

# Großgasmessung von Wasserstoff und Wasserstoff-Erdgas-Gemischen

**Jos G.M. van der Grinten**

Regel- und Messtechnik, Wasserstoff, Erdgas, Rückführbarkeit, Realgasfaktor

Für die Umstellung auf eine Wasserstoffwirtschaft müssen Gaszähler, womit Wasserstoff oder Wasserstoff-Erdgas-Gemische abgerechnet werden, die gleichen Genauigkeitskriterien erfüllen wie Erdgaszähler. Neue, für Wasserstoff geeignete, Primärnormale müssen entwickelt werden und stehen nicht kurzfristig zur Verfügung. Die Lösung, die jetzt anwendbar ist, besteht aus zwei in der PTB entwickelten Skalierungsverfahren für Schalldüsen und Turbinenradgaszähler. Dabei haben geometrisch vermessene Schalldüsen einen freien Parameter, der mittels einer Kalibrierung mit Luft bestimmt werden kann. Die Kurve eines Turbinenradgaszählers, die durch Prüfungen mit Luft und Erdgas erhalten wurden, können für die Wasserstoffanwendung angepasst werden. Ein Praxisbeispiel [1] eines Referenzsystems, aufgebaut aus gegenseitig unabhängig kalibrierten Schalldüsen, Coriolis-Zähler und Turbinenradgaszählern, zeigt konsistente Ergebnisse. Mit 10 Gasgemischen wurden bei drei unterschiedenen Drücken 500 Prüfpunkte erfasst. Das Kriterium für die normalisierte Abweichung  $-1 \leq E_n \leq 1$  ist mit einem Konfidenzniveau von mehr als 95 % erfüllt.

Die Einspeisung von Wasserstoff in Verteilernetze bedeutet, dass installierte Mengenumwerter mit mehr als 10 % Wasserstoff rechnen müssen. Deshalb ist der übliche SGERG-Algorithmus so modifiziert, dass Berechnungen mit bis zu 100 % Wasserstoff möglich sind. Simulationen zeigen, dass die Wunschunsicherheit von 0,1 % eingehalten werden kann durch Einschränkung des Druckbereichs auf 26 bar für die in Deutschland üblichen Erdgase.

## Industrial gas flow measurement of hydrogen and hydrogen-enriched natural gases

For the conversion to a hydrogen economy, gas meters with which hydrogen or hydrogen-natural gas mixtures are billed, must fulfil the same accuracy criteria as natural gas meters. New primary standards suitable for hydrogen have to be developed and are not available at short notice. The solution that is now available consists of two scaling procedures developed at PTB for sonic nozzles and turbine meters. Here, geometrically measured sonic nozzles have one free parameter that can be determined by a calibration with air. The curve of a turbine gasmeter obtained from tests with air and natural gas can be converted for hydrogen application. A practical example [1] of a reference system built from mutually independently calibrated sonic nozzles, Coriolis meters and turbine meters shows consistent results. With 10 gas mixtures measured at 3 different pressures, 500 test points were recorded. The criterion for normalised deviation  $-1 \leq E_n \leq 1$  is met with more than 95% confidentiality.

The injection of hydrogen into distribution networks means that installed volume conversion devices must expect more than 10 % hydrogen. Therefore, the usual SGERG algorithm is modified so that calculations with up to 100 % hydrogen are possible. Simulations show that the desired uncertainty of 0.1 % can be met by restricting the pressure range to 26 bar for the natural gases commonly used in Germany.

### 1. Einleitung

In den kommenden Jahrzehnten will Europa auf Wasserstoffwirtschaft umstellen. Um dies zu ermöglichen, wird in Europa ein Netz für den Transport von Wasserstoff über

große Entfernungen aufgebaut: das Hydrogen Backbone [2]. Die Infrastruktur besteht aus neuen Transportrohrleitungen und bestehenden Erdgaspipelines, die für Wasserstoff umgerüstet werden.

Wasserstoff ist bezogen auf Volumen, Masse oder Energie wesentlich teurer als Erdgas, was zusätzliche Anstrengungen rechtfertigt, um die Messrichtigkeit bei der Großgasmessung von Wasserstoff und Wasserstoff-Erdgas-Gemischen zu gewährleisten. Im Allgemeinen wird das Messverhalten eines Gasmessgerätes durch die Gasart oder die Gaszusammensetzung beeinflusst, was in der Vergangenheit zum Bau von erdgasbetriebenen Prüfeinrichtungen geführt hat, in denen die Messgeräte unter Betriebsbedingungen getestet werden können.

Gegenwärtig gibt es keine Einrichtungen zur Eichung von Wasserstoffgaszählern. Der Multiphasen-Kreislauf von der DNV in Groningen, Niederlande, wurde bereits erfolgreich für Erdgas-Gemische mit einem Wasserstoffanteil von bis zu 30 % eingesetzt [1]. Die Fa. RMA wird noch in diesem Jahr eine Anlage in Betrieb nehmen, in der Hochdruckgaszähler mit reinem Wasserstoff kalibriert werden [3]. Weitere Prüfanlagen werden jetzt projektiert. Wenn die Prüflinge von der Gasart oder der Zusammensetzung beeinflusst werden, gilt das auch für die Referenzzähler. Damit die Anlagen genau funktionieren, muss die Rückführung richtig organisiert sein. Wegen der deutlich größeren Empfindlichkeit gegenüber Leckagen und der geringen Dichte von Wasserstoff (ein Zehntel von Erdgas) müssen Primärnormale entsprechend modifiziert werden und sind kurzfristig noch nicht verfügbar. Um eine kurzfristige Rückführbarkeit für Wasserstoff oder Wasserstoff-Erdgas-Gemische von Referenzzählern in einer Prüfeinrichtung zu erreichen, wurden Skalierungsverfahren für Turbinenradgaszähler und Venturi-Düsen entwickelt und getestet.

