

Schnelle Bestimmung des Brennwertes mittels eines neuartigen Gasbeschaffenheitssensors

von **Achim Zajc, Thomas Ryll**

Die Gasbeschaffenheiten in den deutschen Transport- und Verteilnetzen schwanken bereits erheblich. Die Dynamik der Gasbeschaffenheiten wird aus den verschiedensten Gründen zunehmen. Ein Grund ist das Versiegen der traditionellen Quellen und die Zunahme der Einspeisung von Gas aus unkonventionellen Quellen. Auch die Marktraumumstellung von L-Gas auf H-Gas trägt hierzu bei. Diese Trends benötigen eine schnelle und zuverlässige Brennwertbestimmung. Hier will der folgende Beitrag einen Lösungsansatz liefern.

Rapid determination of the calorific value by means of a novel gas quality sensor

The gas quality in the German gas transmission and distribution network varies already considerably. The dynamics of the gas quality changes will increase for various reasons. One reason is the dry-up of traditional sources and the increased supply of gas from unconventional sources. The market space switching from L-gas to H-gas contributes to this, too. These trends require a fast and reliable determination of the calorific value. Here, the following article aims to provide a solution.

Die europäische und damit auch die deutsche Gaswirtschaft befinden sich im Umbruch. Traditionelle Erdgasquellen wie aus den Niederlanden und der einheimischen deutschen Erdgasförderung nehmen jährlich ab [1]. Das niederländische Erdgas wie das aus heimischer Produktion hat die sogenannte L-Gasqualität. Um sicherzustellen, dass Millionen von Gasgeräten bei abnehmender Produktion von L-Gas weiter störungsfrei arbeiten, muss Gas mit H-Gasqualität unter Zumischung von Stickstoff auf die L-Gasqualität eingestellt werden.

Werden neue traditionelle Erdgasquellen erschlossen, geschieht das in der Regel außerhalb Europas. Zunehmend wird auch in Deutschland die Einspeisung von LNG in das Erdgasnetz als Alternative zu russischem Erdgas diskutiert, um hier der Abhängigkeit von Russland entgegenzuwirken.

Parallel dazu gewinnt die Einspeisung von regenerativen Quellen in das Erdgasnetz zunehmend an Bedeutung. Außerdem bringt der stark zunehmende europäische und globale Erdgashandel Veränderungen mit sich.

So konnte durch ein Projekt der E.ON gezeigt werden, dass in den letzten Jahren 30 % der Haushaltskunden und 20 % der Großkunden von starken Schwankungen des Wobbe-Index betroffen sind. Die Schwankungen können bis zu max. 1,5 kWh/m³ betragen [2]. Die Variation der Gasbeschaffenheit in der Gaswirtschaft schlägt bis zum Gasverwender durch. Die Auswirkungen auf diverse industrielle Thermoprozesse (Produktqualität, Effizienz, Schadstoffe, Sicherheit, Lebensdauer etc.) kann sehr unterschiedlich sein [3–4].

Die Dynamik der Gasbeschaffenheit stellt die Energieabrechnung vor neue Herausforderungen und damit auch

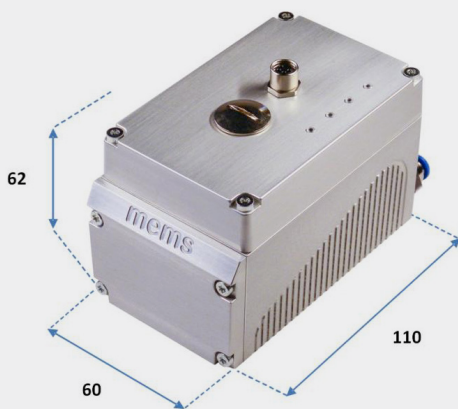


Bild 1: Gasbeschaffenheitssensor gasQS der Firma MEMS AG [6], (Maße in mm).

