

Echtzeit-Gasbeschaffenheitsmessung auf Basis von optischen und thermischen Gaseigenschaften

Real-time gas-quality measurement on the basis of optical and thermal gas properties

Die Zusammensetzung und die physikalischen Eigenschaften von Erdgas im Transportnetz variieren in Raum und Zeit. Die Kenntnis der Gasbeschaffenheit von Erdgas ist wichtig für den Gastransport, die Gasverwendung und die Abrechnung. Die Liberalisierung sowie das „Unbundling“ liefern weitere Impulse für eine effiziente Messung der Gasbeschaffenheit. Dieser Artikel beschreibt eine neue korrelative Messtechnologie, die sich auf optische und thermische Eigenschaften von Erdgas stützt. Die Technik erlaubt eine genaue und schnelle Online-Messung der Gaseigenschaften über einen weiten Bereich von natürlichen Erdgasen. Das auf dieser Technik basierende Messgerät gas-lab Q1 benötigt nur Methan für die Kalibrierung und weist relativ geringe Kosten für Anschaffung und Unterhalt auf. Die neue Technologie arbeitet bereits erfolgreich in einer Vielzahl von Anwendungen bei der Verteilung, Verwendung und Abrechnung von Erdgas.

The composition and physical properties of natural gas in the distribution network vary in time and space. Knowledge of the quality of natural gas is important for gas transmission, gas use, and supply invoicing. Deregulation and "unbundling" provide further incentives for efficient measurement of gas quality. This article describes a new correlative measuring technology based on the optical and thermal properties of natural gas. The method permits precise high-speed on-line measurement of gas characteristics for a broad range of natural gas grades. The gas-lab Q1 analyzer based on this technology requires only methane for calibration and involves only relatively low procurement and operating costs. The new technology is already in successful use in a large number of natural gas distribution, utilization and invoicing applications.

Erdgas ist ein Naturprodukt und seine Zusammensetzung variiert mit der Gasquelle. Beim Gastransport erfolgt wiederum eine Vermischung von verschiedenen Erdgastypen. Darüber hinaus wird die Variation der Erdgase durch zukünftige Einspeisungen z. B. von LNG aus neuen Quellen steigen. Es ist für die Produktion, den Transport, den Handel sowie die Verwendung von Erdgas von großer technischer, wie auch wirtschaftlicher Bedeutung, die Gaseigenschaften genau zu kennen und daher effizient zu messen.

Da der Erdgashandel auf der Energieabrechnung basiert, ist das Wissen über den sich ändernden Brennwert des Gases von großer Bedeutung. Darüber hinaus werden weitere Gasparameter wie z. B. Normdichte und CO₂-Gehalt bzw. alternativ die Gaszusammensetzung benötigt, um bei höheren Drücken das Volumen des Erdgases vom Betriebs- auf den Normzustand umzuwerten.

Ein anderer kritischer Gasparameter ist der Wobbeindex, dessen Echtzeitmessung

häufig bei der Steuerung von sensiblen Gasverwendungsprozessen verlangt wird.

Wenn Erdgas in einem Gasmotor verbrannt wird, ist die Kenntnis der Methanzahl zur Beurteilung der Klopfbarkeit von Bedeutung. Mit einer schnellen Messung der Methanzahl kann der Gasmotor optimal in Bezug auf Wirkungsgrad und Lebensdauer gesteuert werden.

In Gaskraftwerken wird für die Regelung der Gasturbinen häufig auch eine schnelle und genaue Gasbeschaffenheitsmessung gefordert, um die Turbinenparameter in Hinblick auf eine hohe Effizienz, niedrige Emissionen sowie hohe Lebensdauer auszubalancieren.