Eine zusätzliche Entwicklung ist die Modifikation des SGERG-Algorithmus für Wasserstoffkonzentrationen über 10 %. Wenn diese Beschränkung aus der heutigen Software entfernt wird [4], kann der Algorithmus bis zu 100 % Wasserstoff unter Einhaltung der Fehlergrenzen des gesetzlichen Messwesens rechnen. Bestehende Mengenumwerter können daher mit einem Software-Upgrade auch zukünftig in Netzen mit Wasserstoff verwendet werden. Allerdings muss zuvor der modifizierte Algorithmus als Norm verabschiedet werden.

In diesem Fachbericht werden Praxisbeispiele ausgeführt, die zeigen, dass die Skalierungsverfahren und das Turbinenradzählermodell mit einer guten Konsistenz angewendet werden können. Außerdem ist das modifizierte SGERG in einem größeren Wasserstoffbereich anwendbar als bisher erwartet.

## 2. Skalierungsverfahren für kritische Venturi-Düsen

Nach ISO 9300 [5] kann der Massendurchfluss  $Q_m$  durch eine kritisch betriebene Venturi-Düse (CFVN) oder eine Schalldüse wie folgt beschrieben werden:

$$q_m = A_{\text{throat}} \cdot C_D \cdot c^* \frac{p_0}{\sqrt{\frac{R_u}{M} T_0}} \quad (1)$$

Dabei ist  $A_{\text{throat}}$  die Querschnittsfläche des Düsenhalses,  $C_D$  der Durchflusskoeffizient, der die Abweichung vom idealen Verhalten beschreibt,  $c^*$  die Umrechnung zwischen Stagnations- und Düsenhalsbedingungen,  $p_0$  der Ruhedruck im Düseneinlauf,  $R_u$  die universelle Gaskonstante,  $M$  die molare Masse des Gases und  $T_0$  die Ruhetemperatur im Düseneinlauf. Der Durchflusskoeffizient ist abhängig von der Reynoldszahl  $Re_d$ , die auf dem kleinsten Durchmesser  $d$  der Venturi-Düse basiert,

$$C_D = a - b Re_d^{-n} \quad (2)$$

wobei  $n$  eine positive rationale Potenz ist. Der Parameter  $a$  entspricht der zweidimensionalen, reibungsfreien Flüssigkeitsströmung. Der Parameter  $b$  ist mit der Verdrängungsdicke der Grenzschicht im Düsenhals verbunden. Die Abhängigkeit der Reynoldszahl wird davon bestimmt, ob die Grenzschicht laminar oder turbulent ist, was sich im Wert der Exponenten ausdrückt:

$$C_{D,\text{lam}} = a - b_{\text{lam}} Re_d^{-0,5} \quad (3)$$

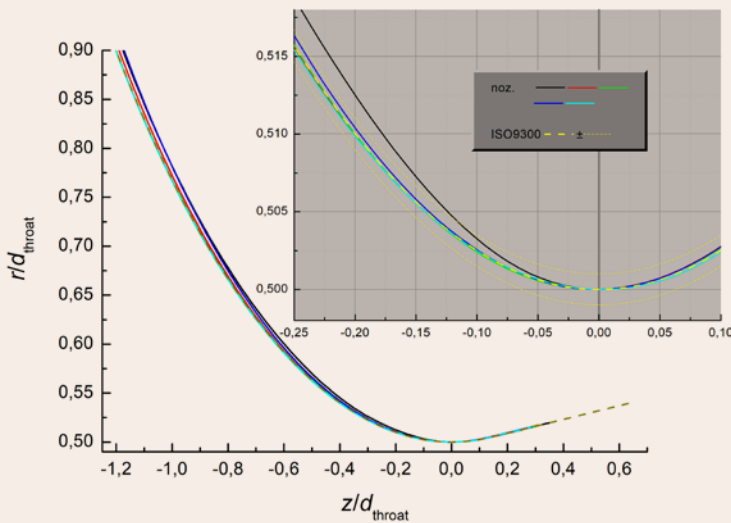
$$C_{D,\text{turb}} = a - b_{\text{turb}} Re_d^{-0,139} \quad (4)$$

In dem Übergangsbereich zwischen laminar und turbulent wird eine Mischfunktion, basierend auf den Gleichungen (3) und (4) angewendet [6]. Der Koeffizient  $a$  ist unabhängig davon, ob die Grenzschicht laminar oder turbulent ist. Wie in [6] beschrieben, können die Koeffizienten  $a$  und  $b_{\text{turb}}$  in  $b_{\text{lam}}$  ausgedrückt werden. Ist die Düsenkrümmung bekannt, so ist der Koeffizient  $b_{\text{lam}}$  der einzige freie Modellparameter und kann mittels einer Durchflusskalibrierung mit Luft bestimmt werden. Zusätzlich kann  $C_d$  aus den Grenzschichtgleichungen numerisch berechnet werden [6].

Nach ISO 9300 [5] 6.2.2.4 muss die Krümmung einer Venturi-Düse mit einem torusförmigen Halsteil zwei Mal den Halsdurchmesser betragen. Die Toleranz auf diese Anforderung beträgt  $\pm 10\%$ . Die Kontur des Düsen-Inneren wird mit einer Koordinatenmessmaschine vermessen und daraus die Krümmung des Düsen-Eintritts bestimmt.

**Bild 1** zeigt die Ergebnisse der Vermessungen für fünf Düsen. Die gelben Konturen zeigen die ISO 9300 Spezifikationen, die rund um den Hals von allen Düsen erfüllt werden. Bei  $z/d_{\text{throat}} < -0,1$  gibt es für die kleinste Düse eine Überschreitung der Toleranz. Dies ist jedoch nicht weiter relevant, da sich diese Abweichungen relativ weit vom Düsenhals entfernt befinden.

