden in Berichtsform dargestellt und sollen einen Beitrag für die erforderliche Überarbeitung des DVGW-Arbeitsblattes G 260 (Gasbeschaffenheit) und G 685 (Energieabrechnung) in Hinblick auf mögliche Wasserstoffanteile im Erdgasnetz leisten.

Wasserstoffwirkung auf die Gaszählung

2 Stand der Forschung und Technik

Im amtlichen oder geschäftlichen Verkehr gilt für alle Messsysteme in Deutschland eine Eichpflicht nach dem Mess- und Eichgesetz (MessEG, [8] S. 2735) und der Mess- und Eichverordnung (MessEV, [9] S. 2012). Darunter fallen auch alle im amtlichen oder geschäftlichen Verkehr eingesetzten Gaszähler. Werte für die Energie von Gas müssen dabei nach § 33 Abs.1 MessEG i. V. m. § 25 Nummer 4 MessEV nicht direkt gemessen werden. Es ist zulässig, die Energie des Gases nach anerkannten Regeln der Technik zu ermitteln, solange die Ermittlung der dafür verwendeten Messwerte mit einem gültigen Messgerät nach Mess- und Eichgesetz und der Mess- und Eichverordnung erfolgte [10].

Daher existieren auf europäischer und nationaler Ebene verschiedene rechtliche Normen und technische Richtlinien, die deren Prüfung bzw. Eichung beschreiben. Die eingangs beschriebenen Auswirkungen der Wasserstoffeinspeisung auf die Gasgemisch-Eigenschaften können, besonders bei volatilen Wasserstoffanteilen, die im Mess- und Eichgesetz vorgeschriebene Messgenauigkeit der Zähler negativ beeinflussen. Im Folgenden sind die aktuell bekannten Forschungsvorhaben im Zusammenhang mit der Wasserstofftoleranz von Gaszählern aufgeführt. Dem schließt sich der aktuelle Stand der Energieabrechnung beziehungsweise Prüfung von Volumengaszählern an.

2.1 Recherche aktueller Forschungsvorhaben

Mit der Intensivierung der Forschung im Bereich der Wasserstoffeinspeisung in das Erdgasnetz sind auch Bestrebungen aufgekommen, die Auswirkungen des Wasserstoffs auf Volumengaszähler zu untersuchen. Erste Untersuchungen auf diesem Gebiet starteten bereits 2009 im Rahmen des NATURALHY-Projekts. Im Zuge der Untersuchungen wurden Haushalts-Membrangaszähler (Größe G 4) verschiedener Hersteller mit unterschiedlichen Methan-Wasserstoff-Gemischen bis zu 50 Vol.-% Wasserstoff beaufschlagt. Aus den Untersuchungsergebnissen lässt sich eine maximale Abweichung des Gasgemischs zum Referenzgas von 2,7 % ableiten. Die durchgeführten Versuche konnten allerdings auf Grund von Probleme mit dem eingesetzten Versuchsstand nicht reproduziert werden und sind somit nicht validiert [11].

Das aktuellere Projekt NewGasMet aus dem Jahr 2019 führt Durchflussmessungen von erneuerbaren Gasen durch. Laut Ausschreibung sind Untersuchungen mit Biogas, Biomethan, Wasserstoff, Synthesegas und Erdgasmischungen an verschiedenen Gaszählertypen geplant. Dabei ist ein maximaler Wasserstoffanteil von 30 Vol.-% in der Mischung mit Erdgas vorgesehen. Untersuchungsergebnisse dazu sind bisher nicht bekannt. Ziel der Untersuchungen ist die Formulierung von Empfehlungen zur Messung von erneuerbaren Gasen mit angepassten Gasmessstandards [12].

Alle restlichen, aktuell bekannten Forschungsvorhaben richten sich entweder in erster Linie auf Untersuchungen mit reinem (100 %) Wasserstoff (H₂-Netz, MefHySto), die formulierten Mischungsverhältnisse sind nicht dokumentiert oder es ist kein aktueller Bearbeitungsstand bekannt. Eine Übersicht ist in Tabelle 2 gegeben.

Es lässt sich konstatieren, dass die Gaszählung respektive Volumenstrommessung mit reinem Wasserstoff oder Wasserstoffgemischen aktives Feld der Forschung ist. Bisher erfolgte keine Prüfung der Gaszähler mittels Echtgas auf Eichgültigkeit. Zudem weisen auch laufende Forschungsvorhaben Beimengungen bis max. 30 vol.-% Wasserstoff auf. Das hierin beschriebene Forschungsvorhaben hat somit trotz weiterer, bereits abgeschlossener, aktuell laufender oder noch beginnender Forschungsvorhaben Relevanz.

Wasserstoffwirkung auf die Gaszählung

Tabelle 2: Liste aktuell laufender Forschungsvorhaben mit Bezug auf Gaszähler sowie deren Funktionalität unter (vorwiegend reinem) Wasserstoff.

Projekt	Inhalt	Start
NewGasMet	Durchflussmessung von erneuerbaren Gasen laut Auskunft nur 1 relevante Messung mit H ₂ in WP 3[13]	Läuft seit 2019
MefHySto	Messverfahren, Standards, Referenzmethoden und geeignete Materialien für die chemische Speicherung von H ₂ - Messung Zähler läuft mit reinem Wasserstoff [14] S. 25, DBI Projektpartner.	III/2020
H ₂ -Mess-richtigkeit	H ₂ -Messrichtigkeit von Haushalts-Gaszähler – Prüfung inklusive vorgeschalteter Druckregelstrecke mit Stickstoff, Methan, Methan-Wasserstoff-Gemische (bis 30 vol.-%) und Wasserstoff [14] S. 29, PTB	Früh. IV/2020 [15]
PTB-PIGSAR	Hochdruckkalibriernormal – diverse Anpassungen für Gemische mit H ₂ -Anteilen angedacht, unter anderem Modifikation der SGERG-Gleichung zu Berechnung von Realgasfaktoren und Kompressibilitätszahlen, noch keine umgesetzt [16]	Unklar
H ₂ -Netz	Errichtung und Betrieb einer Verteilnetzstruktur im Chemiepark Bitterfeld-Wolfen für reinen Wasserstoff – Prüfung von Balgengaszählern mit reinem Wasserstoff mittels Referenzzähler [14] S. 33	läuft
DNV GL labs Groningen	Umbau Versuchstrecke für Test von Industriegaszählern mit Echtgas, Rohrprüfstrecke	unklar

2.2 Gasabrechnung nach DVGW Arbeitsblättern G 685-1 bis -6

Die Gasabrechnung ist in ihrer Gesamtheit in den DVGW Arbeitsblättern G685-1 bis -6 definiert [7, 10, 17–20]. Die abzurechnende Energie ergibt sich als Produkt aus Abrechnungsbrennwert und Volumen im Normzustand. Findet der Bezug auf dieser Energie auf eine Zeitspanne statt, ergibt sich der eigentlich abzurechnende Verbrauchspreis [10].

Im Zuge der Abrechnung wird zwischen Betriebs- und Normzustand unterschieden. Der Betriebszustand ist der Zustand des Gases im Zähler und wird durch die vorliegenden Werte von Druck und Temperatur bestimmt. Die Abrechnung erfolgt jedoch auf der Grundlage des Normzustandes. Daher muss das Volumen im Betriebszustand auf ein Volumen im Normzustand umgerechnet werden. Dieses findet durch Multiplikation des Volumens im Betriebszustand mit der Zustandszahl statt, welche bezogen auf die Messlokation zu ermitteln ist.

Die Zustandszahl ist dabei abhängig von der Norm- und Abrechnungstemperatur, dem Norm- und Effektivdruck, dem Wasserdampfpartialdruck sowie der Kompressibilitätszahl (G 685-3, [20]). Die Kompressibilitätszahl dient zur Beschreibung des abweichenden Verhaltens realer Gase von idealen Gasen. Sie ist definiert als der Quotient aus den Realgasfaktoren des Gases im Betriebszustand und im Normzustand [685-1].

Der Realgasfaktor und die Kompressibilitätszahl berechnen sich nach den Verfahren SGERG-88 und AGA8-92DC (G685-6, [7]). Der Wasserstoffanteil ist dabei auf einen Stoffmengenanteil von 0,1 im Erdgas begrenzt. Da die Abweichungen im Realgasfaktor bis 50 bar Gasdruck jedoch weniger als $\pm 0,1$ % (ohne CO-Korrektur) betragen, hat die Änderung des Realgasfaktors für die geplanten Untersuchungen keine Relevanz. Für die industrielle Anwendung im Hochdruckbereich ist die Änderung allerdings zu beachten.

Wasserstoffwirkung auf die Gaszählung

Der Abrechnungsbrennwert wird vom Netzbetreiber mittels Geräten oder Verfahren bestimmt, die dem Mess- und Eichgesetz unterliegen. Die Ermittlung des Brennwertes kann unterschiedlich erfolgen. Rekonstruktions-systeme sowie Ersatzverfahren wie z.B. Gasbeschaffenheitsnachverfolgung und Mittelwertverfahren sind unter Auflagen zulässig. Bei der Gasbeschaffenheitsnachverfolgung lassen sich die Abrechnungsbrennwerte aus den unterschiedlichen Einspeisebrennwerten dynamisch berechnen.

Neben dem Brennwert sind auch weitere Gasbeschaffenheitswerte wie z.B. die Normdichte, der Stoffmengen-anteil CO₂ oder der Wasserstoffanteil anwendbar, insofern die entsprechenden Messwerte an den Einspeise-punkten vorliegen. Die nötigen Eingangsdaten vorausgesetzt (Netztopologie, Brennwerte, Volumina an den Ein- und Ausspeisepunkten, Netzdrücke und Schieberstellungen) ist über eine strömungstechnische Berechnung der Strömungszustand im gesamten Netz berechenbar. Dies beinhaltet u. a. die Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit für jedes Rohrelement sowie die zeitliche und örtliche Verteilung der Gasbeschaffenheit im Netz.

Damit kann jeder Ausspeisestelle ein individueller Brennwert zugeordnet werden (G685-2, [19]). Beim Mittelwertverfahren wird der Monatsabrechnungsbrennwert eines Brennwertbezirkes durch die mengengewichtete Mittelung aus den Einspeisebrennwerten und den Einspeisemengen errechnet. Beide Ersatzverfahren sind allerdings nur dann zulässig, wenn sich in dem betreffenden Brennwertbezirk kein Einspeisebrennwert um mehr als 2 % vom Abrechnungsbrennwert unterscheidet (sogenannte „2 %-Grenze“). Stark volatile Wasserstoffanteile im Netz führen zu Brennertschwankungen (siehe Tabelle 1 – Brennwert) und können die 2 %-Grenze dadurch gefährden.

Für eine einwandfreie Abrechnung im Haushalts- und Kleingewerbebereich ist eine genaue Ermittlung des Volumens im Normzustand sowie des Abrechnungsbrennwerts notwendig.

2.3 Gasvolumenstrommessung mittels Gaszählern

Für die Überwachung, Regelung, Führung und Beurteilung vieler technischer Prozesse ist das Messen von Volumenströmen fluider Stoffe von entscheidender Bedeutung. Es existiert eine Vielzahl von Durchfluss- und Mengen-Messprinzipien basierend auf unterschiedlichsten Wirkprinzipien. Eine Übersicht der Einteilung der unterschiedlichen Zähler ist in Abbildung 1 dargestellt.

Zu den gängigsten Verfahren, welche die Menge respektive den Durchfluss (Volumen- oder den Massedurchfluss) von gasförmigen Stoffen messen, zählen neben den anvisierten Prüflingen mittelbar arbeitende Flügelradzähler, unmittelbar messende Ovalradzähler, Ultraschaldurchflussmesser sowie Coriolis Massemesser. Nicht alle Bauarten sind für den eichpflichtigen Betrieb geeignet – alle bringen aber spezifische Vor- und Nachteile mit sich.

Das Prinzip von unmittelbaren Verdrängungszählern beruht auf beweglichen Messwänden, welche das zu messende Medium antreibt – die Messkammern (siehe Abbildung 2 Seite 14) der Zähler dieser Bauart füllen und entleeren sich also periodisch. Sowohl Balgen- als auch Drehkolbengaszähler sind diesem Messprinzip zuzuordnen. Bei Balgengaszähler findet die Übertragung der entstehenden Bewegung per Gestänge auf ein Getriebe statt, welches magnetisch an das eigentliche Zählwerk gekoppelt ist. Beim Drehkolbengaszähler übernehmen diese Aufgaben (justierbare Fein-) Getriebe [21].