Dieser Artikel präsentiert eine neue korrelative Gasesstechnik für natürliche Erdgase. Die Technik basiert auf der Messung von optischen und thermischen Gaseigenschaften, die eine schnelle Online- und In-situ-Messung der Gaseigenschaften ermöglicht. Das Messverfahren kombiniert die Messung der Infrarotabsorption und der

Wärmeleitfähigkeit mit einem korrelativen Auswertalgorithmus. Das Gerät benötigt kein Trägergas und es kalibriert sich selbst automatisch mit Methan. Das Verfahren wurde mit einem breiten Satz von natürlichen Erdgasen getestet. Der volle Messbereich kann mit einem einzigen Kalibrierdatensatz abgedeckt werden.

Die neue Messtechnologie ist genauer und kostengünstiger als marktgängige Kalorimeter und Wobbeindexmessgeräte und benötigt keine aufwändige Klimatisierung. Im Vergleich zu Prozessgaschromatographen ist die neue Technik sehr viel schneller, hat niedrigere Investitions- und Betriebskosten und benötigt weder Trägergas noch komplexe erdgasähnliche Kalibriergase.

Die Praxisanwendungen des Gerätes reichen von der eichamtlichen Abrechnung bis hin zur Steuerung und Regelung von schnellen industriellen Prozessen.

Messmethode

Die hier vorgestellte Methode basiert auf der typischen Zusammensetzung von natürlichem Erdgas. Dieses besteht hauptsächlich aus Kohlenwasserstoffen (CH), Kohlendioxid (CO₂) und Stickstoff (N₂). Diese Komponenten machen typischerweise 99,9 % der Gaszusammensetzung aus. Deshalb kann man die molare Gaszusammensetzung von natürlichem Erdgas näherungsweise schreiben als:

$$XCH + xN_2 + xCO_2 = 1$$

Es sind xCH, xN₂ und xCO₂ jeweils die Molbruchteile von sämtlichen Kohlenwasser-



Dr.-Ing. Joachim F. Kastner
Elster-Instromet Systems GmbH,
Dortmund

Tel. 02 31 / 93 71 10 46
E-Mail:
j.kastner@elster-instromet.com



Michael Halm
Elster-Instromet Systems GmbH,
Dortmund

Tel. 02 31 / 93 71 10 25
E-Mail:
m.halm@elster-instromet.com

Tabelle 1: Zusammenhang zwischen Messwerten und korrelierenden Gaskomponenten
Table 1: The relationship between measured data and correlating gas components

Messwert		Korrelierende Gaskomponenten
ACH	Infrarotabsorption der Kohlenwasserstoffe	CH
ACO ₂	Infrarotabsorption des Kohlendioxids	CO ₂
λ	Wärmeleitfähigkeit	CH, N ₂ , CO ₂

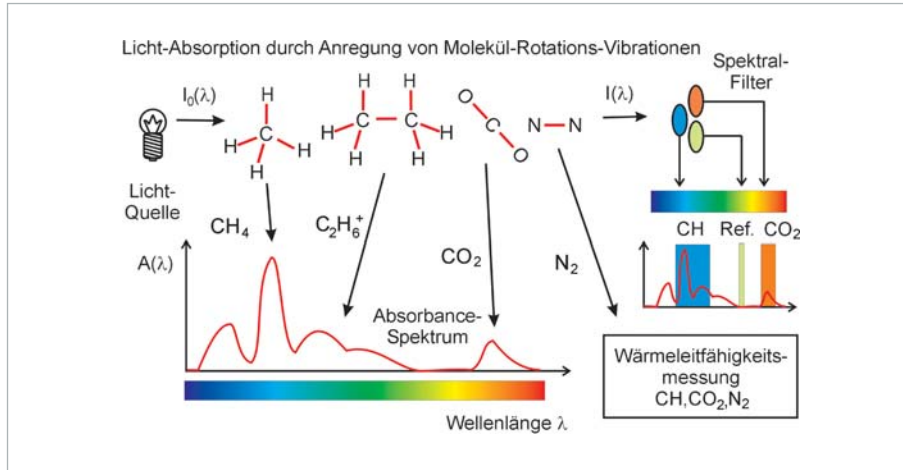


Bild 1: Messmethode: Die Absorption von Infrarotlicht korreliert mit der Konzentration und Zusammensetzung der Kohlenwasserstoffe und der Konzentration von Kohlendioxid. Die Wärmeleitung korreliert (nicht spezifisch) mit allen Gaskomponenten, also auch mit Stickstoff, der im Infrarotspektrum nicht absorbiert