Die Düsen wurden zunächst mit atmosphärischer Luft in der PTB kalibriert. Das bedeutet, dass es einen Prüf-



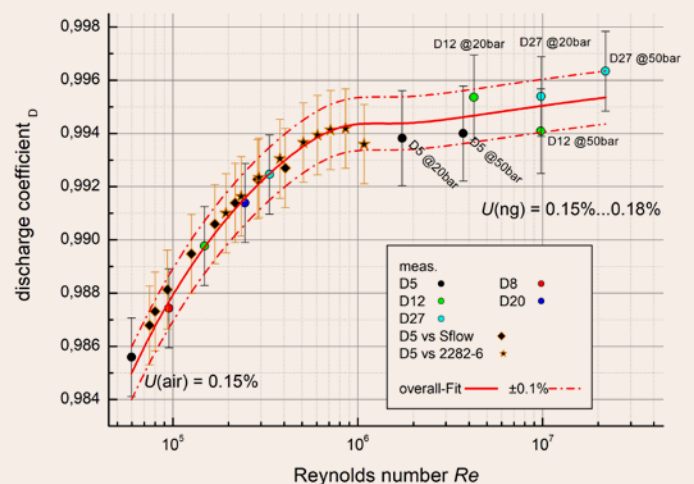
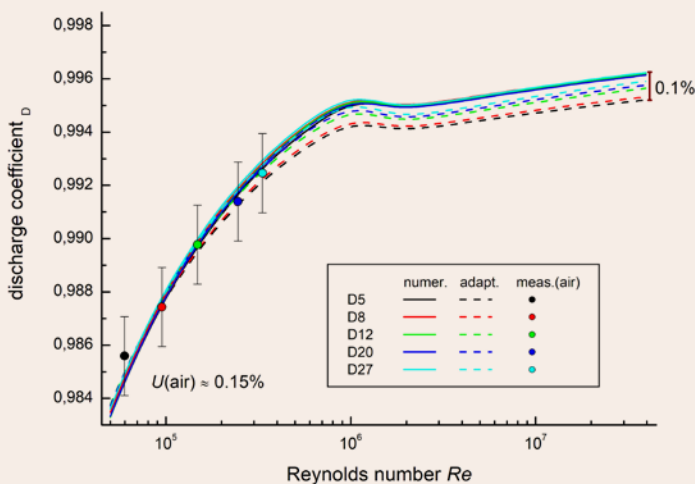
**Bild 1:** Kalibrierergebnis der fünf CFVNs. Der dimensionslose Düsenradius  $r/d$  wird in Abhängigkeit von der dimensionslosen Position  $z/d$  in der Düse dargestellt, wobei  $z=0$  dem Düsenhals entspricht. Negative -Werte beziehen sich auf den stromaufwärts gelegenen Teil der Düse. Die Linienfarben entsprechen der Düse wie folgt: D5 schwarz, D8 rot, D12 grün, D20 dunkelblau und D27 cyan. Die ISO 9300-Kurve und ihre Toleranzen sind gelb markiert. Das Diagramm mit dem grauen Hintergrund ist eine Vergrößerung des grauen Teils des Hauptdiagramms (Bild aus [1])

punkt pro Düse gibt. Diese Ergebnisse sind in **Bild 2** links dargelegt. Die gestrichelten Linien beziehen sich auf das analytische Modell, die durchgezogenen Linien entsprechen den numerischen Lösungen. Die Linien liegen innerhalb von 0,1 %, weshalb sie sich durch eine Kurve beschreiben lassen, welche im rechten Teil von **Bild 2** gezeigt wird. Hier werden auch zusätzliche Kontrollmessungen dargestellt, die mit Hochdruck-Erdgas und Druckluft verschiedener Eingangsdrücke erzeugt wurden. Diese Ergebnisse bestätigen, dass die  $C_D$ -Kurve tatsächlich mit einem freien Parameter bestimmt werden kann und für die verschiedenen Gase anwendbar ist.

### 3. Anwendung des PTB-Turbinenrad-gaszählermodells

Das PTB-Turbinenradgaszählermodell [7] wird zurzeit für Hochdruck-Prüfanlagen angewendet. Es ermöglicht eine Interpolation innerhalb der Drücke und Durchflüsse, für welche die Anlage kalibriert ist. Auch für Ringvergleiche wurde dieses Verfahren erfolgreich angewendet [8]. In dieses Modell wird die Abweichung des Turbinenradzählers  $e_{TM}$  aus einem Beitrag der Lagerreibung  $e_b$ , einem Beitrag der Strömungskraft  $e_{Re}$  und einem Beitrag aufgrund des Mach-Effekts bei hohen Durchflussraten  $e_p$  zusammengesetzt:

$$e_{TM} = e_b + e_{Re} + e_p \quad (5)$$



**Bild 2:** Ergebnisse der Kalibrierungen der Schalldüsen. Der  $C_D$ -Faktor ist als Funktion der Reynoldszahl  $Re$  des Düsenhalses aufgetragen. Links: Messungen und vorhergesagte Kurven auf der Grundlage von Messungen an atmosphärischer Luft. Rechts: zusätzliche Überprüfungen der D5-Düse mit Druckluft und der D5, D12 und D27 mit 20 bar und 50 bar Erdgas. Die durchgezogene Kurve ist identisch mit dem Mittelwert der zehn Kurven in der Abbildung links. Die erweiterte Unsicherheit beträgt 0,10 % (Bild aus [1])

Die von der Reynoldszahl abhängige Zählerabweichung ist:

$$e_{Re} = \sum_j^n a_j \left[ \log(Re/10^6) \right]^j \quad (6)$$

Die Koeffizienten  $a_j$  ( $j=0 \dots n$ ) werden durch Kurvenanpassung ermittelt. Der Wert von  $n$  wird zwischen 1 und 4 gewählt, je nach Ergebnis der besten Kurvenanpassung. Der Faktor  $10^6$  wird eingeführt, um Argumente des Logarithmus zu erhalten, die um 1 herum liegen, was die numerische Stabilität der Kleinste-Quadrate-Anpassung unterstützt. Die Re-Zahl ist definiert als:

$$Re = \frac{\rho v D}{\eta} = \frac{4 \rho Q}{\pi D \eta} \quad (7)$$

wobei  $\rho$  die Dichte,  $D$  der innere Nenndurchmesser des Zählers,  $\eta$  die dynamische Viskosität und  $Q$  der Volumendurchfluss ist.