Wasserstoffwirkung auf die Gaszählung

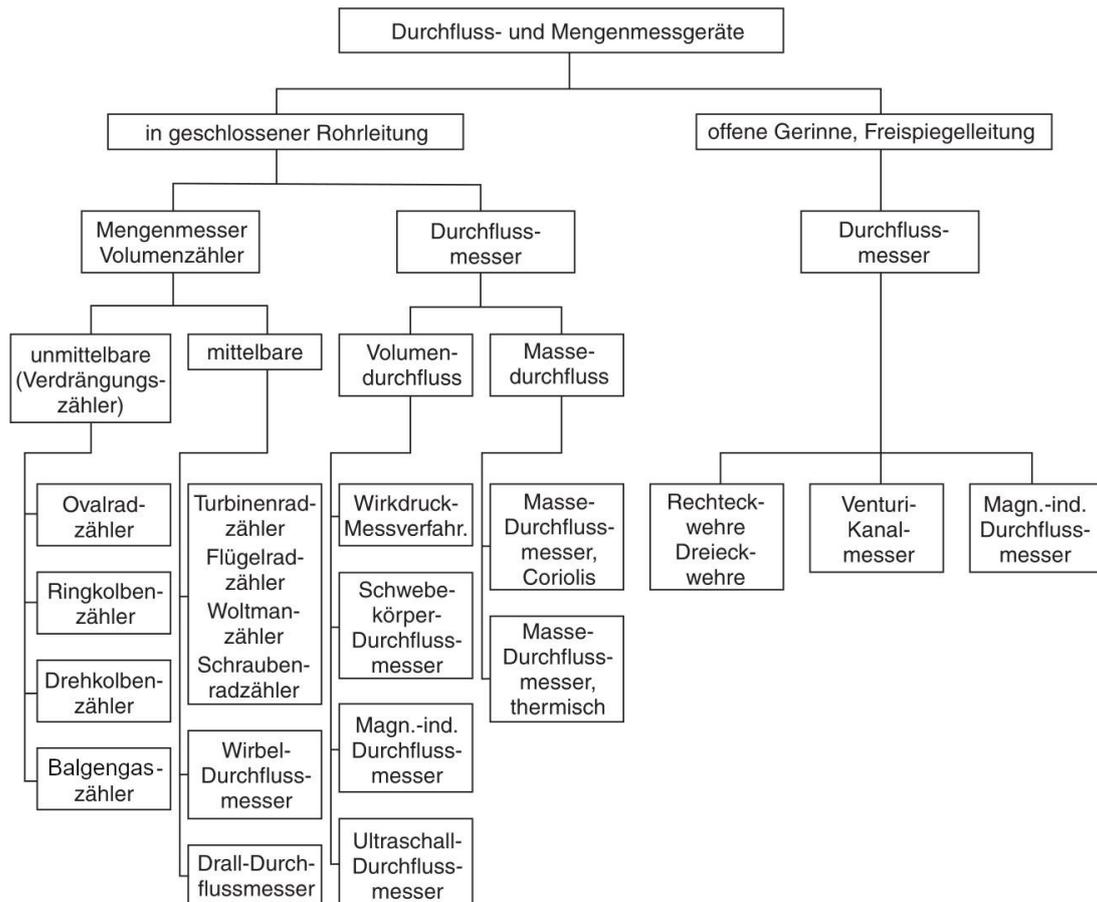


Abbildung 1: Einteilung von Messgeräten zur Durchfluss- und Mengenmessung nach [21].

Bauartbedingt weisen Verdrängungszähler vergleichsweise hohe Ungenauigkeiten auf, sind aber andererseits unbeeinflusst von Schwankungen der Gasdichte. Balgengaszähler sind zudem robust gegen rasche Druck- und Durchflussschwankungen und haben eine weite Messspanne. Drehkolbengaszähler sind prinzipiell in beiden Richtungen durchströmbar und weisen unter normalen Betriebsbedingungen eine über einen weiten Bereich konstante Fehlerkurve auf, können aber fehlerhaft eingebaut über die Eigenresonanz des Gaszähler Schwingungen in angeschlossenen Leitungssystem und den folgend im Extremfall stehenden Wellen in das Messsystem induzieren [22], was sich auf die Ergebnisse auswirkt. Weitere wesentliche Eigenschaften dieser Gaszähler sind aus Gründen der Übersichtlichkeit in Tabelle 3 auf Seite 14 dargestellt.

Wasserstoffwirkung auf die Gaszählung

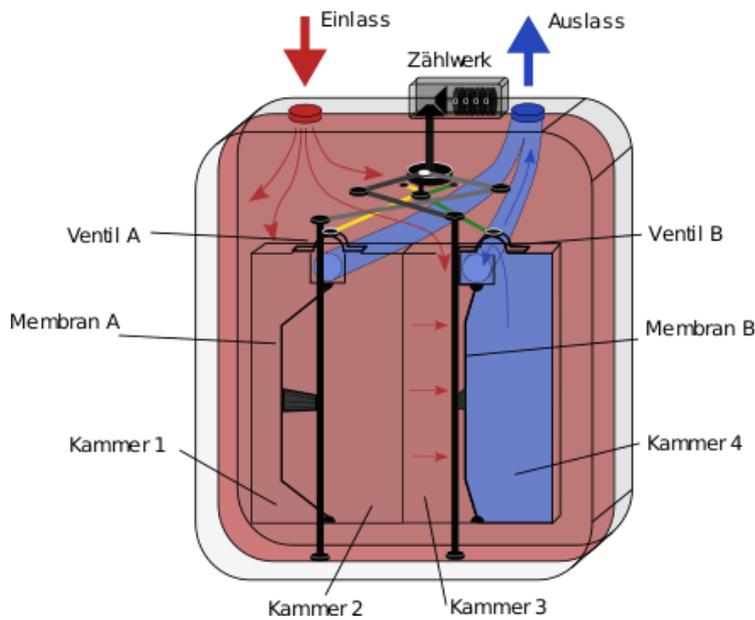


Abbildung 2: Aufbau eines Balgengaszählers von Ludwig Eisenbeis, lizenziert unter CC BY-SA 4.0 [29].

Ebenso bedingt durch den Aufbau von Verdrängungszählern entstehen, maßgeblich verursacht durch Leckagen zwischen den festen und den beweglichen Komponenten, Messfehler des Zählers. Spaltverluste sind von der Viskosität des strömenden Fluides sowie durch dessen strömungsmechanisches Verhalten bestimmt. Solche Verluste vergrößern sich mit zunehmendem Verschleiß des Materials im Laufe der Nutzung. Eine (zeitweilige) Überlastung des Zählers fördert derartige Verschleißerscheinungen weiter [6]. Ferner sind die beweglichen Bauteile von Verdrängungszählern anfällig gegen Verschmutzung, weshalb eine entsprechende Filtration vorteilhaft ist [6].

Tabelle 3: Essentielle Eigenschaften und Wirkungen von Faktoren auf die zu untersuchenden Gaszählertypen nach [22].

Anwendbare Faktoren	Balgengaszähler	Drehkolbengaszähler	Turbinenradgaszähler
Genauigkeit	-	-	++
Gasdichte unter Betriebsbedingungen	kein Einfluss, da der maximale Betriebsdruck ≤ 500 mbar ist	unbeeinflusst über festgelegten Dichtebereich	Messbereich vergrößert sich bei steigender Dichte
Druckverlust (bezogen auf Luft)	niedrig in der Regel 2 mbar bis 4 mbar	niedrig in der Regel 2 mbar bis 5 mbar	mittel maximal 25 mbar
Rasche Druck- und Durchflussschwankungen	unbedeutend	maximal zulässige Rate 350 mbar/s	maximal zulässige Rate 350 mbar/s
Typ. Messbereich innerhalb der Fehlergrenzen	150:1	20:1 bis 160:1	20:1 bis 30:1
Pulsierender Durchfluss	Messung unbeeinflusst	kann Messfehler verursachen	kann Messfehler verursachen
Überlast	Überlast kurzzeitig möglich, entsprechend der Norm	Überlast kurzzeitig möglich, entsprechend der Norm	Überlast kurzzeitig möglich, entsprechend der Norm
Produktnorm	EN 1359	EN 12480	EN 12261

Wasserstoffwirkung auf die Gaszählung

Bei Turbinenradzähler setzt das strömende Gas ein leichtläufiges Turbinenmessrad in Rotation. Die Umdrehungsanzahl dieses Rades ist proportional zum durchgeströmten Gasvolumen und die Frequenz der Umdrehung verhältnismäßig dem Durchfluss [21]. Damit ist der Turbinenradzähler ein mittelbares bzw. indirektes Volumenmessgerät. Die Drehzahl wird dabei berührungslos über eine Magnetkopplung oder eine Induktionsspule gemessen. Das Messprinzip bedingt dabei eine gewisse Mindestdurchflussmenge, um eine hohe Genauigkeit zu erzielen.

Turbinenradzähler liefern sehr gut reproduzierbare Messergebnisse und sind ausgewiesen langzeitstabil. Von daher finden diese Zähler oftmals auch Anwendung als Sekundärnormal in Zählerprüfständen und kommen vorwiegend bei hohen Drücken und großen Volumenströmen zum Einsatz. Andererseits ist dabei ein ungestörtes Einlaufprofil unabdingbar. Auch sind Turbinenradzähler verhältnismäßig empfindlich gegen Verschmutzungen. Rasche Schwankungen des Durchflusses verursachen bei diesem Zählertyp Messfehler – insbesondere rasche Durchflussverringerungen führen zu überbewertenden Ablesewerten.

Es ist in Summe der genannten Eigenschaften nicht verwunderlich, dass der robuste, hinreichend genaue und preiswert herzustellende Balgengaszähler die Geräteverteilung in Deutschland, bedingt vor allem durch die große Anzahl an Haushaltsgaszählern, dominiert (siehe Abbildung 3). Festzuhalten bleibt aber auch, dass das Angebot an alternativen Zählertypen, wie den ursprünglich für die Untersuchung anvisierten Drehkolben- und Turbinenradzählern gering ausfällt.

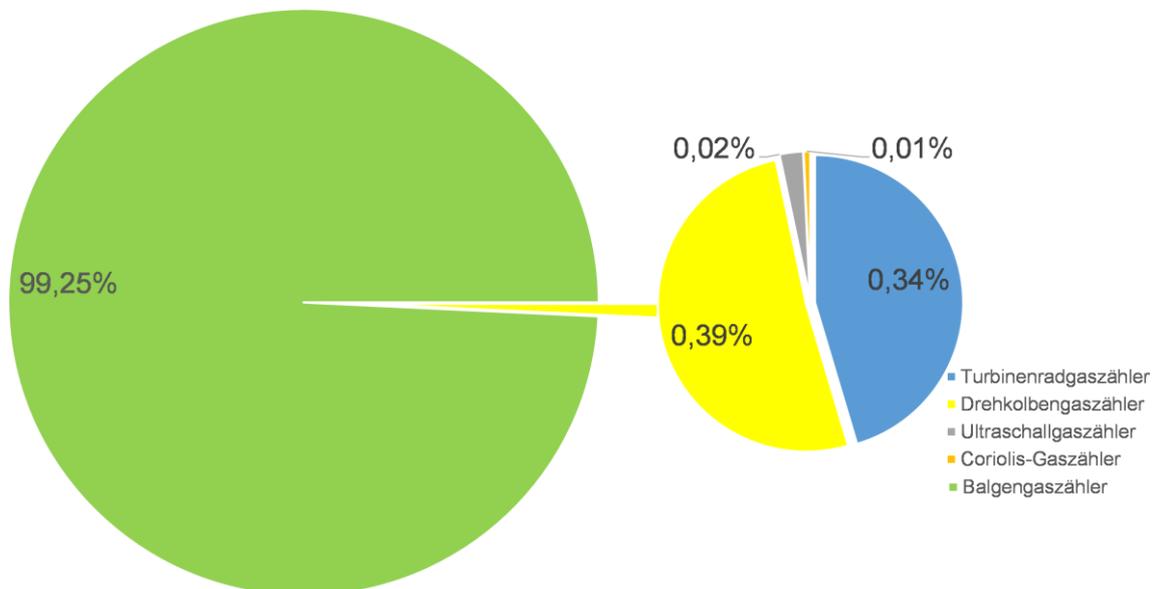


Abbildung 3: Geräteverteilung in Deutschland, kulminiert über maßgebliche Marktteilnehmer basierend auf im Rahmen des laufenden Projektes „H2-Kompendium für Gasnetze“ [14], zusammengefasst für Haushalt, Gewerbe und Industrie.

So sind marktfähige Drehkolbengaszähler in Zählergrößen G 16 und größer [23] verfügbar. Auch Sonderbauten dieser Zählertyps reichen lediglich hinab bis auf $3\text{ m}^3/\text{h}$. Somit lässt sich zumindest die untere, für die Untersuchungen anvisierte Grenze des Volumenstroms (Q_{\min} (G 2,5 = $0,025\text{ m}^3/\text{h}$) nicht überprüfen. Zudem ist im Rahmen dieses Projektes ein Neukauf eines solchen, noch zu kalibrierenden Sonderbaus nicht zu realisieren. Ein ähnliches Bild zeigt sich für Turbinenradzählern, wodurch sich die anstehenden Untersuchungen nunmehr auf Balgengaszähler beschränken.

Nichtsdestotrotz können wegen des, wie anfangs geschildert, zunehmenden Einsatzes von Wasserstoff bereits kleine Messfehler nicht nur bei den marktdominierenden Balgengaszählern signifikante wirtschaftliche Nachteile verursachen. Dies betrifft die Messung von Prozessgasen als auch Messungen im Zusammenhang mit der Wasserstoffeinspeisung in das Erdgasnetz sowie die eichpflichtige Abrechnung der Verbraucher [23].

Wasserstoffwirkung auf die Gaszählung

2.4 Grundlegendes zur Prüfung von Volumengaszählern

Wie bereits erwähnt, dienen Gaszähler der Energieabrechnung und sind deshalb eichpflichtige Geräte, welche genormten Prüfverfahren unterliegen. Die vorliegende Untersuchung orientiert sich wesentlich an den Vorgaben der PTB Prüfregeln [24] und EU Richtlinie 2014/32/EU [25]. Der Vollständigkeit halber fand zusätzlich eine Eruiierung vergleichbarer Normen des europäischen Ausland statt [26–28].

Die EU Richtlinie 2014/32/EU definiert Anforderungen an Gaszähler im Allgemeinen und an Balgengaszähler im Speziellen. Die wesentlichen Vorgaben an die Mindestbedingungen Durchflussbereich, erlaubte Abweichung von Balgengaszähler bei der Eichung und zu realisierende Durchflüsse bei der Eichprüfung von Balgengaszählern fassen Tabelle 4 - Tabelle 6 zusammen.

Klasse	Q_{\max}/Q_{\min}	Q_{\max}/Q_t	Q_r/Q_{\max}
1,5	≥ 150	≥ 10	1,2
1,0	≥ 20	≥ 5	1,2

Tabelle 4: Mindestbedingungen Durchflussbereich gemäß Richtlinie 2014/32/EU Anhang 1 [25].

Klasse	1,5	1
$Q_{\min} \leq Q < Q_t$	3%	2%
$Q_t \leq Q \leq Q_{\max}$	1,5%	1%

Tabelle 5: Erlaubte Abweichung von Balgengaszähler bei der Eichung gemäß Anhang 1 der Richtlinie EU 2014 / 32 / EU [25].