Fig. 1: Measuring method: Absorption of infrared light correlates to hydrocarbon concentration and composition and to carbon dioxide concentration. Thermal conductivity correlates (non-specifically) to all gas components, i.e., including nitrogen, which does not absorb in the infrared spectrum

stoffen (CH), von Stickstoff (N_2) und von Kohlendioxid (CO_2). Die Kohlenwasserstoffe bestehen hauptsächlich aus Alkanen ($\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$), deren Konzentrationen kontinuierlich mit höherer Ordnung der Alkane abnehmen.

Die Auswahl der Messwerte für die neue Messtechnologie korrespondiert mit dieser modellhaften Zusammensetzung von natürlichem Erdgas. Die gemessenen Werte zeigt **Tabelle 1**.

Diese physikalischen Daten korrelieren direkt mit der molekularen Zusammensetzung des Modellgases und machen es deshalb möglich, die wichtigsten Eigenschaften von Erdgas zu bestimmen. **Bild 1** verdeutlicht die Messmethode: Kohlenwasserstoffe und Kohlendioxid absorbieren infrarotes Licht, wodurch die entsprechenden CH- und CO_2 -Moleküle zu Rotations-schwingungen angeregt werden. Die spektrale Intensität dieser Absorption ist spezifisch für die jeweilige Komponente und proportional zur Konzentration der Komponente. Die Infrarotabsorption wird durch die Abschwächung von weißem Licht in Folge der IR-Absorption der CH- bzw. CO_2 -Moleküle gemessen. Um auch nicht IR-absorbierende Gaskomponenten

wie z. B. Stickstoff zu erfassen, wird zusätzlich die Wärmeleitfähigkeit des Gases gemessen, die unspezifisch empfindlich für alle vorhandenen Gaskomponenten ist.

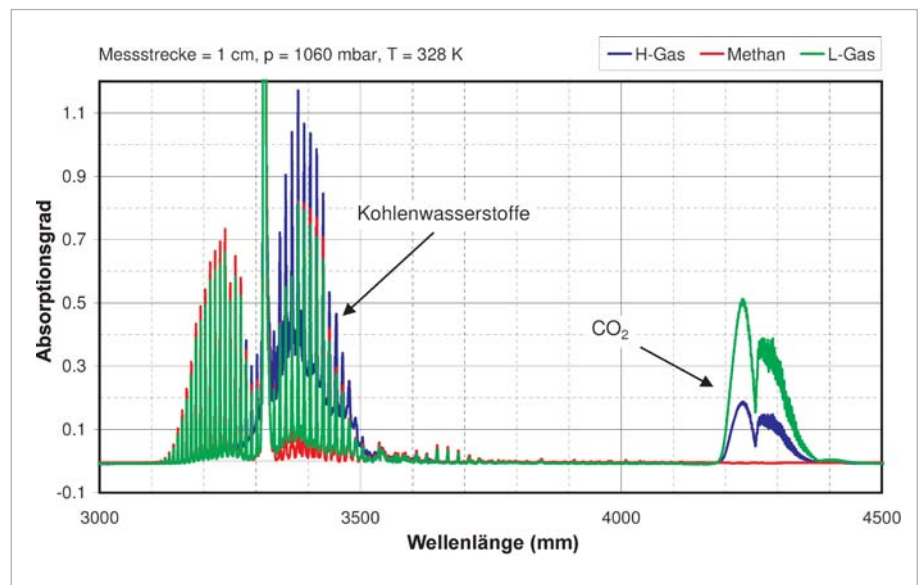


Bild 2: Absorptionsspektren von typischen Gasen: Methan ($x_{\text{CO}_2} = 0$), H-Gas mit niedriger CO_2 und hoher CH-Konzentration, L-Gas mit hoher CO_2 und niedriger CH-Konzentration