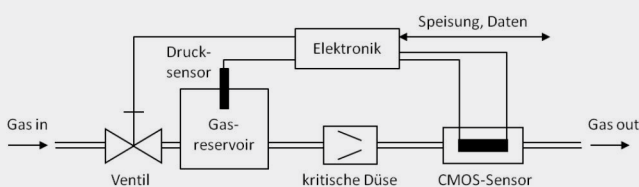


Bild 2: Schematischer Sensoraufbau [6]

die Messung der Gasbeschaffenheit [5]. Die klassische Gasbeschaffenheitsmessung bedient sich der Prozessgaschromatographie. Die Prozessgaschromatographie ist sehr genau und eichfähig. Jedoch ist diese Technologie kosten- und wartungsintensiv. Außerdem ist die Analysenzeit mit 3–5 min (dies ist vom jeweiligen Hersteller abhängig) für Regelungsprozesse wie für eine Erdgaskonditionierungsanlage ungeeignet. Wobbe-Geräte bieten die Möglichkeit, in Kombination mit einer Dichtemessung den Brennwert innerhalb von Sekunden zu messen. Jedoch sind diese Systeme ähnlich den der Prozessgaschromatographen sehr kosten- und wartungsintensiv.

Genau hier setzt die Sensortechnologie an. MEMS-Systeme (Microelectromechanical Systems, Chip-basierte Fertigungstechnologie von Sensoren/Aktoren, auch als Mikrosystemtechnik bezeichnet) sind erheblich günstiger herzustellen und durch die Miniaturisierung können diese Systeme auch wesentlich näher am Prozess (Probenentnahmestelle) installiert werden, um die Probenzeit erheblich zu reduzieren, sodass Analysenzeiten inklusive der Probenentnahme von < 15 Sekunden (T_{90} -Zeit) möglich sind. Der folgende Artikel demonstriert die Leistungsfähigkeit eines modernen Gasbeschaffenheitssensors der Firma MEMS AG.

AUFBAU UND PRINZIP DES GASBESCHAFFENHEITSSENSORS

Der nur 3,5 x 2,1 mm² große Sensorchip, industriell hergestellt in einem komplementären Metall-Oxid-Halbleiter (CMOS)-Prozess, bildet das Herz des mikrothermischen Sensors. Wie es der Name bereits andeutet, handelt es sich dabei um ein voll integriertes Heizdrahtanemometer mit allen analogen und digitalen Kreisen für Signalverstärkung, AD-Wandlung und digitaler Kommunikation. Der Chip erlaubt die Messung der Wärmeleitfähigkeit κ sowie der Wärmekapazität c_p eines Gasgemisches. Die Kombination des Sensorchips mit einer kritischen Düse liefert zusätzlich die Dichte ρ . Nun fehlt noch das Bindeglied in Form einer Korrelation zwischen diesen physikalischen Parametern des Gasgemisches und der Gasbeschaffenheit G . In **Bild 1** ist der Gasbeschaffenheitssensor gasQS der Firma MEMS AG abgebildet.

MESSUNG DER PHYSIKALISCHEN PARAMETER

In **Bild 2** ist der schematische Aufbau des Sensors dargestellt. Das zu analysierende Gas strömt bei geöffnetem Ventil aus der Messleitung ins Gasreservoir und fließt in Richtung der kritischen Düse.

Ist der Gasstrom in der Zuleitung größer als der Abfluss durch die Düse, baut sich ein Druck im Gasreservoir auf. Erreicht der Druck einen Wert, bei dem die Düse in den kritischen Betrieb wechselt, wird kurz danach das Ventil geschlossen. Nun sinkt der Druck im Reservoir wieder, wobei der Druckabfall in guter Näherung einem exponentiellen Zerfallsgesetz folgt mit einer Zerfallszeit:

$$\tau \cdot \alpha \cdot \sqrt{M} \tag{1}$$

Das Molekulargewicht M wiederum ist für die meisten Gase direkt proportional zur Dichte ρ . Wird also der Druck im Reservoir als Funktion der Zeit mit einem Drucksensor gemessen, kann auf die Dichte des Gasgemisches geschlossen werden. Dieser einfache Zusammenhang gilt nur, solange die Düse kritisch betrieben ist, was entweder einen Eingangsdruck von ca. 5 bar (Hochdruckvariante) oder einen Ausgangsunterdruck von ca. 300 mbar bedingt (Niederdruckvariante mit Pumpe).