Zählergröße	Q_{\min} m ³ /h	Q_{tr} m ³ /h	Q_{\max} m ³ /h
G 2,5	0,025	0,8	4
G 4	0,04	1,2	6

Tabelle 6: Zu realisierende Durchflüsse für die Eichprüfung von Balgengaszählern der Zählergrößen G 2,5 und G 4 [25].

Für den Haushalts- und Gewerbebereich ist im Wesentlichen die Klasse 1,5 ausreichend. Somit ergibt sich für die Balgengaszähler je Größenkategorie ein zu realisierender Volumenstrombereich von 1:150 (siehe Tabelle 4) aus den vorgegebenen maximalen (Q_{\max}) und minimalen Volumenströmen (Q_{\min}). Auch ist anhand der Tabelle 4 ersichtlich, dass ein Balgengaszähler kurzzeitig 20 % (Q_r/Q_{\max}) Überlast vertragen muss. Bei einer Prüfung von Balgengaszählern sind mindestens 3 Stützpunkte zu realisieren. Diesen liegen unterhalb des je Größenklasse definierten Q_{\min} , oberhalb des Übergangs- oder Trennbereichs (Q_t , $Q_{\max}/Q_t > 10$, üblich sind 20) und dem maximalen Durchfluss.

Die gesamte Messkette muss eine Unsicherheit aufweisen, die Faktor 3 kleiner ist als die Fehlergrenze, um die Bewertung der Eichgültigkeit zu ermöglichen [25]. Mit Verweis auf die in Tabelle 5 angegebenen erlaubten Abweichungen der Balgengaszähler bedeutet dies, dass die Ungenauigkeit der Messung ($Q_t \leq Q \leq Q_{\max}$) besser als 0,5 % liegen soll. Für die Untersuchungen ist somit ein auf die Versuchsbedingungen kalibriertes Arbeitsnormal zur Realisierung des Durchflussbereichs (Q_{\min} G 2,5 zu Q_{\max} G 4 entspricht 1:240) nötig.

Standard bei einer Prüfung der Eichfehlergrenze von Balgengaszählern ist je nach abzubildenden Volumenstrombereich eine bestimmte Anzahl von parallel schaltbaren kritischen Düsen (sogenannte Düsenstaffeln). Für den eben genannten Volumenstrombereich entspricht dies 8 bis 10 Stück, die laut Auskunft eines Herstellers 10 – 15 k€ (ohne Kalibrierung) kosten. Dies lässt sich im Rahmen der Untersuchung nicht umsetzen.

Eine Prüfung oder vielmehr Eichung von Gaszählern erfolgt im Allgemeinen mit Luft, welches eine gewisse Anzahl an Prüflingen sowie das Normal oder die Normale durchströmt. Üblicherweise findet sich ein Sauggebläse auf der Ausgangsseite, d.h. stromabwärts hinter den Prüflingen und dem Normal [29]. Jeder Prüfling wird also mit Umgebungsluft durchströmt und der gemessene Volumenstrom mit dem des Arbeits- bzw. Gebrauchsnormals verglichen.

Wasserstoffwirkung auf die Gaszählung

Für Gebrauchsnormale bedeutet dies normalerweise eine Kalibrierung gegen ein TransfERNormal, welches seinerseits gegen nationale Primär- oder Sekundärnormale zu kalibrieren ist. Am Ende dieser Kette steht also ein auf SI-Einheiten rückführbares, hochpräzises Messgerät. Zum Zeitpunkt der Realisierung dieser Untersuchung ist oder war ein nationales Primärnormal für Echtgaskalibrierung weder im Niederdruck noch im Hochdruckbereich verfügbar [15].

Bei Einhaltung der Vorgaben resultierend aus den PTB Prüfregeln [24] und EU Richtlinie 2014/32/EU [25] berechnet sich der Fehler des Prüflings (f_{Pr}) wie folgt:

$$f_{Pr} = \left[\frac{\dot{Q}_{Pr}}{\dot{Q}_N} \times \frac{p_{Pr} T_N}{p_N T_{Pr}} \times \left(1 + \frac{f_N}{100} \right) - 1 \right] \quad \text{Formel 1}$$

Neben Volumenströmen (\dot{Q}) sind also Druck (p) und Temperatur (T) vor Prüfling (Pr) respektive Normal (N) zu erfassen, um etwaige Änderungen durch Druckverluste und Umgebungsbedingungen zu kompensieren. Zudem erfordert die Prüfung von Gaszählern, im vorliegenden Fall BGZ verschiedener Größen, Anforderungen an weitere Prüfmittel, Umgebungsbedingungen (Räumlichkeiten), Prüfdurchführung an sich als auch Fehlerrechnung, die allesamt für die eichgerechte Prüfung von Balgengaszählern einzuhalten sind und in die Versuchsplanung eingehen.

2.5 Zusammenfassung zum Stand der Forschung und Technik

Die Gaszählung mit reinem Wasserstoff oder Wasserstoffgemischen ist aktives Feld der Forschung. Zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichts sind keine Untersuchungen von Gaszähler auf Eichgültigkeit bei Verwendung von Echtgas bekannt. Bisherige Untersuchungen beschränkten sich auf max. 30°Vol.-% beigemengten Wasserstoff (restliche 70 Vol.-% Methan). Dementsprechend hat die Aufgabenstellung weiterhin absolut Relevanz.

Die Gasvolumenstrommessung stellt einen essenziellen Teil der Energieabrechnung dar. Daraus resultiert, dass die Prüfung der Geräte diversen rechtlichen Normen und technischen (Prüf-)Regeln unterworfen ist, unter anderem der Richtlinie 2014/32/EU, dem Eichgesetz und den PTB-Prüfregeln für Volumengaszähler.

Der deutsche Markt wird aufgrund der Vielzahl von Anschlüssen im Haushalts- und Kleingewerbebereich (bis Zählergröße G 10) von Balgengaszählern dominiert. Weitere Zählerbauarten sind lediglich als Sonderanfertigungen verfügbar, deren Anschaffung sich im Rahmen dieses Projektes aus ökonomischen Gründen nicht realisieren ließ.

Zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichts existiert in Deutschland ebenso kein nationales Primärnormal zur Echtgaskalibrierung im Nieder- beziehungsweise Hochdruckbereich. Dem folgend stehen keine Gebrauchsnormale bereit. Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) steht mit Ihren Arbeiten diesbezüglich zum Beispiel im Rahmen des H₂-Messrichtigkeit Projektes noch an den Anfängen [15]. Daraus ergibt sich weiter, dass für die anstehenden Untersuchungen keinesfalls ein Standardweg gemäß PTB-Prüfregeln beschritten werden kann.

Wasserstoffwirkung auf die Gaszählung

3 Konzeption und Durchführung des Prüfprogramms

3.1 Eruierte Versuchsdurchführungen sowie Abwägung der jeweiligen Vor- und Nachteile

Wie abschließend im Abschnitt 2.5 erwähnt, lassen sich Prüfaufbauten, zu wählende Messmittel etc. nicht 1:1 für die geplanten Untersuchungen übertragen. Von daher fand eine Analyse verschiedener, möglicher Aufbauten statt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind die zugehörigen Darstellungen in Anhang 1 und Anhang 2 auf Seite 35 respektive 35 dargestellt. An dieser Stelle folgen eine kurze Zusammenfassung und Gegenüberstellung der wesentlichen Vor- und Nachteile.

Beiden folgend detaillierter diskutierten Konzepten gleich ist die Verwendung von Rein- und Mischgasen aus einer Gasflasche. Dies ermöglicht eine gleichbleibende Gaszusammensetzung auch bei Unterbrechung oder Wiederholung von Versuchen, geht allerdings auch einher mit gesteigerten Kosten für den Erwerb der Medien und Miete der zugehörigen Transportbehälter.

3.1.1 Konzept 1 – Kreislaufströmung plus Flaschengas (Anhang 1 S. 35)

Der Versuchstand besteht bei diesem Konzept aus einem geschlossenen Kreislauf, dessen Füllung zu Beginn des Versuches mit dem entsprechenden Gas (Fluid) erfolgt. Das für den Versuch vorgesehene Gemisch wird durch einen Verdichter im Kreis geführt und mittels Wärmeübertrager und zugehörigem Gebläse möglichst auf Raumtemperatur gehalten. Dadurch verringern sich Wärmeübergänge vom strömenden Fluid auf die Umgebung oder umgekehrt. Dies wiederum minimiert Ungenauigkeiten verursacht durch temperaturinduzierte Dichteänderungen beziehungsweise Entmischungen der Phasen. Ein derartiger Versuchsaufbau ist für geringe Unsicherheiten bei der Versuchsdurchführung und damit möglichst exakte Messergebnisse anzustreben. Zudem erscheint diese Variante aus der ökologischen Perspektive als adäquat.

- | | |
|---|---|
| + minimaler Gasverbrauch / Brennstoffkosten | – regelungstechnisch aufwendiger |
| + vergleichsweise konstante Temperatur | – zusätzliche Kosten Verdichter / Wärmeübertrager / Gebläse |

Mit einem derartigen Versuchsaufbau gehen jedoch sowohl gesteigerte Kosten für den notwendigen Verdichter / das erforderliche Gebläse und weitere zu beschaffende Bauteile wie Wärmeübertrager und auch ein gesteigerter, regelungstechnischer Aufwand einher. Nachteilig bei diesem Konzept ist zudem, dass es sensibler für etwaige Leckagen ist.

3.1.2 Konzept 2 – Offene Ausströmung plus Flaschengas (Anhang 2 S. 35)

Der wesentliche Verfahrensunterschied zu Konzept 1 besteht in der freien Ausströmung des Gases oder der Gasmischung nach der Prüfstrecke mit anschließender thermischer Verwertung. Dadurch ergibt sich zum einen ein verringerter regelungstechnischer Aufwand. Zum anderen entfallen einige, wenn nicht im Bestand bereits enthaltene, noch zu beschaffende Bauteile.

- | | |
|--|---|
| + Regelungstechnisch weniger aufwendig | – Für Dauerversuche erhöhte Kosten |
| + Einfacherer Aufbau mit weniger Komponenten | – Expansion aus Gasflasche führt zu Temperaturabnahme des Fluides |

Wasserstoffwirkung auf die Gaszählung

Auch für dieses Konzept ist eine entsprechende Temperierung vorzusehen, da bei direkter Expansion größeren Mengen aus dem Druckbehälter sich das Gas schneller abkühlt als Wärmeenergie ins Innere des Druckbehälters gelangt, um diesen Prozess auszugleichen. Nichtsdestotrotz stellt es eine wesentliche Vereinfachung im Aufbau dar.

3.1.3 Finale Beurteilung der Konzepte unter Berücksichtigung vorhandenen beziehungsweise zu beschaffender Messmittel

Für eine Prüfung der Eichfähigkeit ist ein entsprechend kalibriertes Arbeitsnormal zwingend erforderlich. Dies ist mit Verweis auf 2.3 auf Seite 12ff durch eine Sonderanfertigung eines Drehkolbenzählers (Flowmetergroup, FMR-M16 DN20 PN10 0.4dm³; 0,05-10 m³/h), welcher mittels Echtgas kalibriert ist, realisierbar. Nach Gesprächen mit dem Lieferanten sowie Nutzern ist festzuhalten, dass besagter Drehkolbenzähler die erforderliche Genauigkeit für den Volumenstrombereich von 2-10 m³/h besitzt. Ein entsprechendes Angebot für den Erwerb eines Drehkolbenzählers liegt vor. Es lässt sich aufgrund beschränkter Ressourcen im Rahmen dieses Projekts nicht realisieren, gleichfalls der Drehkolbenzähler nicht kalibrieren.

Analog gilt dies bei separat zu beschaffenden Prüfmitteln für geringere Volumenströme, umsetzbar zum Beispiel durch Laminar Flow Elemente (LEF; TetraTec, Serie LDS; 0,015 - 2 m³/h). Hier kommt hinzu, dass trotz Interesse seitens entsprechender Anbieter der genannte Zeithorizont zur Kalibrierung solcher Gerätschaften von mindestens 12 Monaten nicht zur Laufzeit dieses Projektes passt [30]. Andere gegebenenfalls nutzbare Messprinzipien, so auch kritische Düsen (also Staffel zur Bereitstellung des benötigten Durchflussbereichs), scheiden wegen nicht vorhandener oder nicht hinreichend erforschter Stoffdaten der für die Untersuchung anvisierten Gemische aus.

Es ist ferner zu konstatieren, dass aktuell kein offizielles Primärnormal und dem folgend keine Transfer- / Arbeitsnormale (siehe Abschnitt 2.3) verfügbar sind [31]. Zwar besteht nach intensiven Bemühungen die Möglichkeit der Kalibrierung eines bereitzustellenden Volumengaszählers (siehe vorheriger Absatz) seitens der Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) für ausgewählte und genau definierte Gasmischungen, dies scheitert jedoch am verfügbaren Kostenrahmen.

Ein weiteres, bisher nicht tiefer diskutiertes Konzept, stellt die separate Messung von Reingasströmen dar, welche anschließend gemischt als Summe der Einzelströme den gesuchten Gesamtvolumenstrom ergeben. Die DBI-Gruppe besitzt eine eigene Gasmischstation, welche Volumenströme bis zirka 200 l/min oder auch 12 m³/h bereitstellen kann. Jedoch ist es zum einen nicht möglich die gewünschten 40 % Wasserstoff für den Prüfvolumenstrom eines Balgengaszählers der Baugröße G 6 (entspricht 66,7 l/min Wasserstoff) beizumengen. Zum anderen weisen die installierten Massendurchflussregler (MFC) vergleichsweise hohe Ungenauigkeiten auf, sodass für die Bestimmung des Gesamtvolumenstroms nach wie vor eine Referenz benötigt wird.