Die Abweichung aufgrund von Lagerreibungskräften wird beschrieben durch:

$$e_b = \frac{b_0}{\rho Q^2} + \frac{b_1}{\rho Q} \quad (8)$$

wobei die zählerspezifischen Koeffizienten  $b_0$  und  $b_1$  von den charakteristischen Zeiten der sogenannten Sprung- und Auslauftests bestimmt werden [8, 7]. Der Auslauftest wird bei geringer Dichte und ohne Strömung durchgeführt. Bei den Sprungtests wird der Durchfluss unter stationären Bedingungen sprunghaft um 10 % von  $Q_{max}$  erhöht oder verringert.

Die Abweichung aufgrund des Mach-Effekts beträgt:

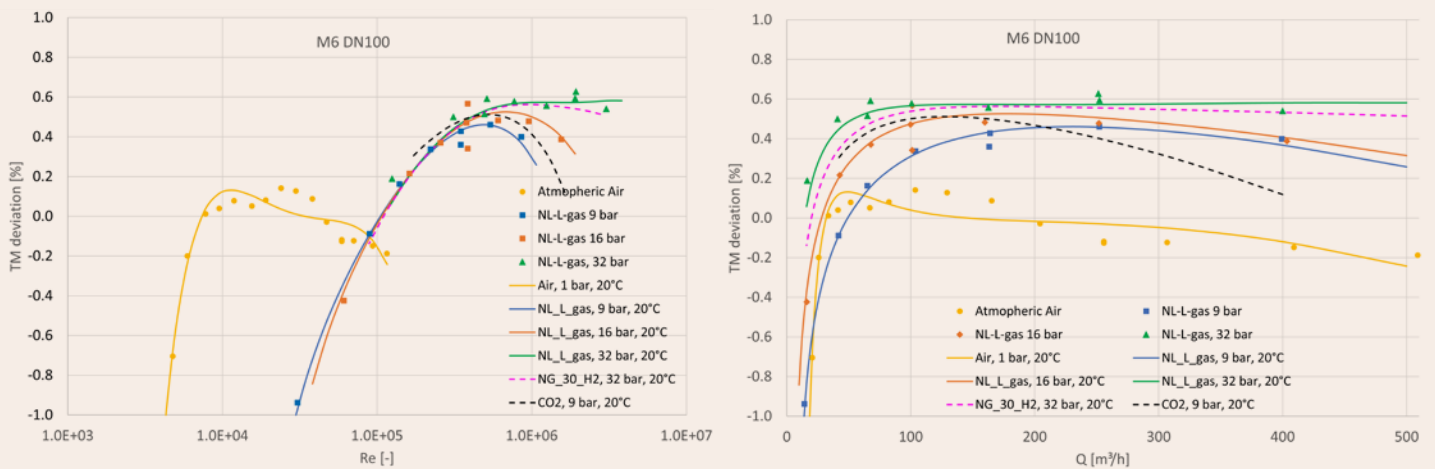
$$e_b = c_p Q^2 \frac{\rho}{p} \quad (9)$$

wobei  $p$  der Druck und  $c_p$  ein zählerspezifischer Koeffizient ist, der darüber hinaus von der Gasart abhängig ist.

**Bild 3** zeigt die Ergebnisse eines Turbinenradgaszählers, der mit atmosphärischer Luft und mit 9, 16 und 32 bar Erdgas kalibriert wurde. Links wird die Messabweichung als Funktion der Reynoldszahl dargestellt. Rechts sind die gleichen Messergebnisse gegen den Durchfluss aufgetragen. Die Koeffizienten  $b_0$  und  $b_1$  sind mithilfe von Sprung- und Auslauftests bestimmt worden. Die durchgezogenen Linien wurden nach dem Turbinenradgaszählermodell bestimmt. Alle Kurven wurden mit den gleichen Modellparametern berechnet. Die magentafarbenen und schwarzen Strichlinien entsprechen den Vorhersagen für Erdgas mit 30 % Wasserstoff sowie reinem Kohlendioxid. Die gezeigten Quelldaten sind aus [1].

### 4. Praxisbeispiel

2021 ergab sich die Gelegenheit, die beiden oben genannten Verfahren gleichzeitig anzuwenden [1]. Während eines Joint Industry Projects (JIP) untersuchte die DNV in Groningen, Niederlande, die Leistung der derzeit verfügbaren Messtechnologien beim Betrieb mit nicht-konventionellen Gasen. Diese Gase können hohe CO<sub>2</sub>-Anteile aus Biogasen oder aus der Kohlenstoffabschei-



**Bild 3:** Kalibrierungsergebnisse der DN100 (TM6), die mit Groningen-Gas bei 9, 16 und 32 bar absolut erzielt wurden. Links ist die Zählerabweichung  $e_{TM}$  [%] gegen die Reynoldszahl  $Re$  [-] auf einer logarithmischen Skala aufgetragen. Rechts wird die gleiche Zählerabweichung gegen den Durchfluss gezeigt. Die Luftkurven (gelb) sind die Kontrollmessungen. Die Strichlinien sind die interpolierten Kurven für Erdgas mit 30 % Wasserstoff (magenta) und 100 % Kohlendioxid (schwarz)

dung und -speicherung (CCS) enthalten. Auch Wasserstoff kann im Rahmen der Energiewende in den Gasnetzen dem Erdgas beigemischt werden. Ziel der Studie ist es, die Messempfindlichkeit der Instrumente für diese Gase zu verstehen und Skalierungsregeln festzulegen. Ein Skalierungsverfahren ermöglicht die Kalibrierung von Gasmessgeräten mit einem Gas, das sich von der Feldanwendung unterscheidet.