Das CMOS-Sensorelement kann mit einer eindimensionalen Wärmeleitungsgleichung beschrieben werden:

$$\frac{c_p}{\kappa} \cdot \rho \cdot v_x \cdot \frac{d}{dx} \cdot T = \nabla^2 \cdot T + \frac{1}{\kappa} \cdot \theta \tag{2}$$

mit $\rho \cdot v_x$ dem Massenfluss über das CMOS-Sensorelement, T der Temperatur, dT/dx dem Temperaturgradienten, $\nabla^2 T$ dem Laplace-Operator angewandt auf die Temperatur, c_p der Wärmekapazität, ρ der Dichte und κ der thermischen Leitfähigkeit. Der Wärmeeintrag des Heizdrahtes ist durch den θ -Term gegeben. Am Ende der Druckabfallmessung,

wenn der Massenfluss zum Stillstand gekommen ist, wird die linke Seite der Gleichung (2) zu null. Die Messung der Temperaturverteilung ($\nabla^2 T$) auf dem Sensorchip mittels symmetrisch zum Heizdraht stromauf- bzw. stromabwärtsliegenden Thermosäulen erlaubt demnach die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit κ .

Nebst der Messung der Dichte hat die kritische Düse weiter die Funktion der Generierung eines zum (gemessenen) Vordruck proportionalen Massenflusses. Da letzterer im Anschluss an die Düse über den Sensorchip fließt, tritt derselbe Massenfluss auch im Vorfaktor der linken Seite von Gleichung (2) auf. Damit wird ersichtlich, dass aus der Lösung von Gleichung (2) die Größe c_p / κ bestimmt werden kann und zusammen mit der bereits bekannten Wärmeleitfähigkeit κ die Wärmekapazität c_p .

KORRELATION

Lässt sich die gewünschte Gasbeschaffenheit (G) nicht direkt auf eine der Sensormessgrößen zurückführen, versucht man für eine möglichst breitgefächerte Reihe von bekannten Gasen, einen Zusammenhang zwischen Gasbeschaffenheit (G) und den gemessenen, physikalischen Gasparametern herzustellen, d. h. die Gasbeschaffenheit (G) mit den physikalischen Gasparametern zu korrelieren. Dies gelingt umso besser, je unabhängiger die physikalischen Gasparameter untereinander sind und je größer der physikalische Zusammenhang zwischen Gasbeschaffenheit (G) und diesen Parametern ist. Ist eine hinreichend genaue Korrelation gefunden, lässt sich die Gasbeschaffenheit (G) auch für eine unbekannte Gasmischung in der Regel aus den gemessenen, physikalischen Gasparametern gut korrelieren.

Der wahre Vorteil des Korrelationsprozesses liegt darin, dass die Zahl der korrelierbaren Größen nicht auf die Anzahl von Sensormessgrößen limitiert ist, da es sich beim Korrelationsprozess nicht um das Lösen eines Gleichungssystems handelt, wo die Anzahl unbekannter auf die Anzahl bekannter Größen beschränkt ist.

Je mehr Parameter zur Verfügung stehen, desto besser kann korreliert werden. Je genauer die Parameter gemessen werden können und je mehr über das zu messende Gas bekannt ist, desto genauer fällt das Resultat aus. Der verbleibende Fehler setzt sich einerseits aus dem reinen Korrelationsfehler und andererseits aus der Auswirkung von Messfehlern bei den physikalischen Gasparametern zusammen (**Bild 3**). Ersterer tritt auch auf, wenn die Ausgangsgrößen fehlerfrei gemessen werden können.

Das korrelative Messverfahren kann seine Vorteile vor allem dort ausspielen, wo es darum geht, auf eine Änderung der Gaszusammensetzung schnell reagieren zu können, wo man also nicht erst mehrere Minuten auf das Resultat einer Messung warten möchte, wie dies bei praktisch allen anderen Verfahren der Fall ist.