Fig. 2: Absorption spectra of typical gases: Methane ($x_{\text{CO}_2} = 0$), H gas with low CO_2 and high CH concentration, L gas with a high CO_2 and low CH concentration

Bild 2 zeigt die Absorptionsspektren von drei typischen Erdgasen in hoher Spektralauflösung. Die gezeigten Gase sind Methan (ohne CO_2), H-Gas mit niedrigem CO_2 - und hohem CH-Gehalt, L-Gas mit hoher CO_2 - und niedriger CH-Konzentration. Da Kohlendioxid und Kohlenwasserstoffe in gut getrennten Spektralbereichen absorbieren, kann man sie unabhängig voneinander auswerten. Die Absorption ACO_2 im spektralen Bereich von 4200 nm bis 4400 nm korreliert mit der CO_2 -Konzentration. Die Absorption ACH im Bereich 3100 nm bis 3500 nm zeigt die komplexe Überlagerung der Absorptionsspektren aller auftretenden Kohlenwasserstoffe. Am Ende liefert die Analyse der Absorptionsspektren die Information über die molare Konzentration von Kohlendioxid (x_{CO_2}) und den molaren Brennwert der Kohlenwasserstoffe (HCHm).

Die fehlende Information der Kohlenwasserstoffkonzentration (x_{CH}) bzw. komplementär der Konzentration von Stickstoff kann durch eine Messung der Wärmeleitfähigkeit λ gewonnen werden. Der Auswertalgorithmus basiert auf einer Korrelation $\lambda = F(x_{\text{CH}}, x_{\text{N}_2}, x_{\text{CO}_2}, \text{HCHm})$ zwischen den Molenbrüchen der Kohlenwasserstoffe (x_{CH}), von Stickstoff (x_{N_2}), von Kohlendioxid (x_{CO_2}), dem molaren Brennwert der Kohlenwasserstoffe (HCHm) und der Wärmeleitfähigkeit λ . Mit Hilfe des Auswertalgorithmus, der auf den o. g. Messwerten und der Korrelation für λ basiert, werden schließlich die relevanten Gasparameter bestimmt:

- Brennwert H_{50}
- Normdichte ρ_0

Mit weiteren Berechnungen, die auf grundsätzlichen Gesetzen und komplexer

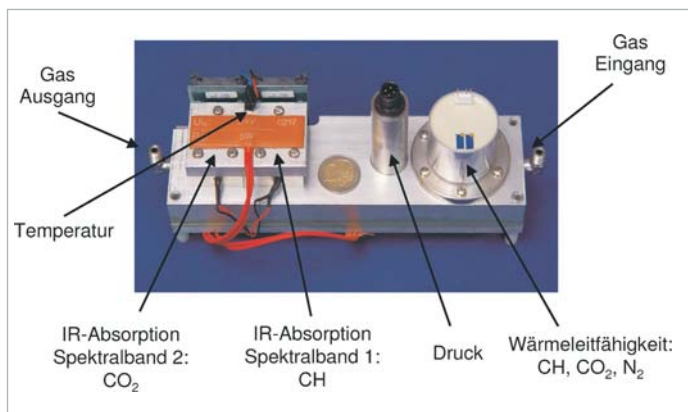


Bild 3: Sensorsystem des gas-lab Q1

Fig. 3: The gas-lab Q1 sensor system

Ergebnisse, die sich über einen weiten Bereich natürlicher Erdgase erstrecken, wurden mit einem einzigen Kalibrierdatensatz erreicht.

Wie schon zuvor geschildert, erfordern industrielle Anwendungen wie Gasmotoren und Gasturbinen oft eine schnelle und genaue Online-Analyse der Gasparameter. Die t_{90} -Zeit beschreibt die Zeit, die ein Messwert benötigt, um 90 % des Sprungsignals zu erreichen. Die t_{90} -Zeit des Kernmessgerätes liegt im Bereich von 20 Sekunden (**Bild 5**). Die totale Antwortzeit des Messsystems enthält aber zusätzlich noch die Transportzeit des Gases von der Probenentnahmesonde bis zum Gerät. Diese Zeit hängt stark von der Länge der Leitung und der Art der Installation ab. Sie kann minimiert werden, indem über einen Bypass mehr Gas transportiert wird als das Messgerät benötigt.