Für die JIP-Experimente wird ein rückführbares Referenzsystem benötigt, das nachweisbare Unsicherheiten in Bezug auf die Art des Gases oder die Zusammensetzung des Gasgemischs einschließt. Der erwünschte Durchflussbereich 16-1.000 m<sup>3</sup>/h wird durch zwei parallele, mit Coriolis-Zählern und Turbinengaszählern ausgestatteten Leitungen abgedeckt. Das Referenzsystem wird um einen Satz von fünf kritischen Venturi-Düsen erweitert. **Bild 4** zeigt, dass die Rückführung der CFVNs, Turbinenzähler und Coriolis-Zähler aus drei voneinander unabhängigen Ketten besteht. Zusätzlich wurden die Lagerreibungsparameter des Turbinenzählermodells in der PTB bestimmt (linke gestrichelte Linie). Die Coriolis-Zähler sind von DNV auf ihre Erdgasprüfanlage kontrolliert worden (rechte gestrichelte Linie).

Die Tatsache, dass drei Arten von Referenzen unabhängig voneinander rückführbar sind, macht diese Referenzen vergleichbar wie bei einem Ringvergleich. Der Massendurchfluss  $q$  der Turbinenzähler (TM), der

Coriolis-Zähler (CMF) und der kritischen Düsen (SN) sind in den nachfolgenden Gleichungen beschrieben:

$$q_{TM} = \frac{pQ_{TM}}{1+e_{TM}} = \frac{pM}{ZR_u T} \cdot \frac{Q_{TM}}{1+e_{TM}} \quad (10)$$

$$q_{CMF} = q_{g,CMF}^c \quad (11)$$

$$q_{SN} = A_{throat} C_{DC} \cdot \frac{p_0 \sqrt{M}}{\sqrt{R_u T_0}} \quad (12)$$

In den Gleichungen (10)-(12) ist  $Z$  der Realgasfaktor,  $T$  die absolute Temperatur,  $e_{TM}$  die Abweichung oder der Fehler des Turbinengaszählers aus Gleichung (5), und  $q_{g,CMF}^c$  der kompensierte Massendurchfluss. Die in den Gleichungen aufgeführten Größen sind gegenseitig unabhängig. Nur über die molare Masse  $M$  entsteht eine Korrelation, die in der Unsicherheitsrechnung beglichen wird.

Der gemeinsame Referenzwert für den Massendurchfluss ist der mit dem inversen Quadrat der Standardunsicherheiten gewichtete Mittelwert der drei Massendurchflüsse:

$$q_{CRV} = \frac{\frac{1}{u_{q,TM}^2} q_{TM} + \frac{1}{u_{q,CMF}^2} q_{CMF} + \frac{1}{u_{q,SN}^2} q_{SN}}{\frac{1}{u_{q,TM}^2} + \frac{1}{u_{q,CMF}^2} + \frac{1}{u_{q,SN}^2}} \quad (13)$$

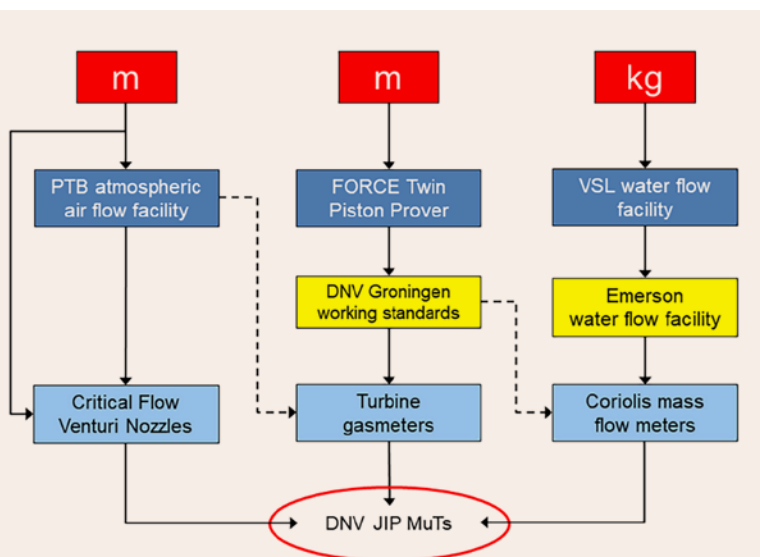
Die Standardunsicherheit der gemeinsame Referenzwert  $u_{q,CRV}$  ist in [1] berechnet.

Um die Vergleichbarkeit der Messergebnisse zu prüfen, wird die normalisierte Abweichung  $E_n$  verwendet. Dies ist der Quotient aus der Differenz zweier Messwerte und der Unsicherheit dieser Differenz. Für den Turbinenzähler (TM) verglichen mit dem gemeinsamen Referenzwert (CRV) ist  $E_n$ :

$$E_{n, TM} = \frac{q_{TM} - q_{CRV}}{k \sqrt{u_{q, TM}^2 - u_{q, CRV}^2}} \quad (14)$$

Wobei  $k$  die Deckungswahrscheinlichkeit ist. Für den Coriolis-Zähler und die CFVNs ist der  $E_n$ -Wert auf die gleiche Weise definiert. Wenn die Ergebnisse mit 95 % Vertraulichkeit übereinstimmen, sollten bei  $k=2$  mindestens 95 % der  $E_n$ -Werte zwischen  $-1$  und  $+1$  liegen.

**Bild 5** zeigt die  $E_n$ -Werte der Turbinenzähler, Coriolis-Zähler und den CFVNs. Die verwendeten Gase sind Stickstoff, Methan, Erdgas, Erdgas mit 5 %, 10 %, 15 %, 20 % und 30 % Wasserstoffanteil, eine Wiederholung mit Erdgas, und Erdgas mit 10 % und 20 % CO<sub>2</sub>-Anteil. Insgesamt gibt es 500 Messpunkte für alle Gerätetypen. Mehr als 95 % der Punkte erfüllen die  $E_n$ -Kriterien  $-1 \leq E_n \leq 1$ , was für eine Normalverteilung zu erwarten ist. Dieses Ergebnis bestätigt die Konsistenz zwischen den Referenzgeräten im Betrieb mit verschiedenen Gasen. Damit ist



**Bild 4:** Rückführbarkeitskette der JIP-Referenzen (hellblau), die zur Kalibrierung der Prüflinge verwendet werden. Die roten Rechtecke zeigen die Verbindung mit der SI-Basiseinheit an, die dunkelblauen Rechtecke sind die primären Einrichtungen, und die gelben Rechtecke stellen die Arbeitsnormale zur Kalibrierung der Geräte dar. Bei den gestrichelten Linien handelt es sich entweder um Kontrollen oder um die Bewertung von Modellparametern (Bild aus [1])

bewiesen, dass über ein Skalierungsverfahren die Rückführung gewährleistet sein kann.