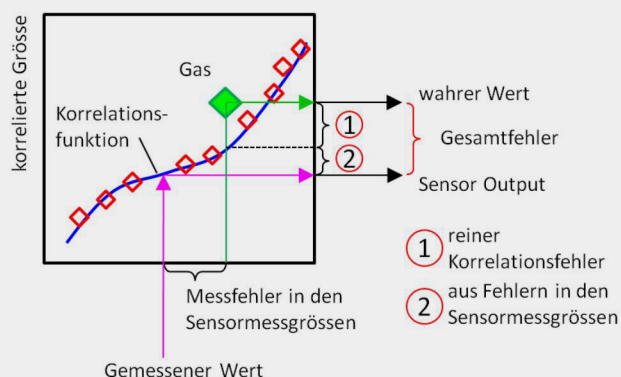


Bild 3: Fehlerquellen korrelatives Messverfahren [7]



Bild 4: Kalibrierung von mehreren Gasbeschaffenheitssensoren [6]

Am einfachsten wird die gesuchte Gasbeschaffenheit (G), in diesem Fall der Brennwert, bezüglich eines Referenzgases (hier G20, d. h. Methan) normiert aufgetragen. Sinnvollerweise wird das gewählte Referenzgas gleichzeitig zur Kalibrierung des Sensors benutzt. In **Bild 4** ist gezeigt, wie die Kalibrierung von mehreren Gasbeschaffenheitssensoren vom Typ gasQS der Firma MEMS AG gleichzeitig von statten geht. Da der Brennwert und die Sensormessgrößen ρ , κ und c_p ähnlichen physikalischen Gesetzen unterliegen, kann davon ausgegangen werden, dass sich eine Korrelation zum Brennwert finden lässt. Dies ist tatsächlich der Fall (**Bild 5**). Einzige Voraussetzung an die Korrelationsfunktion: Jedem Messwerttrippel ist eindeutig ein Brennwert zugeordnet. Ansonsten wählt man eine Funktion, bei der der zu erwartende Korrela-

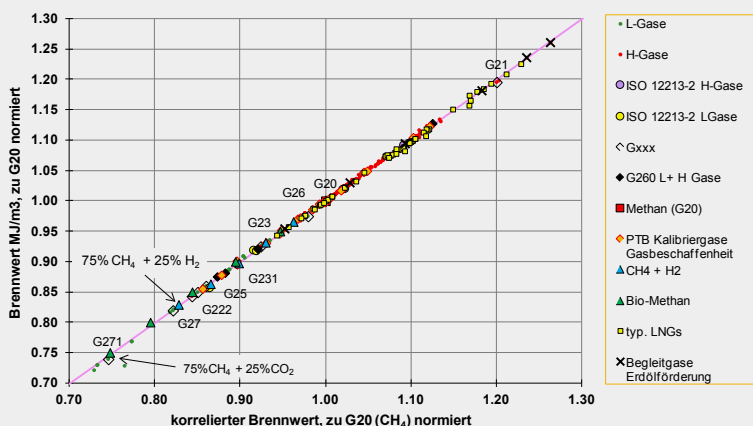


Bild 5: Korrelation des Brennwertes [8]

tionsfehler für die gewünschte Gasgruppe möglichst klein wird.

Das Korrelationsverfahren im vorliegenden Fall hat die Besonderheit, dass die Ausgangsgrößen der Korrelation effektive, physikalische Eigenschaften der Gasmischung darstellen, die aufgrund eines physikalischen Modells (Gl. (2)) aus der Temperaturverteilung auf dem Sensorchip bestimmt werden. Somit lassen sich das Verhalten des Sensorsystems bzw. die Messfehler für beliebige Gasgemische voraussagen, wenn deren Werte für ρ , κ und c_p aus Datentabellen bekannt sind. Dies hat den Vorteil, dass ein Sensor speziell auf bestimmte Gasgruppen (z. B. Biogase)

getrimmt werden kann, ohne dass eine große Anzahl von Gasen wirklich vermessen werden muss.