Die DBI-Gruppe nutzt zur Bestimmung von Erdgasvolumenströmen als zertifizierte Prüfstelle im Rahmen von Geräteprüfungen Trommelgaszähler unterschiedlicher Messvolumina. Diese Zählerbauart war zu Zeiten der Stadtgaserzeugung sowie -nutzung als Normal üblich, ist dem Vernehmen nach in Hongkong [32] „für die volumetrische Zählung von Stadtgas heute noch“ in Gebrauch [33]. Theoretisch geeignete Messmittel zur Volumengaszählung sind demnach vorhanden. Da die Kalibrierung der vorhandenen Zähler standardisiert mittels dem Prüfmedium Luft stattfindet, sind jedoch keine Aussagen zur Messgenauigkeit bei Verwendung von Gasgemischen möglich.

Somit lässt sich zum jetzigen Zeitpunkt eine Überprüfung der Eichgültigkeit aufgrund nicht zu verwirklichender Anforderungen an die Messgenauigkeit nicht umsetzen. Durch geschickte Versuchsführung ist es jedoch möglich, qualitative Aussagen zur Thematik zu gewinnen. So werden nach tiefgreifender Recherche sowie Abwägung von Aufwand und Nutzen vergleichende Messungen mit Luft (zur Überprüfung der Referenz), Erdgas (als Referenz) und mit Gemischen aus Erdgas mit (hohem) Wasserstoffanteil angestrebt, um qualitative Aussagen zu gewinnen.

Wasserstoffwirkung auf die Gaszählung

3.2 Beschreibung des umgesetzten Versuchstandes

Allen Widrigkeiten zum Trotz ist es gelungen, Gaszählerprüfungen mit Echtgas bei einem Wasserstoffanteil (H_2) von 40 Vol.-% durchzuführen. Schematisch und bildlich ist der dafür gewählte Versuchsaufbau in Abbildung 4 respektive Abbildung 5 dargestellt. Kern des Versuchsaufbaus sind die von der Gas Service Freiberg GmbH zur Verfügung gestellte Prüfstrecke QF 10-6 der Firma Elster mit 6 in Reihe befindlichen Messplätzen für Balgengaszähler bis zu einer Baugröße G6 sowie die vom hausinternen DVGW - Prüflaboratorium Energie im Rahmen der Studie für die Untersuchungen überlassenen Trommelgaszähler (TGZ) der Firma Ritter.

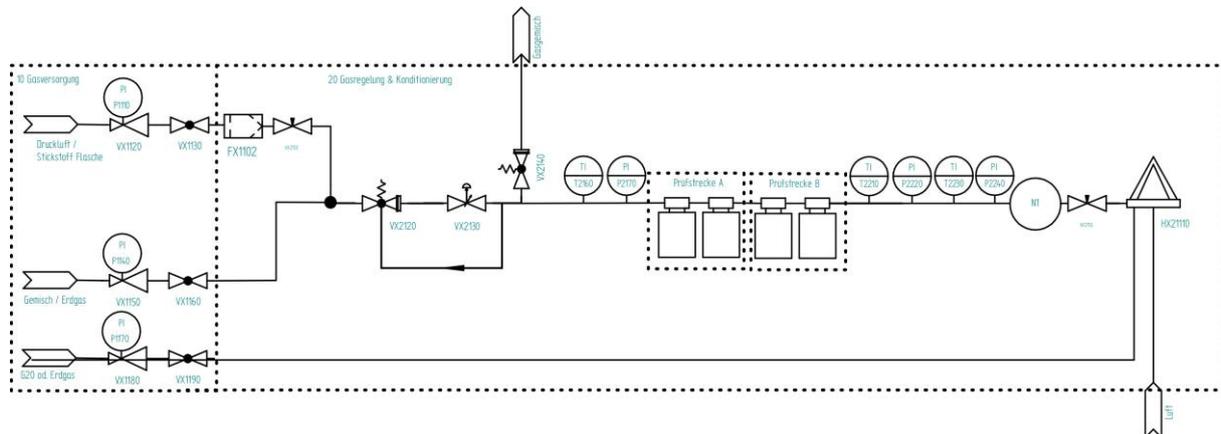


Abbildung 4: Rohrleitungs- und Instrumentenfließschema der final umgesetzten Version des Versuchstandes.

Vom Grundsatz her ähnelt der Versuchsaufbau dem diskutierten Konzept 2 – die Bereitstellung von Erdgas beziehungsweise den Prüfgemischen verwirklicht die bereits installierte Gasmischstation. Die Nutzung des bestehenden Rohrleitungssystems bei der Zuführung der Brenngase ermöglicht die einfache Einbindung bestehender Sicherheitstechnik. Nach dem Durchströmen der Prüfstrecke inklusive der eingebauten Prüflinge erfolgt die Referenzmessung mit Hilfe zweier jeweils für bestimmte Durchflussbereiche ausgelegter, wassergefüllter Trommelgaszähler der Marke Ritter.

Es liegt hierbei kein geschlossenes System vor. Vielmehr erfolgt nach den als Referenz eingesetzten Trommelgaszählern eine freie Ausströmung hin zu einer speziell konstruierten Fackel, welche das abströmende Prüfgas thermisch verwertet. Sowohl am Ein- als auch am Ausgang der Prüfstrecke sowie an beiden Trommelgaszählern finden sich entsprechend kalibrierte Druck- und Temperaturmessdosen – auch dies eine Leihgabe des DVGW - Prüflaboratorium Energie.

Die Datenerfassung für Druck, Temperatur und Impulsmesswerte findet mit zwei separaten, aber synchronisierten Ahlborn Datenloggern statt. Dieses Vorgehen ermöglicht die Erfassung unterschiedlichen Datenraten und damit die bestmögliche Genauigkeit, wie auch eine Prüfung nahe an den bereits erwähnten PTB Prüfregeln [24]. Die Volumina der Balgengaszähler-Prüflinge werden hierbei durch NAMUR-Sensor als Impuls über einem zu definierenden Zeitintervall ermittelt. Die Erfassung von Druck- und Temperaturmesswerten erfolgt hingegen zur Protokollierung etwaiger Driften in enger gesteckten Zeitintervallen.

Die gesamte Prüfstrecke, beginnend von der Gasmischstation bis hin zur Fackel befindet sich in Innenräumen, um größtmögliche Temperaturstabilität während der Versuche zu gewährleisten. Zusätzlich ist der eigentliche Raum der Prüfung gesondert temperiert. Wichtig zu erwähnen ist noch, dass die Einspeisung von (Druck-) Luft sowie im Falle der Echtgasversuche von Stickstoff kurz vor der Prüfstrecke erfolgt. Dies gewährleistet eine flexible Gestaltung des Versuchsprogramms durch einen erleichterten Wechsel der Prüflinge bei minimalem Gasverbrauch.

Wasserstoffwirkung auf die Gaszählung



Abbildung 5: Im Rahmen der Studie genutzter Prüfaufbau - dargestellt sind die Kernkomponenten Prüfstrecke (PF) inklusive Prüflingen (BGZ G4), Druck- und Temperaturlaufnehmer sowie Trommelgaszähler.

Beschriftung der wesentlichen Prüfstreckenkomponenten:

- | | |
|---|---|
| 1. Eingang PF inkl. Druck- & Temperaturmessstelle | 2. PF (6 Messplätze, in Reihe, hier BGZ G4) |
| 3. Zuleitung Gas (Druckluft, Erdgas, Gemisch) | 4. Ausgang PF inkl. Druck- & Temp.-messstelle |
| 5. Trommelgaszähler Ritter TG 5/1 | 6. Trommelgaszähler Ritter TG 25/1 |

Tabelle 7 bildet die basierend auf dem gewählten Vorgehen realisierten Echtmischungen ab. Im Gegensatz zu vorangegangenen Untersuchungen finden die Versuche also mit dem der Versorgungsrealität eher entsprechenden russischen H-Gas statt. Hinzuweisen ist ebenso auf Tabelle 8, welche die für jede Zählergröße angefahrenen Messpunkte zusammenfasst.

Mischung	M1	M2	M3
Druckluft [Vol.-%]	100%	0%	0%
Erdgas [Vol.-%]	0%	100%	60%
Wasserstoff [Vol.-%]	0%	0%	40%

Tabelle 7: Für die Messkampagne definierte Gemischzusammensetzungen in Volumenprozent [Vol.-%].

Wie bereits diskutiert, unterliegt die Nutzung vorhandener Prüf- und Messmittel gewissen Restriktionen, unter anderem Limitierungen seitens der Massedurchflussregler. Der maximale Prüfvolumenstrom eines Balgengaszählers der Baugröße G6 (10 m³/h) lässt sich nur angenähert umsetzen, der korrekte Durchfluss von 10 m³/h oder 166,7 l/min ist nicht realisierbar. In der genutzten Prüfbank lassen sich ferner wegen des fixen Stutzenabstandes der Einspannung nur Balgengaszähler bis zur Baugröße G 6 untersuchen.

Tabelle 8: Für Untersuchungen zu realisierende Volumenströme für die Balgengaszählergröße G2,5 / 4 / 6 / 10.

	Q _{min} [MAX]		Q _{Tr} (10% Q _{max})		Q _{Tr} (20% Q _{max})		Q _{max}	
	m ³ /h	l/min	m ³ /h	l/min	m ³ /h	l/min	m ³ /h	l/min
G 2,5	0,025	0,42	0,4	6,7	0,8	13,3	4	66,7
G 4	0,040	0,67	0,6	10,0	1,2	20,0	6	100,0
G 6 ¹⁾	0,060	1,00	1,0	16,7	2,0	33,3	10	166,7
G 10 ²⁾	0,100	1,67	1,6	26,7	3,20	53,33	16	266,7

Anm. 1) Für den Volumenstrom G6 Q_{max} sind 40 Vol.-% mit vorhandenen Prüfmitteln nicht realisierbar.

Anm. 2) Versuche mit Balgengaszählern der Größe G 10 auf der Prüfbank nicht umsetzbar.

Wasserstoffwirkung auf die Gaszählung

3.3 Versuchsdurchführung

Zusammenhänge und Einflussfaktoren bei der Volumenstrommessung sind vielschichtig und nicht selten kompliziert. Zudem erzielt man auch sorgfältiger Versuchsplanung bei Wiederholungsversuchen höchst unwahrscheinlich identische Messwerte. Dies ist bedingt durch die Wirkung mannigfaltigster Umgebungsbedingungen, Probenunterschiede oder Zufall.

Für eine gezielte, auf das wesentliche fokussierte und trotzdem belastbare Untersuchung fand daher mit den Mitteln der statistischen Versuchsplanung zunächst die Identifizierung von sogenannten Zielgrößen, Einflussgrößen, Störgrößen statt. Die jeweiligen Definitionen sind der gängigen Literatur (beispielsweise [34]) zu entnehmen, werden hier aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht weiter thematisiert.

Als Zielgröße ist für diese Untersuchung die Differenz des Volumenstroms der Balgengaszähler von der Referenz zu sehen, als Einflussgrößen unter anderem die Zusammensetzung der Gasmischung (siehe Tabelle 7 auf Seite 21), der eingestellte Volumenstrom, der Zustand des Balgengaszählers oder dessen Anzahl der Stutzen sowie Baugröße und Messvolumen des Balgengaszählers. Als Störgrößen können Umgebungsdruck und Umgebungstemperatur gelten.

Nach den Methoden der statistischen Versuchsplanung existiert eine Vielzahl an Versuchsplänen, welche die gezielte Untersuchung der Fragestellung ermöglichen. Als geeignet für das Erreichen der Versuchsziele scheint ein faktorieller Versuchsplan mit oben genannten Einflussfaktoren als Faktoren und je nach Faktor 2-5 Stufen. Für die Volumenströme sind dies beispielsweise die in Tabelle 8 auf Seite 21 dargestellten Volumenströme je Größenklasse Q_{\min} , $Q_{Tr,10}$, $Q_{Tr,20}$, und Q_{\max} . Da die Prüfstrecke 6 Messstellen aufweist und somit 6 Ergebnisse je Versuch erfasst werden, lässt sich der resultierenden Versuchsplan weiter optimieren.

In Summe erfolgten mehr als 50 Einzelversuche mit den in Tabelle 9 genannten Gruppen. Dabei fand die Untersuchung von Gruppe 1 und 2 mit allen drei in Tabelle 7 genannten Mischungen statt. Für Gruppe 3 erfolgte aus ökonomischen und ökologischen Gründen lediglich eine Verifizierung mit Mischung 3, also eine Durchströmung mit einem Gemisch aus 40 Vol.-% Wasserstoff und 60 Vol.-% Erdgas.

Tabelle 9: Nach Versuchsgruppen aufgeschlüsselte Messstellenbelegung der Prüfstrecke.

Gruppe	Messstelle					
	1	2	3	4	5	6
1	2,5-1,2I-1-T	2,5-1,2I-1-T	2,5-1,2I-1-T	2,5-1,2I-1-T	2,5-1,2I-1-T	2,5-1,2I-1-T
2	4-1,2I-1-T	4-2I-2-oT*	4-2I-2-T	4-2I-2-T*	4-1,2I-1-T	4-2I-1-T
3	4-1,2I-1-T	2,5-1,2I-1-T	4-2I-2-T	6-3,5I-2-T	6-2I-1-T	6-3,5I-1-T

Schlüssel: X1-X2-X3-X4: X1-Zählergröße; X2-Messkammervolumen; X3-Anzahl Stutzen; X4-o(hne)T(temperaturkompensation); Geräte mit * sind Fabrikneu, alle weiteren Gebraucht.

Wesentliches Versuchsziel aus der Versuchsgruppe 1 stellt die Vergleichbarkeit baugleicher Balgengaszähler auf der Prüfstrecke dar. Gruppe 2 fokussiert auf den Einfluss von Messkammervolumen, Anzahl der Stutzen, Temperaturkompensation der Gaszähler. Gruppe 3 dient der Erueirung des Einflusses der Baugröße des Balgengaszählers, implementiert darüber hinaus die Untersuchung weiterer Faktoren.