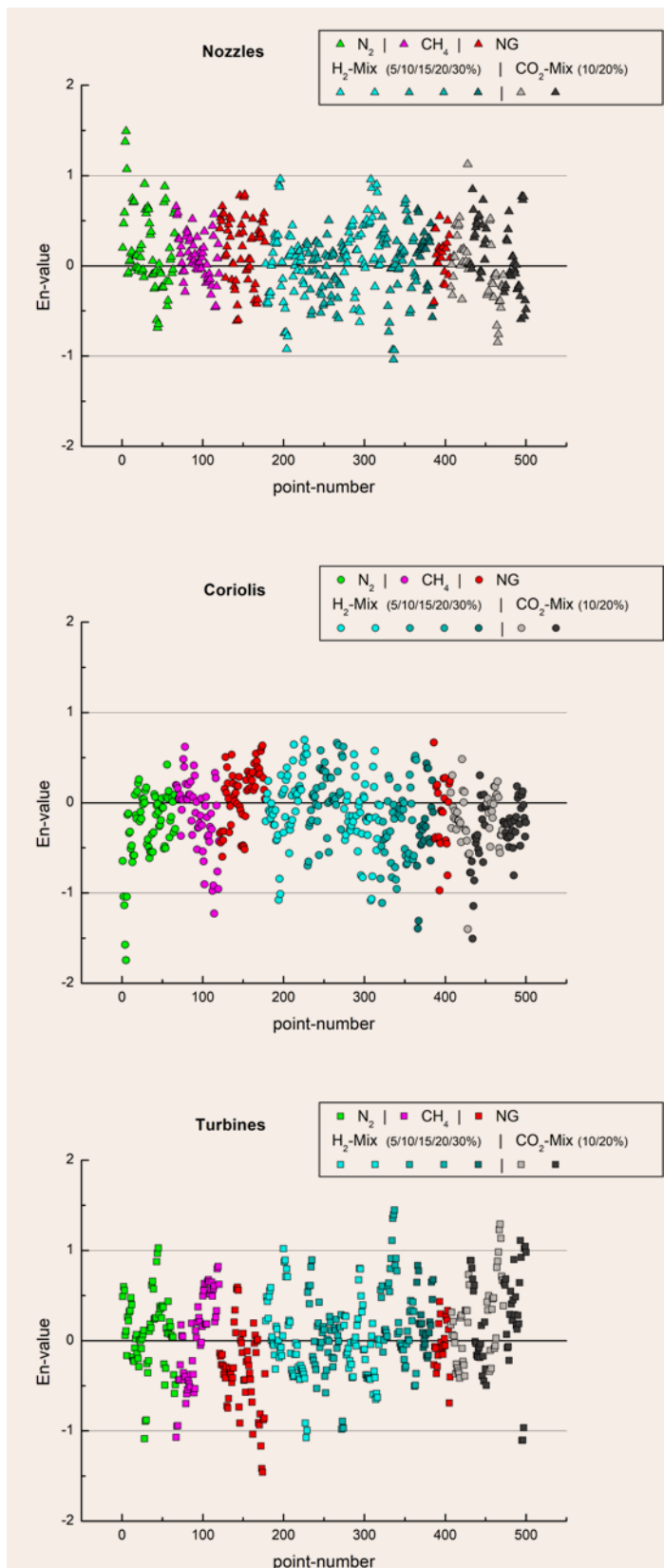
### 5. SGERG für Wasserstoffkonzentrationen über 10 %

Mehr als 30 Jahre nach der Einführung ist SGERG88, normalisiert in ISO 12213-3 [9], die am häufigsten verwendete Zustandsgleichung für Volumen-Mengennumerner eichpflichtiger Messungen von Erdgas. Die Einführung von wasserstoffangereichertem Erdgas führt zu Messproblemen bei Messsystemen, die SGERG88 für die Volumenumwertung verwenden. Der derzeitige SGERG88-Algorithmus lässt nur maximal 10 % Wasserstoff zu, nimmt das Vorhandensein von Kohlenmonoxid als festen Anteil an der Wasserstoffkonzentration an, legt einen Mindestwert für die relative Dichte von 0,55 fest und erwartet einen Brennwert zwischen 5,5 und 13,3 kWh/m<sup>3</sup>. Im Code des SGERG-Algorithmus wurden diese Einschränkungen überwunden, indem sie in Kommentare umgewandelt wurden.

Zur Bewertung der Genauigkeit [4] wurde der modifizierte SGERG-Algorithmus, genannt SGERG-mod-H<sub>2</sub>, mit realen Gasfaktoren von Wasserstoff-Erdgas-Gemischen aus der GERG-Datenbank verglichen. Im Druckbereich bis 50 bar und im Temperaturbereich zwischen -3 °C und +57 °C liegen die Unterschiede zwischen SGERG-Mod-H<sub>2</sub> und den experimentellen Werten im Allgemeinen innerhalb von 0,1 %. Die maximale Abweichung beträgt 0,139 % für das Gemisch B6 bei 1,85 °C und 45 bar. Größere Abweichungen werden für höhere Drücke beobachtet. Weitere Untersuchungen zeigen, dass AGA8-92DC im gleichen Temperatur- und Druckbereich mit den experimentellen Werten innerhalb von 0,05 % übereinstimmt.