VERGLEICHSMESSUNGEN MIT PRÜFGASEN (BAM ZERTIFIZIERTE SEKUNDÄR-PRÜFGASE)

Zur Prüfung der Leistungsfähigkeit bei der Bestimmung des Brennwertes durch den Gasbeschaffenheitssensor gasQS wurden BAM zertifizierte Sekundärprüfgase verwendet. Die Zusammensetzungen der vermessenen Gase sind in der **Tabelle 1** zusammengefasst. Hierunter befinden sich auch die Prüfgase, die nach der Technischen Richtlinie G16 für eine „vollständige messtechnische Prüfung“ notwendig sind [9]. Die Prüfgase nach der Technischen Richtlinie G16 sind auch für die Erdgasgeräte nach der Technischen Richtlinie G14 für Biogas anwendbar [10]. Ebenso ist unter den verwendeten Prüfgasen das sogenannte „12M“-Prüfgas, das gemäß der PTB-Anforderung 7.63 (hier: Gasgemische nach der PTB-Anforderung 7.63 vom Januar 2016 [11]) als Kalibriergas mit mehr als elf Komponenten geeignet ist.

Die Messungen wurden im Laboratorium der BEGA.tec in Berlin durchgeführt. Hierbei wurden die in der Tabelle 1 aufgeführten Prüfgase von zwei unterschiedlichen Gasbeschaffenheitssensoren vom Typ gasQS zum einen mit der Seriennummer SN06 und zum anderen mit der Seriennummer SN15 vermessen. Das Laboratorium der BEGA.tec ist als staatlich anerkannte Prüfstelle für Messgeräte für Gas unter der Kennung GC9 zugelassen. Die Prüfstelle GC9 ist insbesondere auf dem Gebiet der Gasbeschaffenheitmessgeräte und der Brennwertmessgeräte tätig. Weiterhin ist die GC9 als Prüfstelle zur amtlichen Zertifizierung von

Tabelle 1: Zusammensetzung der mit dem Gasbeschaffenheitssensor gasQS vermessenen Prüfgase

Bezeichnung	P1-9K	12M	L1-8K	H1-11K	9M	6H	11D	6L	11M	L1-11K
Details	Mol-%									
Wasserstoff	0,3001	1,0172			0,1984					
Stickstoff	2,944	4,0362	12,019	1,3398	4,0571	0,4344	4,0165	14,408	3,9761	11,0664
Sauerstoff	0,2957	0,5036			0,4183				0,4988	
Kohlenstoffdioxid	3,5266	1,5279	4,4997	0,3479	2,5076	1,8947	1,5029	0,9992	1,5197	1,5627
Ethan	0,3557	4,0994	0,748	0,394	2,5728	9,8515	4,0255	3,0053	4,0421	0,7463
Propan	4,6865	1,0306	0,3007	0,1941	1,0055	3,5502	1,0024	0,5032	0,9983	0,2993
2-Methyl-propan	0,2977	0,2036	0,2006	0,0994	0,1996		0,1929		0,1983	0,0989
n-Butan	0,2939	0,2041	0,2	0,1004	0,1998	1,0677	0,1928	0,0997	0,1982	0,0981
2-Methyl-butan		0,0499	0,0491	0,0505			0,0498		0,0501	0,0493
2,2-Dimethyl-propan				0,0505			0,0467			0,0515
n-Pentan		0,05		0,05			0,0497		0,0491	0,05
n-Hexan		0,0498		0,0488			0,0495		0,0482	0,0459
Methan	87,2998	87,228	81,983	97,3246	88,8409	83,202	88,8713	80,985	88,421	85,9316