Aufbau des gas-lab Q1

Der gas-lab Q1 besteht aus zwei Komponenten (**Bild 6**): Das Q1 Messwerk ist in einem ex-geschützten Gehäuse (ATEX) eingebaut und umfasst die Messbank, Primärelektronik und einen Double-Block-&-Bleed-Ventilblock. Das Messwerk besitzt Anschlüsse für das Probengas, Methan für die Kalibrierung, ein optionales Prüfgas und für die Entlüftung. Während des Betriebes wird die Einheit automatisch mit Methan kalibriert. Eine Methanflasche mit einem Volumen von 10 l reicht für den Betrieb von mehr als einem Jahr aus. Das Messwerk ist auf einer Montageplatte fixiert, die ebenfalls die Druckregler und die Komponenten zur Flusseinstellung enthält. Des Weiteren sind die Sicherheitseinrichtungen (SAV und Abblaseventil) enthalten.

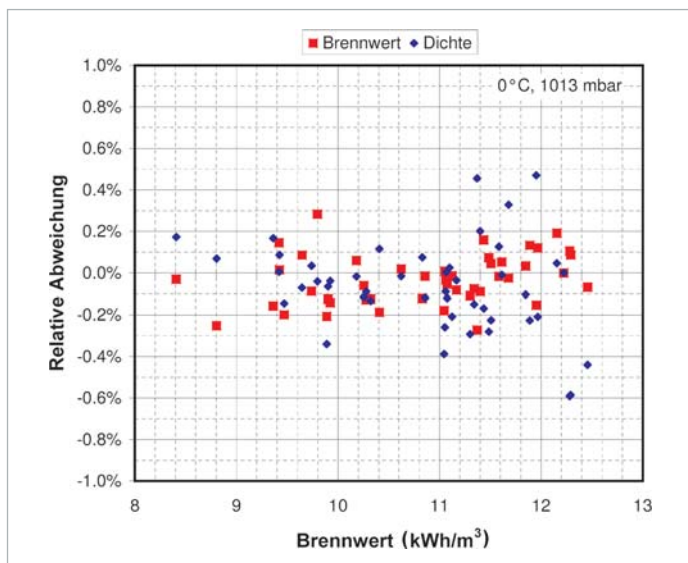


Bild 4: Genauigkeit des Brennwertes und der Dichtemessung über einen großen Bereich von natürlichen Erdgasen. Die Messungen wurden mit einer einzigen Kalibrierung gemacht

Fig. 4: Accuracy of calorific-value and density measurements for a broad range of natural gas types. These measurements were made with only a single calibration

Modellierung von typischen natürlichen Gasen aufgebaut sind, werden die folgenden Werte bestimmt:

- Wobbeindex
- Methanzahl
- Modellanalyse (CH_4 , C_2H_6 , C_3H_8 , nC_4H_{10} , nC_8H_{18} , N_2 , CO_2)
- Heizwert
- spezifische Dichte

den in **Bild 4** gezeigt. Die systematische Messunsicherheit des Brennwertes ist kleiner als $\pm 0,3 \%$, die Unsicherheit der Dichtemessungen war kleiner als $\pm 0,6 \%$ im Vergleich zu der Referenzmethode. Diese

Messung im Labor und im Feld

Die technischen und mathematischen Parameter der Methode wurden in umfangreichen Laboruntersuchungen mit vielen stark variierenden Erdgasen (8,5–12,5 kWh/m³) entwickelt. Die relative Abweichung der Brennwert- und Dichtemessungen des gas-lab Q1 im Vergleich zur Messung mit einem Gaschromatographen wer-