Aufgrund mehrerer parallel laufenden Versuche war der Zugriff aus die Gasmische nur zeitweilig gegeben. Auch ist ein solcher Wechsel aus Sicht der statistischen Versuchsplanung zwar wünschenswert, aus ökologischen und ökonomischen Gründen nachteilig. Von daher fanden zunächst alle Versuche mit Mischung M1 statt, wobei zwischen den einzelnen Zielvolumenströmen (siehe Tabelle 8 auf Seite 21) ein Wechsel zwischen den einzelnen Versuchsgruppen, das heißt ein Umbau der Prüflinge, erfolgte. Dies ist bei der Identifizierung etwaiger Wechselwirkungen vorteilhaft.

Wasserstoffwirkung auf die Gaszählung

Um möglichst nah an den PTB-Prüfregeln zu bleiben, fand die eigentliche Zählung des Gasvolumenstroms mittels Drehkreuzen statt, welche an der Prüfstrecke installierte Namur-Sensoren auslösten. Die Impulse wurden dann über ein dem jeweiligen Messvolumen entsprechenden, variablen Zeitintervall ($>1^{\circ}\text{min}$ bis $<20^{\circ}\text{min}$) summiert und per Datenlogger in die Messdatei geschrieben. Zur Mittelwertbildung erfolgte die Erfassung von mindestens fünf Zeitintervallen bei jedoch minimal 15 min Versuchsdauer.

Es sei an dieser Stelle noch angemerkt, dass zwischenzeitlich auch eine Untersuchung einer Mischung mit 20 Vol.-% Wasserstoff angedacht war. Da die Zwischenbetrachtung der Untersuchungen mit Mischung M2 einen eher geringen Einfluss auf die Zählgenauigkeit der Balgengaszähler vermuten ließen, wurde diese Untersuchung aus ökologischen, ökonomischen und zeitlichen Gründen nicht verwirklicht.

Ferner ist an dieser Stelle festzuhalten, dass sich die Vergleichs- oder auch Validierungsversuche mit Druckluft nur bis max. 84°l/min bei 20 mbar Eingangsdruck der Prüfstrecke realisieren ließen (siehe Anhang 5 auf Seite 37). Für den anvisierten maximalen Volumenstrom G4 von 100 l/min ($6\text{ m}^3/\text{h}$) waren 28 mbar Eingangsdruck nötig, was den gängigen technischen Regeln für den Eingangsdruck im Haushaltsbereich nicht mehr entsprechen hätte. Warum dieser Effekt mit Erdgas und Mischgas nicht auftrat, für 100 l/min ($6\text{ m}^3/\text{h}$) als 20 mbar Eingangsdruck genügte, ist Gegenstand weiterer Untersuchungen.

Wasserstoffwirkung auf die Gaszählung

4 Ergebnisse der Untersuchungen

4.1 Grundlegendes zur Datenauswertung und zum Aufbau der Diagramme

Beim Durchströmen der Prüfstrecke inklusive der Prüflinge verändern sich Druck und Temperatur des Gasvolumenstroms. Dies beeinflusst die Dichte des Gases und damit den gemessenen Volumenstrom an sich. Der Volumenstrom der Prüfstrecke ist entsprechend des idealen Gasgesetzes mittels folgender zu korrigieren:

$$\dot{Q}_{Pr} = \left(\frac{p_{TGZ} \cdot \bar{T}_{Pr}}{\bar{p}_{Pr} \cdot T_{TGZ}} \right) \cdot \dot{Q}_{TGZ} \quad \text{Formel 2}$$

\dot{Q} bezeichnet dabei wie gehabt den Volumenstrom, p steht für den Druck und T für die absolute Temperatur. Der Index Pr bezieht sich auf den entsprechenden Wert der Prüfstrecke, TGZ demnach auf den Trommelgaszähler, also die Referenz. Temperatur und Druck der Prüfstrecke stellen dabei den Mittelwert der Ein- und Ausgangs der Prüfstrecke erfassten Messwerte dar.

Die in den folgenden Diagrammen dargestellte Abweichung errechnet sich nach folgender Formel:

$$Abw = \frac{(\dot{Q}_{Pr} - \dot{Q}_{TGZ})}{\dot{Q}_{TGZ}} \quad \text{Formel 3}$$

, angegeben in Prozent. Die Nomenklatur folgt dabei der eben beschriebenen Systematik. Gemäß dieser Formel bedeuten folgend negative Werte, dass der vom Balgengaszähler erfasste Volumenstrom den der Referenz, also des Trommelgaszählers, unterschreitet. Geringere Volumenströme ermittelt vom Balgengaszähler drücken sich auch als negative Werte in der Darstellung aus.

4.2 Der Einfluss der Temperaturkompensation auf die Gaszählung

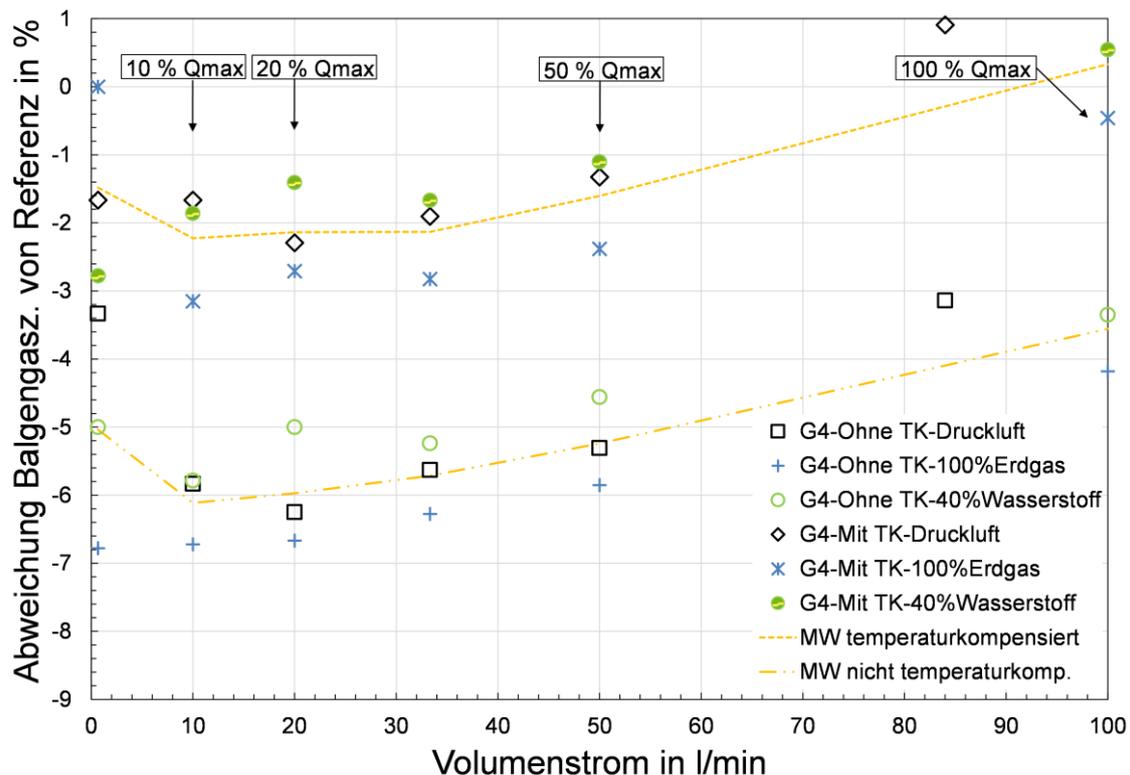
Abbildung 6 stellt den Einfluss der Temperaturkompensation auf die Zählgenauigkeit der Gaszähler, untersucht mittels BBZ der Baugröße G 4 (Versuchsgruppe 2 Tabelle 9) dar. Auf der Abszisse ist dafür der Volumenstrom in l/min aufgetragen, wobei 100 l/min dem maximalen Volumenstrom eines BGZ G4 von 6 m³/h entsprechen. Auf der Ordinate abgebildet ist die Abweichung der BGZ von der korrigierten Referenz in %.

Es ist klar ersichtlich, dass die per Balgengaszähler ermittelten Volumenströme die mit dem für den jeweiligen Volumenstrombereich passenden Trommelgaszähler ermittelten Volumenströme über den gesamten Messbereich unterschreiten. Für große Volumenströme nähern sich die Volumenströme aber an, die Abweichung von Referenz und BGZ wird entsprechend geringer. Dies spricht dafür, dass die eingangs erwähnten Leckagen eine wesentliche Quelle der Abweichung sind [6].

Wasserstoffwirkung auf die Gaszählung

Für geringe Volumenströme ist die Spreizung der Abweichungen höher, was sich letztlich mit geringerer Impulszahl / geringerem Messvolumen erklären lässt. Eine Abweichung von einem oder wenigen Impulsen hat bei geringen Volumenströmen trotz entsprechend angepasster, langer Messintervalle einen größeren Einfluss auf das Ergebnis.

Der Unterschied zwischen temperaturkompensierten BGZ und Modellen ohne (mittlerweile handelsübliche) Temperaturkompensation stellt sich als signifikant heraus und ist im Vergleich stärker als die Einflüsse der Gaszusammensetzung. Im Schnitt beträgt die Differenz zwischen den beiden Typen 3,3 %. Da sich die Temperaturkompensation üblicherweise auf 15 °C bezieht, ergibt sich rein rechnerisch hierfür basierend auf einer gemittelten Raumtemperatur von 22 °C ein Wert von 2,7 %. Damit liegt die Differenz im erwartbaren Bereich. Weiterhin spricht dies zum einen für die gewählte Versuchsdurchführung, zum anderen für die Belastbarkeit der erzielten Messwerte. Hieraus lässt sich darüber hinaus schließen, dass die Ungenauigkeit der Messungen hinreichend mit kleiner 1,5 % annehmbar ist.



Einfluss der Temperaturkompensation auf die Zählgenauigkeit von Gaszählern am Beispiel von G4 Balgengaszählern

Die Darstellung ist aus Gründen der Übersichtlichkeit vereinfacht – der vollständige Datensatz der Messreihe ist in Anhang 4 zu finden.

4.3 Einfluss der inneren Mechanik eines BGZ auf die Gaszählung

Die für die Untersuchung gewählte Darstellung und die angewendeten Formeln gelten analog zu der bisher beschriebenen. Die Abszisse stellt entsprechend den Volumenstrom, die Ordinate die Abweichung zwischen Referenz und Balgengaszähler-Messwerten dar. Aus Gründen der Übersichtlichkeit und Vergleichbarkeit unterschiedlicher Baugrößen der BGZ ist der Volumenstrom in Prozent vom jeweiligen, maximalen Volumenstrom Q_{max} aufgetragen.

Auch hier klar ersichtlich ist die vergleichsweise hohe Streuung der Abweichungen bei geringen Volumenströmen. Eine Erklärung für diesen Effekt erfolgte bereits im vorangegangenen Abschnitt, welcher wohlweislich auf dem ungünstigen Verhältnis von Messkammervolumen und Zählimpuls beruht und hohe Abweichungen bei wenigen Impulsen (= geringe Volumenströme) verursachen kann.

Wasserstoffwirkung auf die Gaszählung

Die Streuung der Messwerte nimmt mit zunehmenden Volumenströmen ab – ein Einfluss der inneren Mechanik der BGZ auf das Zählergebnis ist nicht erkennbar. Mit Erdgas beaufschlagte BGZ der Baugröße G 2,5 weisen höhere Zählergebnisse auf als vergleichbare BGZ der Baugröße G 4 mit gleichem Messvolumen. Für die Versuche mit Druckluft (M1) und 40 Vol.-% Wasserstoff stellt sich dies umgekehrt dar. Ein Einfluss der mechanischen / baulichen Unterschiede von Gaszählern mit gleichem Messkammervolumen ist wie zu erwarten nicht erkennbar.

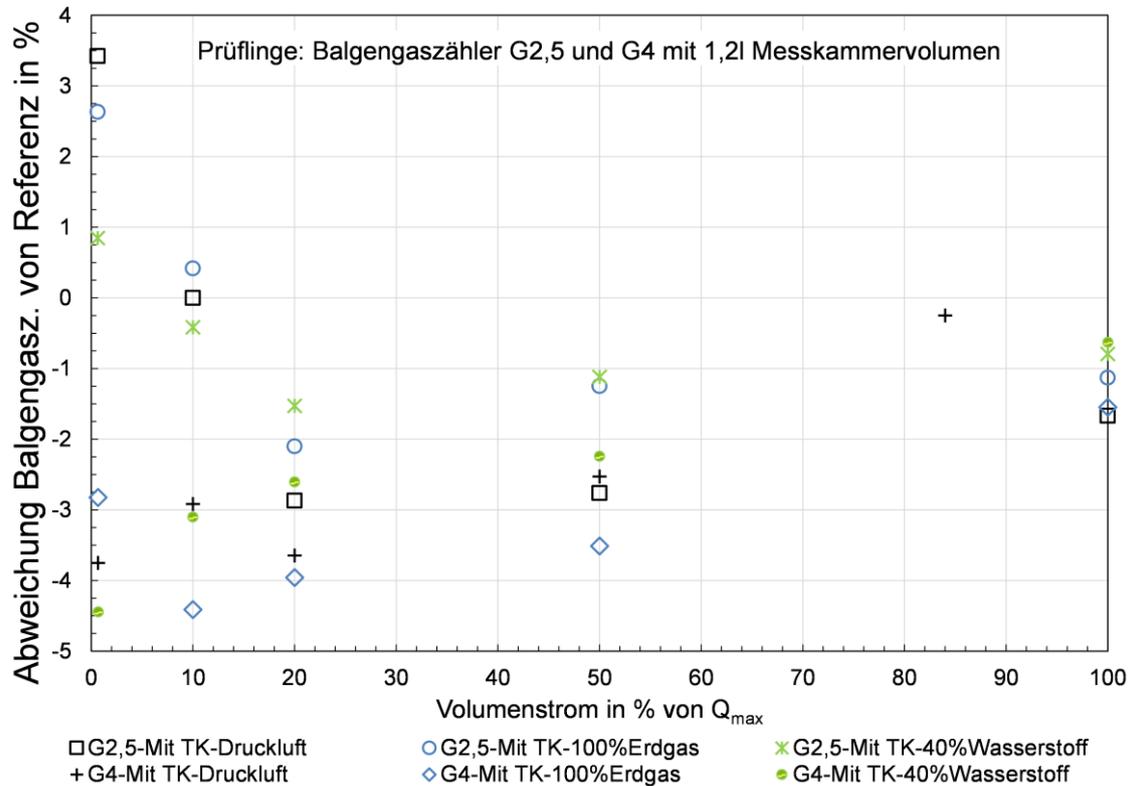


Abbildung 7: Einfluss der inneren Mechanik eines BGZ auf die Zählgenauigkeit von Balgengaszählern.