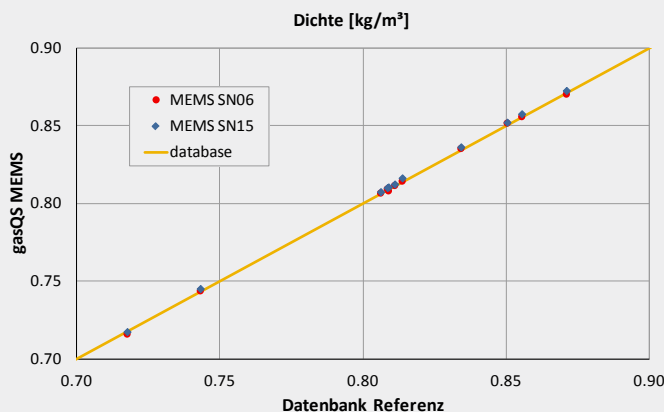


Bild 6a: Korrelation der Dichte

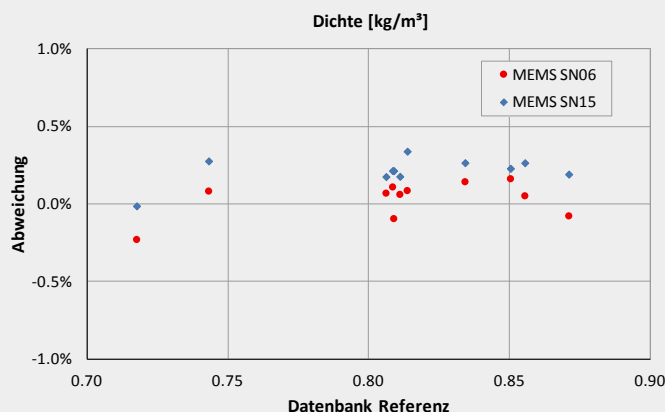


Bild 6b: Abweichung von der Referenzdatenbank

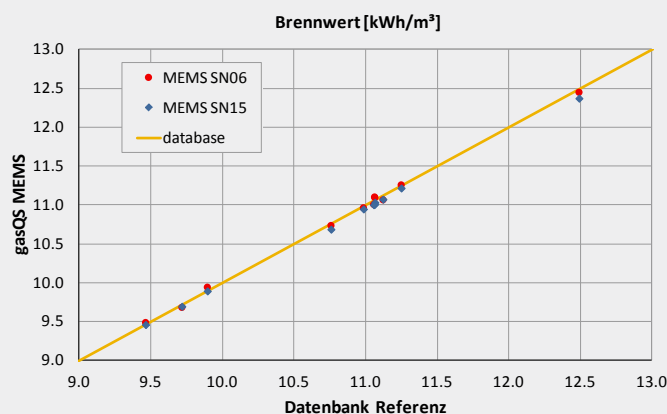


Bild 7a: Korrelation des Brennwertes

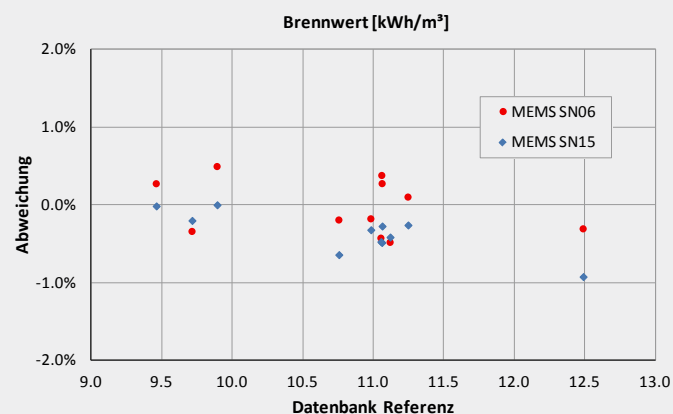


Bild 7b: Abweichung von der Referenzdatenbank

Prüfgasen 3. Ordnung zugelassen (Kalibriergase für PGC und Gasbeschaffenheitsmessgeräte).

Die Ergebnisse, die bei den Vergleichsmessungen mit Hilfe der BEGA.tec erzielt wurden, sind für die Dichtemessung in **Bild 6** und die Ergebnisse der Brennwertes in **Bild 7** dargestellt.

Im Bild 6a sind die Ergebnisse der Dichtemessung des Gasbeschaffenheitssensors gasQS gegen die Referenzwerte aus NIST Standard Reference Database 23 aufgetragen [12]. Aus der graphischen Darstellung wird die hervorragende Korrelation deutlich. Im Bild 6b ist die Streuung der Einzelergebnisse für die Dichtemessung über alle Prüfgase gemäß der Tabelle 1 dargestellt. Es wird deutlich, dass die Ergebnisse in einem Band von $\leq \pm 0,4\%$ liegen.

Analog zu Bild 6 sind im Bild 7a die erzielten Messwerte für den Brennwert für die beiden Gasbeschaffenheitssensoren gasQS mit den Seriennummern SN06 und SN15

gegen den NIST-Referenzwert aufgetragen. Auch hier ist eine hervorragende Korrelation festzustellen. Die graphische Darstellung der Abweichungen der Einzelwerte vom NIST-Referenzwert zeigt, dass die Ergebnisse mit einem Fehler von $\leq \pm 1\%$ behaftet sind (Bild 7b).