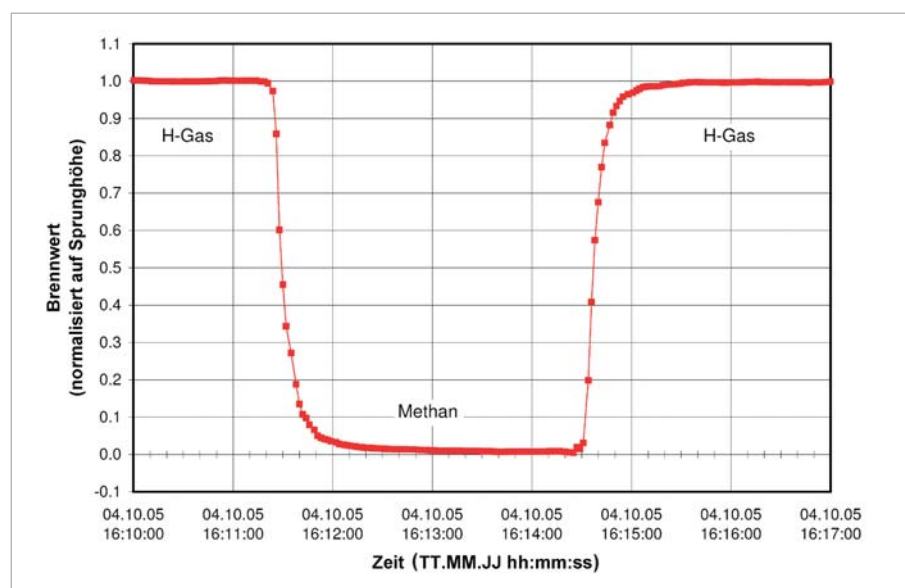


Bild 5: Reaktionszeit des Brennwertsignals bei einem scharfen Wechsel von H-Gas auf Methan und zurück. Der Brennwert wurde auf die Sprunghöhe normiert

Fig. 5: Reaction time for calorific-value signal at an abrupt change from H gas to methane and back. The calorific value has been standardized to step height

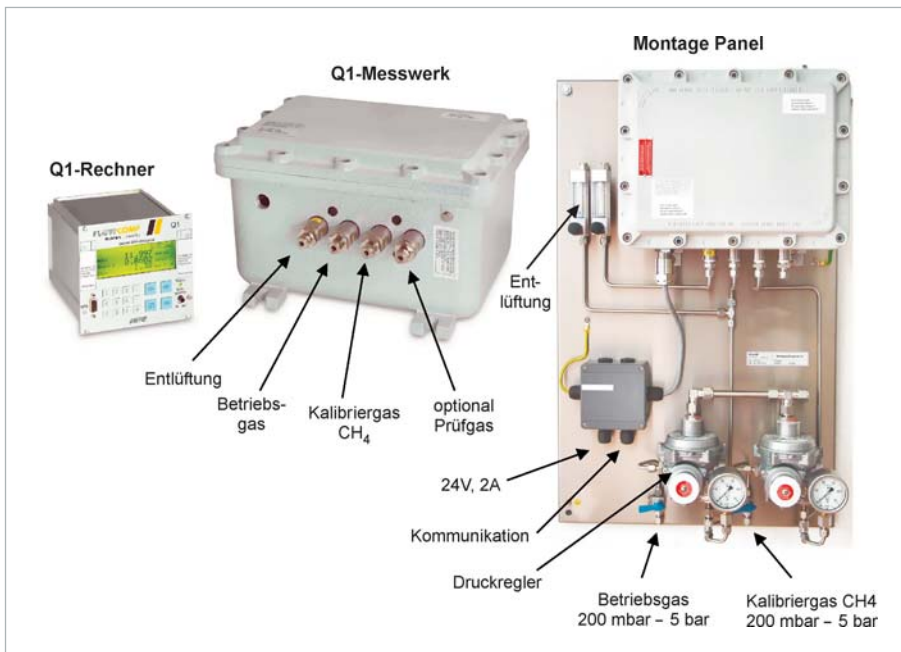


Bild 6: gas-lab Q1-Rechner, Messwerk und die Installation auf der Montageplatte
Fig. 6: The gas-lab Q1 computer, measuring mechanism and installation on the mounting plate

Der Gasanschluss kann mit einem Druck zwischen 200 mbar und 5 bar erfolgen, der Durchfluss liegt bei 30 Normliter/h. Ein Bypass kann benutzt werden, um die Probenentnahme und Probentransport zu beschleunigen und die t_{90} -Zeit des Gerätes auf ungefähr 20 Sekunden zu bringen.