Die Unsicherheit von SGERG-mod-H<sub>2</sub> wird durch Simulationen bewertet. Zunächst wird ein Gitter mit 21 äquidistanten Drücken und 21 äquidistanten Temperaturen definiert, das den Betriebsbereich des SGERG von 1 bis 121 bar und -8 bis 62°C abdeckt. Auf diesem Gitter wird die Gaszusammensetzung zufällig variiert, wobei die von Laughton [10] verwendeten Kriterien für Erdgas verwendet werden. Diesem Gas wird eine zufällige Menge Wasserstoff von bis zu 20 % zugesetzt, wobei die anderen Komponenten proportional reduziert werden. Während der Simulationen werden die relativen Abweichungen e der mit SGERG-mod-H<sub>2</sub> und dem RefProp10-Algorithmus [11] berechneten realen Gasfaktoren bestimmt<sup>1</sup>. An

<sup>1</sup> Bemerkung. Wenn RefProp10 erwähnt wird, ist das volle RefProp10 gemeint, ohne dass die Schalter GERG2008 oder AGA8 verwendet werden. In der RefProp9.1-Dokumentation wird erläutert: *The default pure fluid equations of state in REFPROP are not the same as those used in the GERG model, rather they are more complex with lower uncertainties. The GERG equations for the pure fluids are shorter, less complex, and faster, but slightly less accurate.*



**Bild 5:** E<sub>n</sub>-Werte gegen Messstellenummer für Düsen (oben), Coriolis-Zähler (mitten) und Turbinenradgasmessgeräte (unten)

jedem Gitterpunkt wird die Unsicherheit des SGERG-mod-H<sub>2</sub>  $U_{k=2}$  aus der mittleren Abweichung  $\bar{e}$  und der experimentellen Standardabweichung  $s(e)$  bestimmt:

$$U_{k=2} = 2\sqrt{\bar{e}^2 + s^2(e)} \quad (15)$$

Das Ergebnis, das in **Bild 6** grafisch dargestellt ist, bestätigt, dass die Unsicherheit für Erdgase, die die Laughton-Kriterien [10] erfüllen, bei Drücken bis zu 50 bar weniger als 0,1 % beträgt. Aber nicht alle Gasarten in Deutschland erfüllen die Kriterien von Laughton. Deshalb ist die Empfehlung [4], den modifizierten Algorithmus bis 26 bar zu nutzen. Für höhere Drücke wird AGA8-92DC empfohlen.

Die Stabilität des modifizierten Algorithmus ist gut. Während der Simulationen stürzte SGERG-mod-H<sub>2</sub> nicht ab, bei Wasserstoff mit weniger als 1 % anderer Gaskomponenten wurden jedoch einige Abstürze beobachtet. Diese wurden durch Änderung der Anfangsbedingungen der Iterationsroutinen im Quellcode behoben.

## 6. Fazit

Für CFVNs steht ein Verfahren zur Verfügung, das die Skalierung der Düsenleistung für jede Gasart und jeden Druck ermöglicht [1, 6]. Das verwendete Modell hat nur einen freien Parameter, der durch eine Luftstromkalibrierung ermittelt werden kann. Für Turbinenradgaszähler hat die PTB ein Modell entwickelt [7, 8], das eine Skalierung im Reynolds-Bereich ermöglicht, wobei Reibungs-

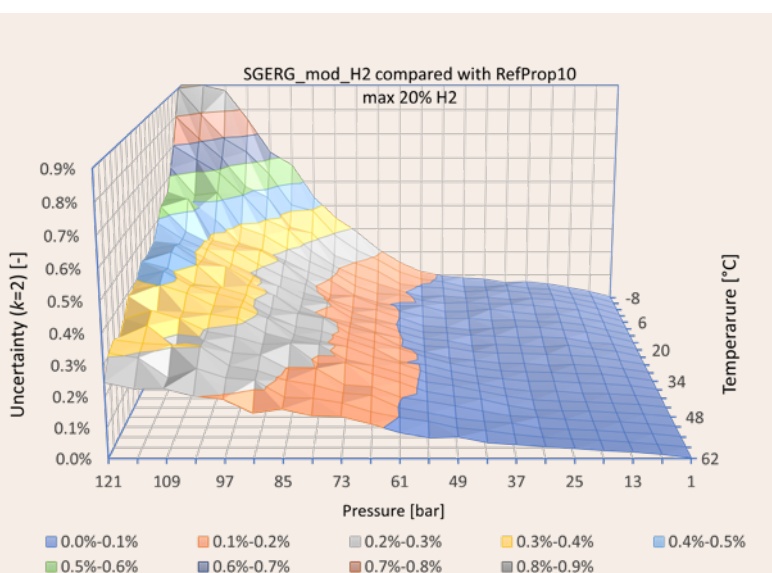
kräfte, die Lagerung des Zählers sowie die Druck- und Temperaturdifferenz zwischen dem Druckmesspunkt am Turbinenradgaszähler und dem Temperaturmesspunkt hinter dem Zähler berücksichtigt werden. Bei Coriolis-Zählern wurde behauptet, dass der Zähler unabhängig von der Gasart arbeitet. Für hochpräzise Messungen müssen jedoch Korrekturen vorgenommen werden [1].

Der Vergleich zwischen Düsen, Turbinenradzähler und Coriolis-Zähler mit verschiedenen Gasarten und Gasmischungen zeigt Konsistenz. Damit sind die hier beschriebenen Skalierungsverfahren für Turbinenradgaszähler und kritische Düsen für Rückführungszwecke von Wasserstoff und Wasserstoff-Erdgas-Gemische anwendbar.

Der übliche SGERG-Algorithmus wurde so modifiziert, dass Berechnungen mit bis 100 % Wasserstoff möglich sind. Simulationen zeigen, dass die Wunschunsicherheit von 0,1 % durch Einschränkung des Druckbereichs auf 26 bar für die in Deutschland üblichen Erdgase eingehalten werden kann.