In **Tabelle 2** sind die typischen Erdgaszusammensetzungen für H- und L-Gase gemäß der DVGW Richtlinie G260 aufgeführt [13]. Vergleicht man die Werte mit Tabelle 1, so kann man erkennen, dass das Prüfgas „12M“ in der Zusammensetzung ein H-Gas repräsentiert und das Prüfgas „L1-8K“ ein L-Gas. Die Messabweichung für den Brennwert des „12M“-Prüfgases vom NIST-Referenzwert beträgt $-0,18\%$ (SN06) und $-0,32\%$ (SN15). Für die Messabweichung für das „L1-8K“-Prüfgas vom NIST-Referenzwert erhält man $0,27\%$ (SN06) und $-0,01\%$ (SN15). Daraus wird deutlich, dass im Falle einer Erdgaskonditionierung, bei der H-Gas mit Stickstoff auf L-Gas-Niveau gemischt wird, der Gasbeschaf-

Tabelle 2: Typische Erdgaszusammensetzungen nach DVGW Richtlinie G260 [13]

Bezeichnung	Einheit	Russ.-Erdgas H	Nordsee-/Erdgas H	Dänemark/Erdgas H	Holland/Erdgas L	Deutschland Erdgas L	Biogas H	Biogas H +LPG
Methan	Mol-%	96,96	88,71	90,07	83,64	86,46	96,15	90,94
Stickstoff	Mol-%	0,86	0,82	0,28	10,21	10,24	0,75	0,69
Kohlenstoffdioxid	Mol-%	0,18	1,94	0,60	1,68	2,08	2,90	2,68
Ethan	Mol-%	1,37	6,93	5,68	3,56	1,06		
Propan	Mol-%	0,45	1,25	2,19	0,61	0,11		5,00
Butane	Mol-%	0,15	0,28	0,90	0,19	0,03		0,50
Pentane	Mol-%	0,02	0,05	0,22	0,04	0,01		
Hexane + höhere KW	Mol-%	0,01	0,02	0,06	0,07	0,01		
Sauerstoff	Mol-%	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,2	0,19
Gesamtschwefel	mg/m ³	< 3	< 5	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3
Brennwert	MJ/m ³	40,3	41,9	43,7	36,8	35,4	38,3	41,9
Brennwert	kWh/m ³	11,2	11,6	12,1	10,2	9,8	10,6	11,6
Normdichte	kg/m ³	0,74	0,81	0,81	0,83	0,81	0,76	0,83
Wobbeindex	MJ/m ³	53,1	52,9	55,0	46,0	44,7	50,0	52,3
Wobbeindex	kWh/m ³	14,8	14,7	15,3	12,8	12,4	13,9	14,5
Methanzahl	–	90	79	72	88	97	102	76

fenheitssensor gasQS zu Prozesskontrolle und -steuerung eingesetzt werden kann.

DISKUSSION DER ERGEBNISSE UND AUSBLICK

Der neuartige Gasbeschaffenheitssensor gasQS der Firma MEMS AG liefert innerhalb einer T₉₀-Zeit von < 15 Sekunden die Ergebnisse der Brennwert- und Dichtemessung innerhalb einer Fehlerschwankung von $\leq \pm 1\%$ über einen sehr weiten Applikationsbereich. Beschränkt man den Applikationsbereich zum Beispiel auf die Konditionierung von H-Gasen mit Stickstoff auf L-Gase, so kann die Messabweichung $\leq \pm 0,5\%$ betragen. Ein Prozessgaschromatograph kann hier mit einer Messabweichung von $\leq \pm 0,1\%$ für die Brennwertmessung aufwarten. Im Gegenzug dazu benötigt der Prozessgaschromatograph allerdings auch 3–5 min (das hängt vom Hersteller ab).