4.4 Der Einfluss der Baugröße der BGZ auf die Zählgenauigkeit

Die Ergebnisse der Untersuchungen in Bezug auf Zählgenauigkeit von BGZ im Vergleich unterschiedlicher Baugrößen und Messkammervolumen zeigt Abbildung 8. Auf der Abszisse ist dafür der Volumenstrom in l/min aufgetragen, wobei sich hier Beschränkungen aufgrund der gewählten Baugrößen ergeben. Der kleinste, verwendete BGZ gehört zu Baugröße G 2,5 und weist ein maximal zulässigen Volumenstrom von zirka 66,7 l/min (4 m³/h) auf. Auf der Ordinate dargestellt ist die Abweichung der BGZ von der korrigierten Referenz in Prozent.

Es ist zu konstatieren, dass der Einfluss der Zählergröße nicht wesentlich, beziehungsweise im Rahmen der Messgenauigkeit, nicht sicher bestimmbar ist. Als signifikant ist jedoch der Einfluss von Wasserstoff auf das Zählergebnis ist jedoch der Einfluss von hohen Wasserstoffanteilen in der Mischung zu erachten. Für geringe Volumenströme liegt die Differenz beider Messgruppen bei zirka 1,5 %, nimmt mit steigenden Volumenströmen ab und verschwindet gänzlich in der Messunsicherheit für die bei den Versuchen maximal realisierten Volumenströme.

Wasserstoffwirkung auf die Gaszählung

Durch Wasserstoff induzierte Abweichungen oder der Einfluss Gasmischung auf Zählergebnis von Verdrängungsgaszählern sind vergleichsweise gering und liegen bei 40 % Zumischung von Wasserstoff unter einem Prozent – realistischer kleiner 0,5 %. Zudem scheinen sie nach den vorliegenden Ergebnissen unabhängig von der Gerätegröße, wobei der untersuchte Bereich in Bezug auf die Gerätegröße schmal war. Hier sollten weitere Untersuchungen in größeren Geräteklassen erfolgen.

Festzuhalten bleibt ferner, dass die per BGZ ermittelten Volumina fast ausschließlich unterhalb der mittels TGZ bestimmten Werte liegen.

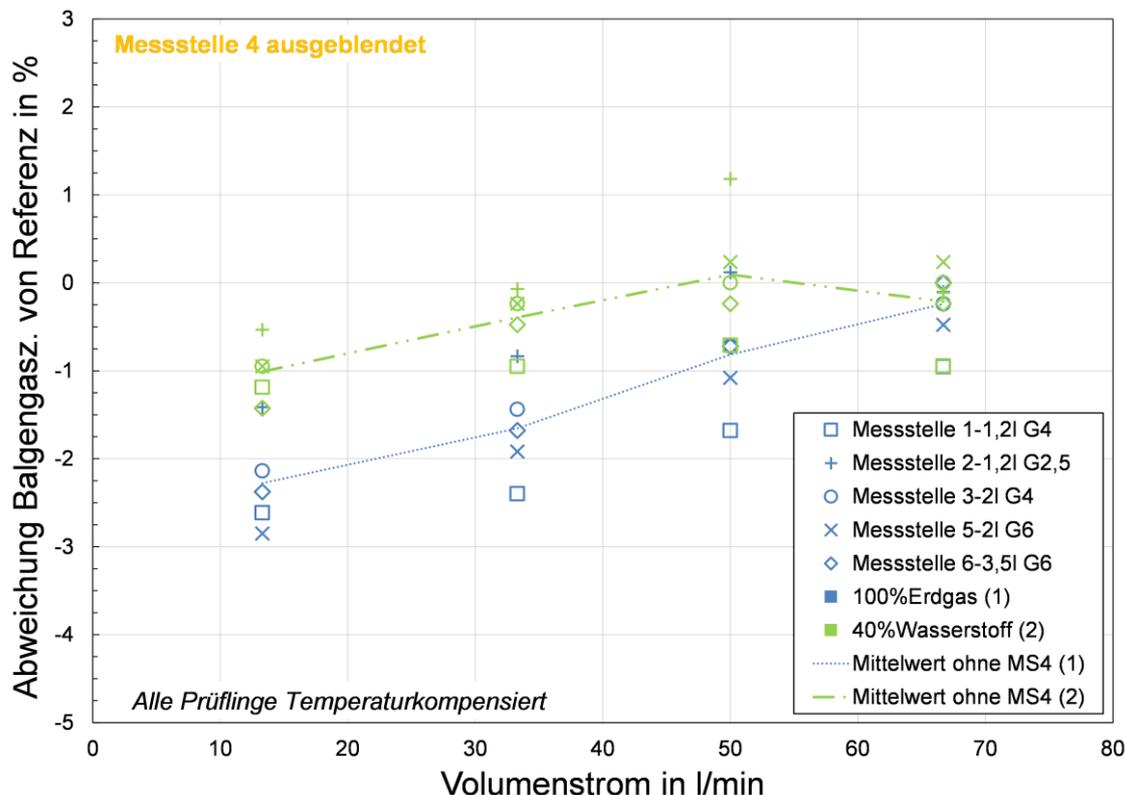


Abbildung 8: Darstellung zum Einfluss der Baugröße auf das Zählergebnis von Balgengaszählern.

4.5 Einfluss der Zumischung von Wasserstoff auf den Volumenstrom

Der Einfluss der Zumischung von 40 Vol-% Wasserstoff im Erdgas auf den sich einstellenden Volumenstrom liegt nicht im ursprünglichen Fokus der Untersuchungen, stellt aber ein weiteres, interessantes, experimentelles Ergebnis der Untersuchungen dar und ist dementsprechend in Abbildung 9 dargestellt. Für das Diagramm ist zu beachten, dass Druck und Temperatur auf der linken, primären Ordinate dargestellt sind. Der korrespondierende Volumenstrom kann auf der rechten, sekundären Ordinate abgelesen werden. Aufgetragen sind alle Messwerte über der Versuchszeit in Sekunden.

Wichtig für das Verständnis zu erwähnen ist, dass die Darstellung den Umstellprozess von einer reinen Erdgasmessung hin zu einer Messung eines Erdgasgemischs mit 40 Vol.-% Wasserstoff dokumentiert.

Hierbei fand keinerlei Änderung der Ventilstellungen oder sonstige Justierung an der Prüfstrecke statt – die signifikante Differenz zwischen beiden Volumenströmen beruht also ausschließlich auf den geänderten Stoffeigenschaften aufgrund der geänderten Zusammensetzung des Gases. Interessant ist ferner, dass sich keinerlei Auswirkungen der Zusammensetzung des Gases auf das in diesem Fall vorgeschaltete, mechanische Druckregelventil zeigen. So sind keine Auswirkungen der Umstellung des Gasgemisches auf Druck und Temperatur feststellbar.

Wasserstoffwirkung auf die Gaszählung

Die geänderte Zusammensetzung der Gasmischung bei Zumischung von 40 Vol.-% Wasserstoff, einhergehend mit einer Änderung der Stoffeigenschaften des Gemisches, bedingt einen Anstieg des Volumenstroms um 20-25%. Ursächlich ist vermutlich die hierbei erheblich verringerte Dichte des Gemisches (siehe Tabelle 1 auf Seite 8). Für Gasverbrauchsgeräte bedeutet dies, dass die Verringerung des Heizwertes bei Zumischung in gewissen Grenzen kompensiert wird, sofern nicht ohnehin eine Heizwertnachführung vorhanden ist.

An dieser Stelle ist zu vermuten, dass für nicht volumetrische Messverfahren die Erhöhung des Impulses der Gasteilchen (teilweise) auch die Wirkung der verringerten Dichte (teilweise) kompensiert.

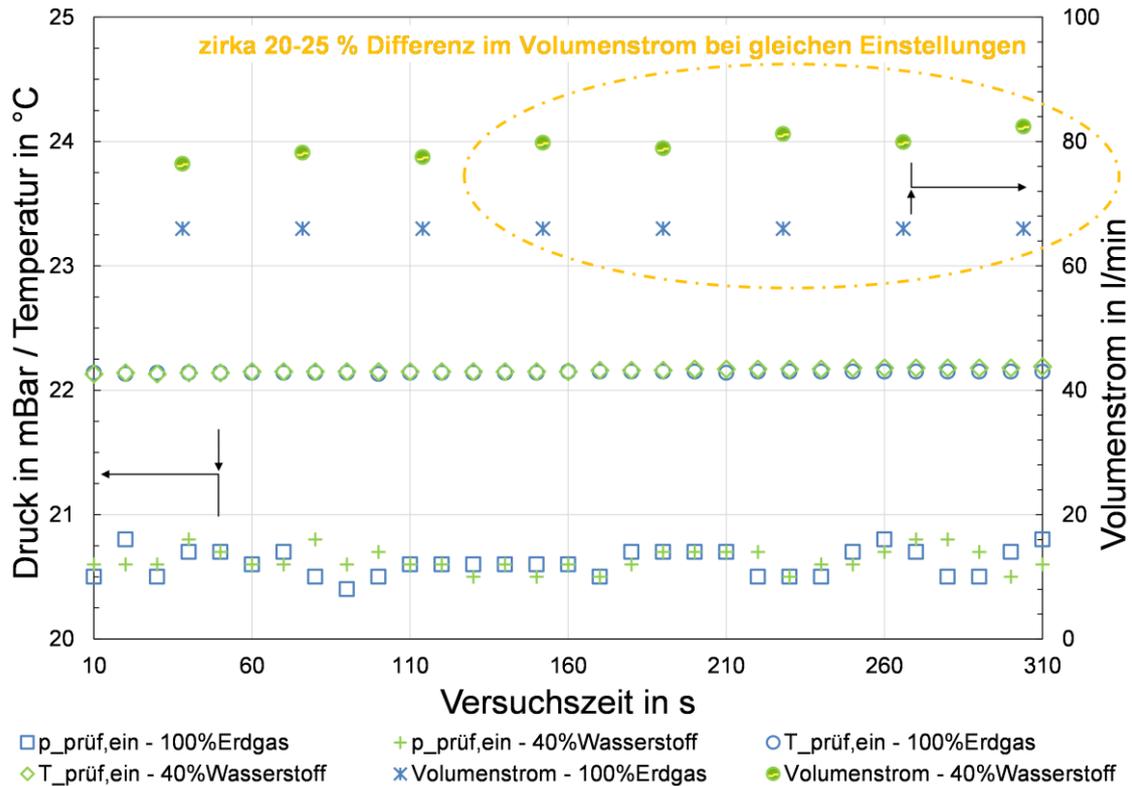


Abbildung 9: Der Einfluss des Wasserstoffanteils auf den sich einstellenden Volumenstrom.

Wasserstoffwirkung auf die Gaszählung

4.6 Zusammenfassung der experimentellen Ergebnisse

Es erfolgten über 50 Versuchsreihen mit Druckluft, reinem Erdgas sowie einem Gemisch aus 60 Vol.-% Erdgas und 40 Vol.-% Wasserstoff gegen eine nicht kalibrierte Referenz. In jeder Versuchsreihe kamen je in wechselnder Konfiguration 6 Balgengaszähler unterschiedlicher Baugröße und Bauweise zum Einsatz. Die wesentlichen Unterschiede liegen neben den baugrößenabhängigen Volumenströmen im Messkammervolumen, der Anzahl der Stutzen, dem Zustand und der mechanischen Temperaturkompensation mittels Bimetall.

Auf Basis dieser vergleichenden Messungen lässt sich schlussfolgern, dass die mechanische Temperaturkompensation einen vergleichsweise starken Einfluss auf das Zählergebnis der Gaszähler hat, welcher den Einfluss der Gaszusammensetzung überwiegt. Aus diesem Vergleich lässt sich ferner schlussfolgern, dass die Ungenauigkeit der Messungen durch akkurate Versuchsdurchführung mit kleiner als 1,5 % angenommen werden kann. Für eine Beurteilung der Eichgültigkeit ist diese Ungenauigkeit natürlich nicht hinreichend.

Es ist klar ersichtlich, dass die Abweichung des Zählergebnisses der Balgengaszähler von der Referenz mit zunehmendem Volumenstrom sich (teilweise bis auf 0) verringert. Ebenso lässt sich eine Tendenz aus den Versuchsergebnissen herauslesen, dass sich die Abweichung mit steigender Zählergröße leicht erhöht. Auch liegen die Zählergebnisse der Balgengaszähler nahezu unisono unterhalb der Referenzwerte erfasst mit Luft kalibrierten Trommelgaszählern.

Die Ausnahme bildet der Bereich geringer Volumenströme, welche grundsätzlich größere und auch signifikant weiter streuende Abweichungen ausweist. All dies deutet daraufhin, dass die wesentliche Ursache der Abweichungen in den Leckagen durch die Spalte der Balgengaszähler zu vermuten ist und findet sich somit in Übereinstimmung mit der verfügbaren Literatur [6].

Im Vergleich zu weiteren Ziel- und Störgrößen fällt der Einfluss der Gemischzusammensetzung, also im eigentlichen der Stoffparameter, für die untersuchten, auf dem Verdrängungsprinzip basierenden Balgengaszähler vergleichsweise gering aus, ist nichtsdestotrotz klar erkennbar. Für besagtes Gemisch aus 60 Vol.-% Erdgas und 40 Vol.-% Wasserstoff und die hier verwendeten Balgengaszähler kann die Abweichung mit weniger als 1 % vom angegeben werden.