## Literatur

- [1] van der Grinten, J.; Mickan, B.; Riezebos, H. und van Putten, D.: Gas flow traceability for non-conventional and renewable gases, 39<sup>th</sup> International North Sea Flow Measurement Workshop, Tønsberg, Norway, 26 - 29 October 2021
- [2] Jens, J.; Wang, A.; van der Leun, K.; Peters, D. und Busema, M.: Extending the European Hydrogen Backbone, Guidehouse, Utrecht 2021
- [3] Seidl, J.; Kappes, Th. und Mickan, B.: Planung und Bau des größten Wasserstoffprüfstands der Welt, 11. Workshop Gasmenngemessung – Gasanlagen – Gastechnik, 30-31 März 2022, Kötter, Rheine, zu veröffentlichen
- [4] Schley, P.; Nguyen, T.-T.-G.; Span, R.; Hielscher, A.; Kleppek, G.; van der Grinten, J.; Schmidt, R. und Sarge, St. M.: Berechnung von Realgasfaktoren und K-Zahlen mit der modifizierten SGERG-Gleichung SGERG-mod-H<sub>2</sub>, Technischer Bericht PK 1-5-3, DVGW Forschung, 21. November 2021
- [5] ISO 9300: Measurement of Gas Flow by Means of Critical Flow Venturi Nozzles, International Standards Organisation, Geneva 2005
- [6] Mickan, B.; van der Grinten, J. und Kappes, Th.: Primary and secondary flow standards for a wide variety of gas compositions – a solid base for reliable traceability facing the energy transition, 38<sup>th</sup> International North Sea Flow Measurement Workshop, 26 – 29 October 2020
- [7] Böckler, H.-B.: Messrichtigkeit von mechanischen Gasmessgeräten bei Verwendung von unterschiedlichen Gasbeschaffheiten – Modellgleichung zur Abschätzung der Messabweichung und Korrektur der Messergebnisse, Prüfschrift Universität Duisburg-Essen 2020
- [8] van der Grinten, Jos G.M.; Gunnarsson, A.; van der Beek, M. und Mickan, B.: An intercomparison between primary high-pressure gas flow standards with sub-permille uncertainties, 37<sup>th</sup> International North Sea Flow Measurement Workshop, Tønsberg, Norway, 22-24 October 2019, Reprinted in Cal Lab: The International Journal of Metrology, vol 27(4), 2020, pp 28-35



**Bild 6:** Erweiterte Unsicherheit [-] der Abweichung der Realgasfaktoren in Abhängigkeit von Druck [bar] und Temperatur [°C]. Die Z-Zahlen-Berechnung des SGERG-mod-H<sub>2</sub> Algorithmus wird mit dem RefProp10-Algorithmus [11] verglichen, der als Referenz verwendet wird. Erdgas wird mit bis zu 20 % Wasserstoff angereichert

[9] ISO 12213-3: Natural gas – Calculation of compression factor – Part 3: Calculation using physical properties, International Standards Organisation, Geneva 2006

[10] *Laughton, A.*: Gross characterization method for the calculation of thermophysical properties of natural gas using the GERG2008 equation of state, International Gas Union Research Conference 2017, May 24-26, 2017, Rio de Janeiro

[11] *Lemmon, E.W.; Bell, I. H.; Huber, M.L. und McLinden, M.O.*: NIST Standard Reference Database 23: Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties-REFPROP, Version 10.0, National Institute of Standards and Technology, Standard Reference Data Program, Gaithersburg, 2018

U erweiterte Unsicherheit  
 u Standardunsicherheit  
 z axiale Position in der Düse [m]

**Griechische Zeichen**

$\kappa$  Isentropenexponent [-]  
 $\rho$  Massendichte [kg/m<sup>3</sup>]

**Symbolliste**

A	Querschnittsfläche	[m <sup>2</sup> ]
$a_j$	Koeffizient Turbinenradgaszähler	[-]
$b_0$	Koeffizient Turbinenradgaszähler	[kg m <sup>3</sup> /s <sup>2</sup> ]
$b_1$	Koeffizient Turbinenradgaszähler	[kg/s]
$c_p$	Koeffizient Turbinenradgaszähler (abhängig von der Gaszusammensetzung)	[m <sup>-4</sup> ]
$C_D$	Durchflusskoeffizient	[-]
$c^*$	kritischer Durchflussfaktor	[-]
D	Nenn-Innendurchmesser des Turbinengaszählers	[mm]
d	Düsenhalsdurchmesser	[m]
e	Abweichung oder Fehler	[-]
k	Deckungswahrscheinlichkeit	[-]
M	molare Masse	[kg/kmol]
n	Potenz	[-]
$p_0$	Ruhedruck im Düseneinlauf	[Pa]
Q	Volumendurchfluss	[m <sup>3</sup> /h]
$q_m$	Massendurchfluss	[kg/s]
Re	Reynolds-Zahl	[-]
$R_u$	universelle Gaskonstante	[J · K <sup>-1</sup> · mol <sup>-1</sup> ]
r	Radius	[m]
$T_0$	Ruhetemperatur im Düseneinlauf	[K]

**Index**

0 Ruhebedingungen  
 CFVN kritische Venturi-Düsen  
 CMF Coriolis-Zähler  
 CRV gemeinsame Referenz  
 m Masse  
 SN kritische Venturi-Düsen  
 TM Turbinenradgaszähler  
 throat zu Halsbedingungen

Der Artikel ist basiert auf dem gleichnamigen Vortrag, der auf der 62. Erfahrungsaustausch der Chemiker und Ingenieure des Gasfaches, 23. September 2021, präsentiert wurde.

**Autor**



**Dr. Jos G.M. van der Grinten**  
 Physikalisch-Technische Bundesanstalt | Braunschweig |  
 Tel.: +49 531 592 1425 |  
 jos.v.grinten@ptb.de



**BESUCHEN SIE UNS ONLINE:**  
[www.gwf-gas.de](http://www.gwf-gas.de) | [www.gas-for-energy.de](http://www.gas-for-energy.de)