Vergleicht man neben den Messabweichungen die Schnelligkeit und die Komplexität eines solchen Messsystems (Gerät mit Peripherie wie zum Beispiel Druckreduzierung, Probenumschaltung, Prüfgasversorgung und Entnahmesonde) mit der eines Prozessgaschromatographen, so hat der gasQS den Vorteil der Wartungslosigkeit, da kein Trägergas und auch kein Prüfgas zur Kalibrierung notwendig ist. Dieser Vorteil wird umso deutlicher, wenn man die Investitionskosten vergleicht. Ein Messsystem auf

Basis des gasQS lässt sich komplett mit Peripherie für ca. € 60.000 ohne Inbetriebnahme realisieren. Ein Prozessgaschromatograph hingegen kommt auf einen Systempreis mit Peripherie von ca. € 150.000 ohne Inbetriebnahme.

Generell kann der Gasbeschaffenheitssensor gasQS bei Steuerungsprozessen zur Überwachung des Brennwertes von nicht eichamtlichen Messungen wie Gasbeschaffenheitsmessung aufgrund seiner sehr kurzen T₉₀-Zeit von 15 Sekunden eingesetzt werden. Wenn der Gasbeschaffenheitssensor weiterentwickelt wird und auch die eichamtliche Zulassung erlangt, so könnte dieser Sensor in Verteilnetzen zur Bestimmung des Brennwertes eingesetzt werden.

LITERATUR

[1] Schumann, J.: Von „L“ nach „H“ – Gasmärkte im Zeichen sich verändernden Gasqualitäten. gwf-Gas Erdgas (2013), S. 828-832

[2] Nitschke-Kowsky, P.; Martino, A.; Weißing, W.; Vogt, M.: Gasbeschaffenheit und ihre Schwankungen in E.ON-Verteilnetzen. gwf-Gas Erdgas (2016), S. 166-176

[3] Leicher, J.; Giese, A.: Änderung der Gasbeschaffenheit in Deutschland und Europa: Auswirkungen auf industrielle Feuerungsprozesse (Teil 1). gwf-Gas Erdgas (2013), S. 754-760

- [4] Leicher, J.; Giese, A.: Änderung der Gasbeschaffenheit in Deutschland und Europa: Auswirkungen auf industrielle Feuerungsprozesse (Teil 2). *gwf-Gas Erdgas* (2013), S. 844-852
- [5] Kastner, J.: Neue Aufgaben für die Gasbeschaffenheitsmessung in der industriellen Gasanwendung. *gwf-Gas Erdgas* (2016), 166-176, 2016
- [6] Bildnachweis: MEMS AG
- [7] Soltic, P.; Biffiger, H.; Prêtre, P.; Kempe, A.: Micro-thermal CMOS-based gas quality sensing for control of spark ignition engines. Elsevier Verlag. *Measurement* 91 (2016), S. 661-679, http://authors.elsevier.com/a/1TKC0_5-2f-gx0
- [8] Prêtre, P.; Kempe, A.; Sabbattini, B.; Matter, D.: Messung der Gasbeschaffenheit, Foga-Projekt: Qualitätsschwankungen detektieren und Gasanwendungsprozesse optimieren. *AQUA & GAS* 12 (2014), S. 30-36
- [9] Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Technische Richtlinie G16: „Eichung und Prüfung von Gasbeschaffenheitsmessgeräten“ (Ausgabe 11/12, 2012)
- [10] Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Technische Richtlinie G14: „Einspeisung von Biogas in das Erdgasnetz“ (Ausgabe 11/07, 2007)
- [11] Physikalisch-Technische Bundesanstalt: „Gasgemische nach PTB-Anforderung 7.63“, Stand: Januar 2016 Physikalisch-Technische Bundesanstalt: „Gasgemische nach PTB-Anforderung 7.63“, Stand: Januar 2016
- [12] NIST Standard Reference Database 23, NIST Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties Database (REFPROP): Version 9.1, <http://www.nist.gov/srd/nist23.cfm>
- [13] Technische Regel DVGW G260: „Gasbeschaffenheit“, 2013

AUTOREN



Dr. **Achim Zajc**
 Metreg Technologies GmbH
 Fürstenwalde
 Tel.: 03361 / 76020-83
achim.zajc@metreg-technologies.de



Dr. **Thomas Ryll**
 BEGA.tec GmbH
 Berlin
 Tel.: 030 / 120211-601
ryll@begatec.de