Festzuhalten ist zudem, dass für besagtes Gemisch bei sonst identischen, mechanischen Einstellungen der Prüfstrecke sich der Volumenstrom um 20-25% erhöht. An dieser Stelle ist zu vermuten, dass durch die damit einhergehende Erhöhung Impulses der Gasteilchen (teilweise) auch die Wirkung der verringerten Dichte (teilweise) kompensiert wird. Dies sollte Gegenstand weiterer Untersuchungen sein.

Wasserstoffwirkung auf die Gaszählung

5 Zusammenfassung

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. Zudem ist die Gasabnahme aus dem Netz stetigen Änderungen unterworfen, sodass von Änderungen des Wasserstoffanteils im Erdgasnetz anzunehmen ist.

Die Änderung des Wasserstoffanteils in Erdgasnetz geht einher mit einer Modifikation der stofflichen Eigenschaften des Gasgemisches. So sinkt der Heizwert des Gemisches bei einer Zumischung von 35 Vol.-% Wasserstoff zum Erdgas um rund 33%, deren Dichte um etwa 45%. Es ist zu vermuten, dass diese Änderung der Stoffeigenschaften sich auf die Zählgenauigkeit der zur Volumenstrommessung eingesetzten Gaszähler je nach Messprinzip gegebenenfalls unterschiedlich stark auswirkt.

So verwundert es nicht, dass die Gaszählung mit reinem Wasserstoff oder Wasserstoffgemischen aktives Feld der Forschung ist. Zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichts sind keine Untersuchungen von Gaszähler auf Eichgültigkeit bei Verwendung von Echtgas bekannt. Bisherige Untersuchungen beschränkten sich auf max. 30°Vol.-% beigemengten Wasserstoff (restliche 70°Vol.-% Methan). Dementsprechend ist es Ziel dieser Studie, die Wasserstoffwirkung auf die Gaszählung handelsüblicher Gaszähler wie Balgengaszähler, Drehkolbengaszähler oder Turbinenzähler zu untersuchen.

Dafür erfolgte basierend auf drei unterschiedlichen Versuchskonzepten eine Prüfung verfügbarer oder benötigter Messmittel. Festzuhalten ist, dass aktuell kein Primärnormal und dem folgend keine Transfer- / Arbeitsnormale für Echtgaskalibrierungen verfügbar sind. Weder zeitlich noch finanziell lassen sich etwaige Einzelanfertigungen im Rahmen dieser Studie umsetzen.

Somit lässt sich zum jetzigen Zeitpunkt eine Überprüfung der Eichgültigkeit aufgrund nicht zu verwirklichender Anforderungen an die Messgenauigkeit nicht umsetzen. Durch geschickte Versuchsführung ist es jedoch möglich, qualitative Aussagen zur Thematik zu gewinnen. So werden nach tiefgreifender Recherche sowie Abwägung von Aufwand und Nutzen vergleichende Messungen mit Luft (zur Überprüfung der Referenz), Erdgas (als Referenz) und mit Gemischen aus Erdgas mit (hohem) Wasserstoffanteil angestrebt, um qualitative Aussagen zu gewinnen.

Dafür erfolgte der Aufbau und Test eines Versuchstandes, welcher Gaszählerprüfungen mit Echtgas bei hohen Wasserstoffanteilen ($H_{2,max}$ 40 Vol.-%) ermöglicht. Kern des Versuchsaufbaus sind die von der Gas Service Freiberg GmbH zur Verfügung gestellte Prüfstrecke QF 10-6 der Elster GmbH mit 6 in Reihe befindlichen Messplätzen für Balgengaszähler bis zu einer Baugröße G°6 sowie die vom hausinternen DVGW - Prüflaboratorium Energie im Rahmen der Studie für die Untersuchungen überlassenen Trommelgaszähler (TGZ) der Firma Ritter.

In Summe konnten damit mehr als 50 Einzelversuche mit Balgengaszählern durchgeführt werden, deren wesentliche Unterschiede neben den baugrößenabhängigen Volumenströmen im Messkammervolumen, der Anzahl der Stutzen, dem Zustand und der mechanischen Temperaturkompensation mittels Bimetall liegen.

Wasserstoffwirkung auf die Gaszählung

Auf Basis dieser vergleichenden Messungen lässt sich schlussfolgern, dass die mechanische Temperaturkompensation einen vergleichsweise starken Einfluss auf das Zählergebnis der Gaszähler hat, welcher den Einfluss der Gaszusammensetzung überwiegt. Aus diesem Vergleich lässt sich ferner schlussfolgern, dass die Ungenauigkeit der Messungen durch akkurate Versuchsdurchführung mit kleiner als 1,5 Prozent angenommen werden kann.

Es ist klar ersichtlich, dass die Abweichung des Zählergebnisses der Balgengaszähler von der Referenz mit zunehmendem Volumenstrom sich (teilweise bis auf 0) verringert. Auch liegen die Zählergebnisse der Balgengaszähler nahezu unisono unterhalb der Referenzwerte erfasst mit Luft kalibrierten Trommelgaszählern. All dies deutet daraufhin, dass die wesentliche Ursache der Abweichungen in den Leckagen durch die Spalte der Balgengaszähler zu vermuten ist.

Im Vergleich zu weiteren Ziel- und Störgrößen fällt der Einfluss der Gemischzusammensetzung, also im eigentlichen der Stoffparameter für die untersuchten, auf dem Verdrängungsprinzip basierenden Balgengaszähler vergleichsweise gering aus, ist nichtsdestotrotz klar erkennbar. Für besagtes Gemisch aus 60 Vol.-% Erdgas und 40 Vol.-% Wasserstoff und die hier verwendeten Balgengaszähler kann die Abweichung mit weniger als 1% vom angegeben werden.

Notieren lässt sich zudem, dass für besagtes Gemisch bei sonst identischen, mechanischen Einstellungen der Prüfstrecke sich der Volumenstrom um 20-25% erhöht. An dieser Stelle ist zu vermuten, dass durch die damit einhergehende Erhöhung des Impulses der Gasteilchen (teilweise) auch die Wirkung der verringerten Dichte (teilweise) kompensiert wird. Dies sollte Gegenstand weiterer Untersuchungen sein.

Danksagung

Die Autoren der Studie danken zahlreichen technischen Mitarbeitern der DBI-Gruppe für die im Rahmen der Studie gewährte Unterstützung. Ein besonderer Dank gilt der Gas Service Freiberg GmbH, der Elster GmbH sowie dem DVGW - Prüflaboratorium Energie für die Bereitstellung zahlreicher Messmittel.

Wasserstoffwirkung auf die Gaszählung

Literaturverzeichnis

- [1] DEUTSCHE VEREINIGUNG DES GAS- UND WASSERFACHES E. V.; MÜLLER-SYRING, Gert (Mitarb.); HENEL, Marco (Mitarb.): *Wasserstofftoleranz der Erdgasinfrastruktur inklusive aller assoziierten Anlagen : Abschlussbericht*. Bonn, 00.02.2014
- [2] KRAUSE, Hartmut; WERSCHY, Matthias (Mitarb.); FRANKE, Steffen (Mitarb.); GIESE, Anne (Mitarb.); BENTHIN, Jörn (Mitarb.); DÖRR, Holger (Mitarb.): *Untersuchungen der Auswirkungen von Gasbeschaffenheitsänderungen auf industrielle und gewerbliche Anwendungen : Abschlussbericht*. 01.04.2014
- [3] DIN EN 16723-2. 00.10.2017. *Erdgas und Biomethan zur Verwendung im Transportwesen und Biomethan zur Einspeisung ins Erdgasnetz*
- [4] STADLER, Ingo: *Energiespeicher : Bedarf, technologien, integration*. Berlin : Springer Vieweg, 2014
- [5] BUNDESNETZAGENTUR: *Power to Gas - Ein-spei-sung von Was-ser-stoff und syn-the-ti-schem Me-than : Konsultationsergebnisse*. 01.08.2014
- [6] GRINDAIX GMBH: *GRX-Q - Verdrängungszähler*. URL <https://grindaix.de/magazin/verdraengungszaeher/>. – Aktualisierungsdatum: 2020-07-13 – Überprüfungsdatum 2020-11-27
- [7] DEUTSCHE VEREINIGUNG DES GAS- UND WASSERFACHES E. V.: *Gasabrechnung - Kompressibilitätszahl (K-Zahl)* (in Kraft getr. am 00.08.2020) (00.08.2020)
- [8] BUNDESTAG: *Mess- und Eichgesetz* (idF v. 25. 7. 2013). In: *Bundesgesetzblatt* (2013-07-25), Nr. 58, S. 2722–2748. URL https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav#__bgbl__%2F%2F%5B%40attr_id%3D%27bgbl113s2722.pdf%27%5D__1606486013696 – Überprüfungsdatum 2020-11-27
- [9] BUNDESTAG: *Verordnung zur Neuregelung des gesetzlichen Messwesens und zur Anpassung an europäische Rechtsprechung* (idF v. 17. 12. 2014). In: *Bundesgesetzblatt* (2014-12-11), Nr. 43, S. 2010–2073. URL http://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBI&jumpTo=bgbl114s2010.pdf – Überprüfungsdatum 2020-11-27
- [10] DEUTSCHE VEREINIGUNG DES GAS- UND WASSERFACHES E. V.: *DVGW G 685-1 (A) : Gasabrechnung - Grundlagen der Energieermittlung*. Bonn, 00.08.2020
- [11] HUIZING, Rolinda ; PINCHBECK, David: *Preparing for the hydrogen economy by using the existing natural gas system as a catalyst : overview of the NATURALHY-project*
- [12] BRUN, Christophe: *Flow metering of renewable gases (biogas, biomethane, hydrogen, syngas and mixtures with natural gas) : Publishable Summary for 18NRM06 NEWGASMET*. Publishable Summaryfor 18NRM06 NEWGASMET. 00.04.2020
- [13] FRANZ, Michael: *Aktuelle Aktivitäten in Forschung und Entwicklung im Beriech der Volumengaszählung*. Webkonferenz. 2020-05-26. GÖTZE, Pitt (Adressat)
- [14] DEUTSCHE VEREINIGUNG DES GAS- UND WASSERFACHES E. V.: *Wasserstoff-Forschungsprojekte : H2-dvgw.de*. G-TK-2-2-20-0024. 00.09.2020
- [15] KRAMER, Rainer: *Nationale Normale und deren Eignung für Gemische - aktuelle Forschung am PTB*. Telefonat. 2020-06-15. GÖTZE, Pitt (Adressat)
- [16] VAN DER GRINTEN, Jos: *Anpassungen des nationalen Normal für Hochdruck-Erdgas (Hochdruck-Gaszählerprüfstand pigsar™)*. Telefonat. 2020-06-15. GÖTZE, Pitt (Adressat)
- [17] DEUTSCHE VEREINIGUNG DES GAS- UND WASSERFACHES E. V.: *Gasabrechnung - Lastgangbasierte Energieermittlung (LBE)* (in Kraft getr. am 00.08.2020) (00.08.2020)
- [18] DEUTSCHE VEREINIGUNG DES GAS- UND WASSERFACHES E. V.: *Gasabrechnung - Zählerstandbasierte Energieermittlung (ZBE)* (in Kraft getr. am 00.08.2020) (00.08.2020)

Wasserstoffwirkung auf die Gaszählung

- [19] DEUTSCHE VEREINIGUNG DES GAS- UND WASSERFACHES E. V.: *Gasabrechnung - Brennwert* (in Kraft getr. am 00.08.2020) (00.08.2020)
- [20] DEUTSCHE VEREINIGUNG DES GAS- UND WASSERFACHES E. V.: *Gasabrechnung - Volumen im Normzustand* (in Kraft getr. am 00.08.2020) (00.08.2020)
- [21] FRENZEL, F.: *Praxis der industriellen Durchflussmessung*. URL <http://lernserver.el.haw-hamburg.de/kurs/Physikpraktikum/Physikpraktikum/download/durchflussmesser.pdf>. – Aktualisierungsdatum: 2005-12-15 – Überprüfungsdatum 2020-12-22
- [22] DIN EN 1776. 2016-05-01. *Gasinfrastruktur - Gasmesssysteme - Funktionale Anforderungen; Deutsche Fassung EN 1776:2015*
- [23] INDUSTRY VERLAG GMBH: *Ist aktuelle Durchflussmesstechnik für Wasserstoff geeignet?* URL <https://www.industr.com/de/ist-aktuelle-durchflussmesstechnik-fuer-wasserstoff-geeignet-2540910>. – Aktualisierungsdatum: 2020-11-26 – Überprüfungsdatum 2020-11-26
- [24] PHYSIKALISCH TECHNISCHE BUNDESANSTALT: *PTB-Anforderungen - Messgeräte für Gas : Volumengaszähler*. PTB-A 7.1
- [25] Richtlinie 32014L0032. 2014-02-26. *Richtlinie 2014/32/EU zur Harmonisierung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über die Bereitstellung von Messgeräten auf dem Markt*
- [26] Regeln der ÖVGW G 77. 00.01.1990. *Gasmengenmessung - Gasdruck- und Gastemperaturmessungen*
- [27] Regeln der ÖVGW G 74. 00.06.2001. *Gasmengenmessung - Volumengaszähler*
- [28] Regeln der ÖVGW G 75. 00.06.2001. *Gasmengenmessung - Wirkdruckzähler*
- [29] BÖHME, Thomas: *Eichung von Balgengaszählern durch den Gas Service Freiberg*. Persönliches Gespräch. 2020-05-12. GÖTZE, Pitt (Adressat)
- [30] ILG, Karl: *Konzeption eines Versuchsstands zur Gaszählerprüfung - Einsatz von LFE*. Mail. 2020-07-28. GÖTZE, Pitt (Adressat)
- [31] ILG, Karl: *Konzeption eines Versuchsstands zur Gaszählerprüfung - Möglichkeiten der Kalibrierung von Messmitteln*. Mail. 2020-07-10. GÖTZE, Pitt (Adressat)
- [32] THE HONG KONG AND CHINA GAS COMPANY LTD.: *Gas Production : Stadtgasproduktion in Hongkong*. URL <https://www.towngas.com/en/About-Us/Hong-Kong-Gas-Business/Gas-Production>. – Aktualisierungsdatum: 2021-02-02 – Überprüfungsdatum 2021-02-02
- [33] ARP, Hans: *Gespräch Produkt-SB und Konformitätserklärung - Balgengaszähler Elster GmbH*. Webkonferenz. 2020-09-30. GÖTZE, Pitt; KÖLLMER, Anna; KNORR, Christoph; LOTZE, Torsten; LAMORSKI, Anna (Adressat)
- [34] KLEPPMANN, Wilhelm: *Versuchsplanung : Produkte und Prozesse optimieren*. 9., überarbeitete Auflage. München, Wien : Hanser, 2016 (Praxisreihe Qualitätswissen)