Der Auswerterechner (1/3 Baubreite in 19"-Technologie) kommuniziert mit dem Messwerk über eine serielle Datenleitung und kann in einem Abstand von bis zu 1000 Meter entfernt installiert werden. Die

Installation des Kontrollrechners muss im Nicht-Ex-Bereich erfolgen. Der Rechner enthält das Bedienfeld, auf dem man die Messdaten abrufen kann. Weiterhin werden die Messwerte im Datenspeicher aufgezeichnet. Das Gerät kann modular mit verschiedenen analogen und digitalen Ausgängen und Schnittstellen ausgestattet werden. Das Datenarchiv enthält sowohl die Messwerte als Momentan- und Mittelwerte sowie die internen und externen Stati und Ereignisse des Gerätes in Form eines Logbuches.



Bild 7: 1v2 Gasbeschaffenheitsmessung in Gasmischstation Weine
Fig. 7: One-from-two gas-quality measurement at the Weine gas mixing station

Praktische Anwendungsbeispiele

Gasmischstation Weine

In dieser im Jahr 2003 neu gebauten Gasmischstation der RWE werden zwei verschiedene Gase zu einem Mischgas verschnitten, das in das nachgeschaltete Versorgungsnetz eingespeist wird.

Der Brennwert in der Mischgasschiene wird von zwei gas-lab Q1 (**Bild 7**) und einem Prozessgaschromatographen erfasst. Die Messwerte der beiden Q1 werden gemittelt und der Regelung als Istwert aufgeschaltet. Die eigentliche Mischgasregelung besteht aus zwei Regelventilen, die von einer SPS angesteuert werden. Der Prozessgaschromatograph wird zum Vergleich und für die Abrechnung verwendet.

Gasbeschaffenheitsmessung in der Gasdruckregelanlage Köln-Niehl

In dieser Anlage der Rheinenergie sind 3 gas-lab Q1 als eichamtlich betriebene Gasbeschaffenheitsmessungen eingebaut. Die Anlage dient als Vorschalt- und Regelanlage für das Heizkraftwerk Köln-Niehl II und wird von 2 Gaseinspeisungen unterschiedlicher Beschaffenheit versorgt. Die Geräte messen die beiden Eingangsgase sowie das Gas, mit dem die Gasturbine versorgt wird. Die gemessenen Gasparameter werden u. a. auch dazu verwendet, die K-Zahlen für eichamtliche Umwertung der Gasvolumina online zu bestimmen.

Literatur

- [1] DVGW Arbeitsblatt 486: „Realgasfaktoren und Kompressibilitätszahlen von Erdgasen“, Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V., August 1992
- [2] American Gas Association: „Compressibility Factors of Natural Gas and other related Hydrocarbon Gases“, Transmission and Measurement Committee Report No. 8, American Gas Association, Catalog No. XQ9212, 2. Ausgabe November 1992, 2. Druck Juli 1994
- [3] Kastner, J.; Schley, P.: „Novel Optical Techniques for Process Analysis of Natural Gas Quality“, VDI-Tagung „Anwendungen und Trends in der Optischen Analysenmesstechnik“, Frankfurt, 26. – 27. Februar 2002, Verein Deutscher Ingenieure: Kompetenzfeld Optische Technologien, VDI-Berichte: 1667, VDI-Verlag Düsseldorf, 2002
- [4] Schley, P.: „Microsensors to Determine Superior Calorific Value and Wobbe Number“ Tagung „2001 International Gas Research Conference“, Oktober 2001, Amsterdam, Niederlande, Gas Technology Institute, Des Plaines, Illinois, USA, 2001