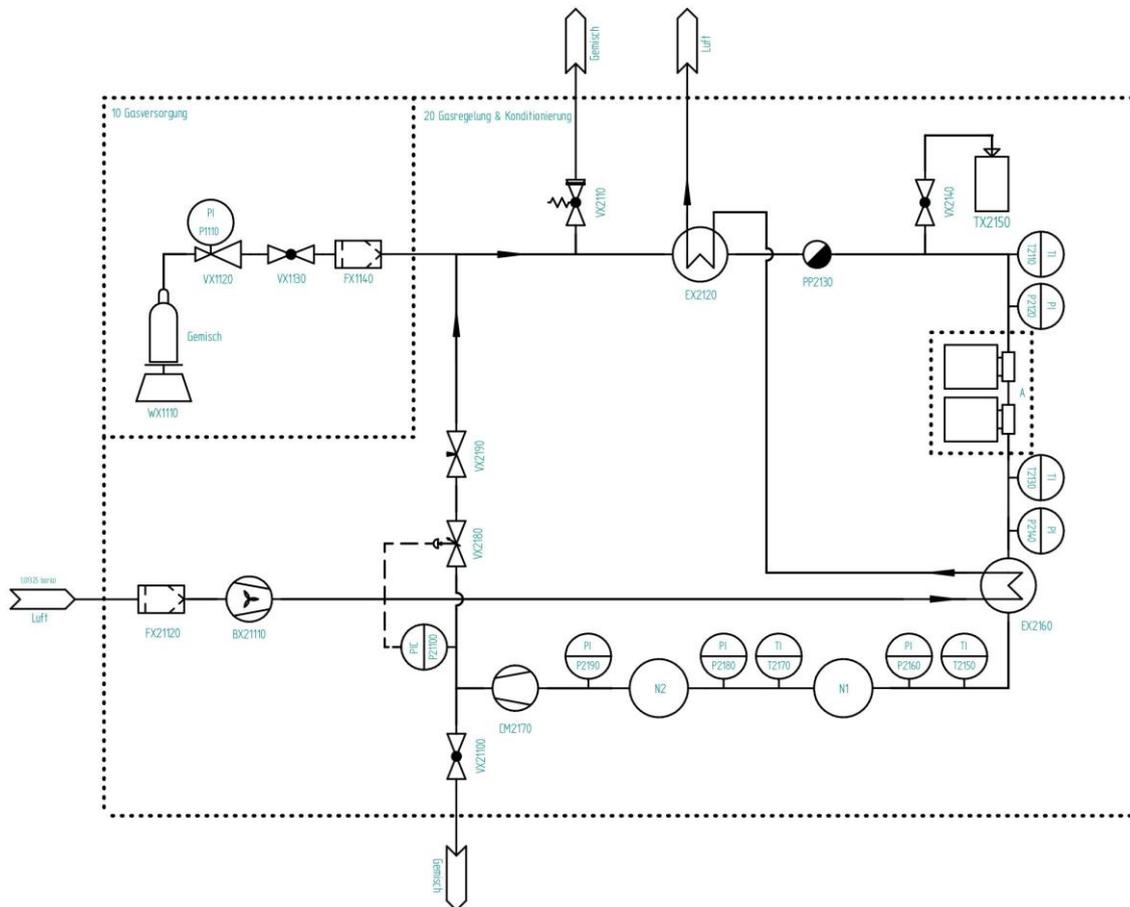
Wasserstoffwirkung auf die Gaszählung

Anhang

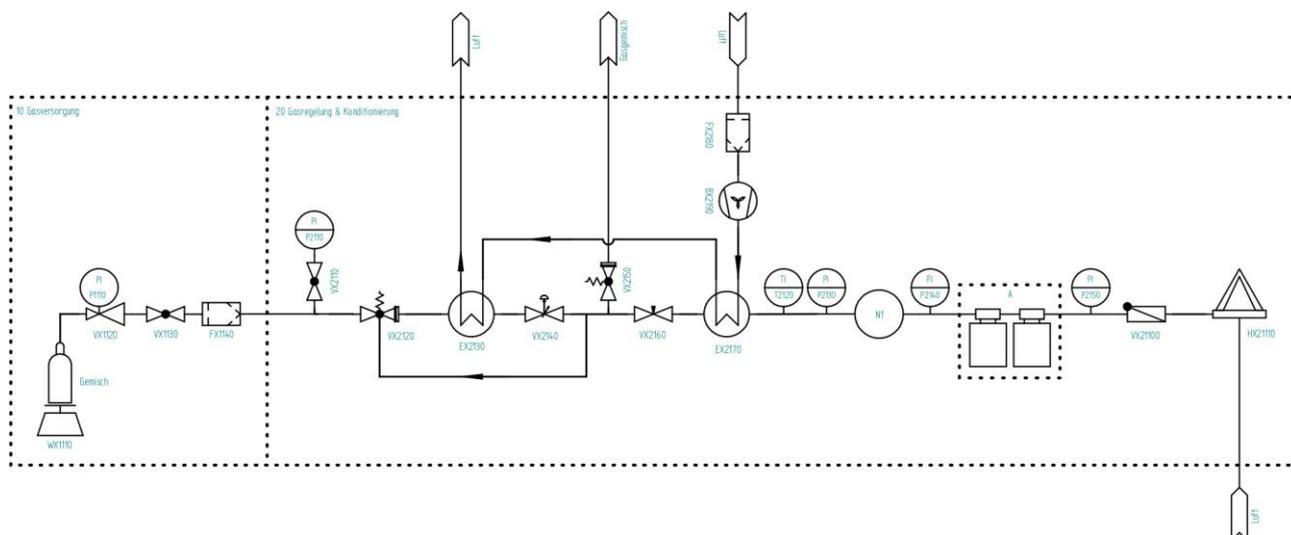
Anhang 1:	Validierte Versuchskonzepte 1 – Kreislaufführung plus Flaschengas	35
Anhang 2:	Validierte Versuchskonzepte 2 – Freie Ausströmung plus Flaschengas	35
Anhang 3:	Berechnung der Ungenauigkeit des per Gasmische bereitgestellten Gesamtvolumenstroms bei Umgehung des Pufferspeichers bei Nutzung der Kanäle 1 und 3 – einfache Fehlerfortpflanzung	36
Anhang 4:	Ergebnisse – Einfluss Temperaturkompensation	37
Anhang 5:	Bildschirmfoto Druckluft-maximaler Versuchsstrom	37

Wasserstoffwirkung auf die Gaszählung

Anhang 1: Validierte Versuchskonzepte 1 – Kreislaufführung plus Flaschengas



Anhang 2: Validierte Versuchskonzepte 2 – Freie Ausströmung plus Flaschengas



Wasserstoffwirkung auf die Gaszählung

Anhang 3: Berechnung der Ungenauigkeit des per Gasmische bereitgestellten Gesamtvolumenstroms bei Umgehung des Pufferspeichers bei Nutzung der Kanäle 1 und 3 – einfache Fehlerfortpflanzung

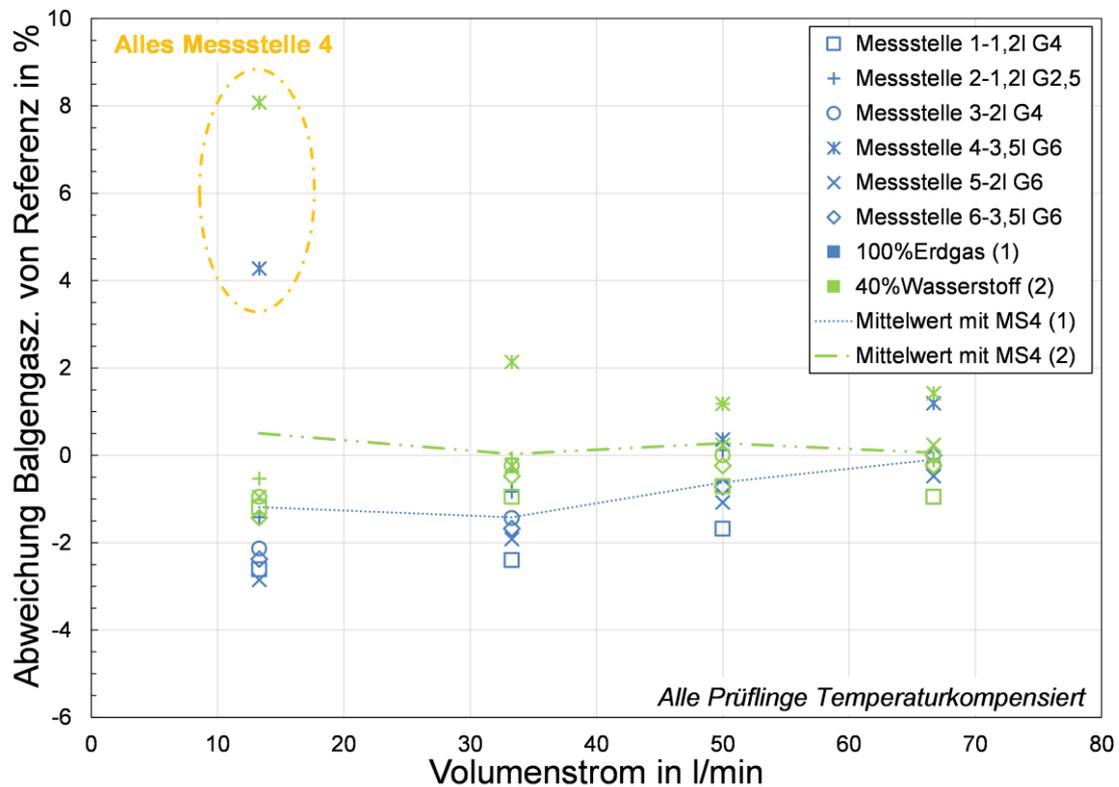
Die Genauigkeit der verwendeten MFC's wird vom Hersteller als Summe von $\pm 0,7\%$ vom Messwert und $\pm 0,2\%$ vom Messbereichsendwert angegeben. Die Messbereichsendwerte betragen für Kanal 1 (Erdgas) 150 l/min sowie für Kanal 3 (Wasserstoff) 64,95 l/min. Als Messwerte fungierten die jeweiligen Zielvolumenströme (siehe Tabelle XX). Die so ermittelten Unsicherheiten pro Kanal pflanzen sich per Fehlerfortpflanzung gemäß $\Delta V_G = (\Delta V_{K1}^2 + \Delta V_{K2}^2)^{0,5}$ fort.

Tabelle 10: Übersicht zu dem ermittelten Gesamtunsicherheit der Zusammensetzung der Volumenströme bereitgestellt von der installierten Gasmische.

		u(Q _{min} [MAX]) in [%]			u(Q _{tren}) (=10% x Q _{max})			u(Q _{max}) in [%]		
		M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3
G 2,5										
Kanal 1	[l/min]	0,30	0,30	0,30	0,35	0,34	0,33	0,77	0,67	0,58
Kanal 3	[l/min]	0,00	0,30	0,30	0,00	0,31	0,32	0,00	0,39	0,49
Ges.-	[l/min]	0,30	0,43	0,43	0,35	0,46	0,46	0,77	0,78	0,76
Unsich.	[%]	0,73	1,02	1,02	0,05	0,07	0,07	0,01	0,01	0,01
G 4										
Kanal 1	[l/min]	0,30	0,30	0,30	0,37	0,36	0,34	1,00	0,86	0,72
Kanal 3	[l/min]	0,00	0,30	0,30	0,00	0,31	0,33	0,00	0,44	0,58
Ges.-	[l/min]	0,30	0,43	0,43	0,37	0,47	0,47	1,00	0,97	0,92
Unsich.	[%]	0,46	0,64	0,64	0,04	0,05	0,05	0,01	0,01	0,01
G 4										
Kanal 1	[l/min]	0,31	0,31	0,30	0,42	0,39	0,37	1,47	1,23	1,00
Kanal 3	[l/min]	0,00	0,30	0,30	0,00	0,32	0,35	0,00	0,53	0,77
Ges.-	[l/min]	0,31	0,43	0,43	0,42	0,51	0,51	1,47	1,34	1,26
Unsich.	[%]	0,31	0,43	0,43	0,03	0,03	0,03	0,01	0,01	0,01
G 10										
Kanal 1	[l/min]	0,31	0,31	0,31	0,49	0,45	0,41	2,17	1,79	1,42
Kanal 3	[l/min]	0,00	0,30	0,30	0,00	0,34	0,37	0,00	0,67	1,05
Ges.-	[l/min]	0,31	0,43	0,43	0,49	0,56	0,56	2,17	1,92	1,76
Unsich.	[%]	0,19	0,26	0,26	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01

Wasserstoffwirkung auf die Gaszählung

Anhang 4: Ergebnisse – Einfluss Temperaturkompensation



Anhang 5: Bildschirmfoto Druckluft-maximaler Versuchsstrom

