

Speicherung und Verteilung verschiedener Wasserstoffqualitäten

Anforderungen und Möglichkeiten der Wasserstoffanalytik aus Sicht eines akkreditierten Prüflabors

Udo Lubenau und Daniela Baumann

Wasserstoff, Gasqualität, Reinheitsanforderung, Prüflabor

Wasserstoff ist ein Schlüsselement der Energiewende. In ersten Projekten werden die Erzeugung, Verteilung sowie die Anwendung des Wasserstoffs geplant. Diese Projekte setzen häufig auf die Einbindung der vorhandenen Erdgasinfrastruktur. Hier zeigt sich, was in verschiedenen Untersuchungen belegt wurde [1] – Kunden mit sehr hohen H₂-Qualitätsanforderungen werden mit grünem Wasserstoff versorgt.

Der H₂-Kunde erwartet vom H₂-Lieferanten den Nachweis der gewünschten Gasqualität. Hohe Reinheitsanforderungen stellen z. B. die chemische Industrie für katalytische Prozesse, Brennstoffzellen und H₂-Tankstellen. Für diese kann eine zusätzliche Reinigungsstufe vor Übergabe des Wasserstoffs notwendig werden [2]. Zu analysierende Komponenten sowie Grenzwerte und mögliche Analyseverfahren sind in den ISO 14687, 17124 und 21087 definiert.

Im Vergleich zur Analyse von Erdgas sind die zu analysierenden Komponenten zwar wenig verändert, aber die geforderten Nachweisgrenzen dieser Komponenten verschieben sich zum Teil erheblich. Analysegeräte und Sensorik sind dieser Situation anzupassen, um Prüfgase mit veränderter Zusammensetzung im Spurenbereich zu validieren. Es sind erste Ergebnisse dieses „Umstellungsprozesses“ erkennbar wie die Erweiterung der Akkreditierung von Prüflaboratorien auf für H₂ relevante Komponenten.

1. Anforderungen

Im Regelwerk des DVGW sind die Anforderungen an die Beschaffenheit von Brenngasen der öffentlichen Gasversorgung definiert. Diese Anforderungen werden zum Teil mehrfach an Übernahme- bzw. Übergabepunkten im Transport- und Verteilnetz kontrolliert. Definiert sind Grenzen bzw. Bereiche für brenntechnische Kenndaten, Gasbestandteile und Gasbegleitstoffe.

Prozess-Gaschromatographen ermitteln die Zusammensetzung von Erdgas, um dessen Brennwert und weitere brenntechnische Parameter zu ermitteln. Standard sind außerdem die on-line-Messung des Sauerstoffgehaltes sowie des Wassergehaltes im Erdgas bzw. Biogas. Auch die kontinuierliche Messung von Schwefelverbindungen ist möglich. Im Verteilnetz erfolgt gelegentlich die automatische Überwachung der Odoriermittelkonzentration. Zusätzlich erfolgt insbesondere an Grenzübernahmepunkten und UGS die Messung des Kohlenwasserstoff-Kondensationspunktes.

Diese kontinuierlichen Messungen werden durch Stichproben ergänzt. Im Labor werden einzelne Bestandteile wie

Glykole, Methanol, Quecksilber oder auch die Palette der Schwefelverbindungen analysiert. An Biogas-Einspeiseanlagen kommen die Messung von Ammoniak und Siliziumverbindungen dazu. Die Probenahme und Analytik sind normiert und validiert. In diesem Bereich tätige Laboratorien weisen ihre Fachkompetenz durch eine Laborakkreditierung nach.

Mit der Aufgabe für die Laboratorien, die Qualität des Wasserstoffs zu kontrollieren, sind andere Messgeräte notwendig, neue Verfahren zu entwickeln und die Probenahme hinsichtlich der Materialien und Drücke anzupassen. Es lassen sich bezüglich der Anforderungen mehrere Qualitätsbereiche für den benötigten Wasserstoff in Anlehnung an ISO 14687: 2018 [2] bzw. das DVGW Arbeitsblatt G260 [3] definieren. Diese sind

- der energetische Qualitätsbereich, vergleichbar mit der H₂-Qualität der Gruppe A des DVGW-Arbeitsblattes G 260 (Industrie- und Haushaltsbrenner),
- der katalytische Qualitätsbereich, der Anforderungsbereich für Brennstoffzellen und H₂-Tankstellen (Qualität der Gruppe D der DVGW G 260).

Während die Analyse der Wasserstoffqualität Gruppe A (98 mol-% H₂) für Laboratorien gelöst und die Kompetenz im Rahmen bestehender Akkreditierungen nachgewiesen ist, fehlen eichamtlich zugelassene Prozess-Gaschromatographen für diesen hohen Wasserstoffgehalt. Die Grenze solcher PGC liegt zur Zeit bei 20 mol-% H₂ in Erdgas. Es zeichnen sich allerdings Prozess-Gaschromatographen ab, die diese 98 mol-% H₂ messen können und vor einer eichamtlichen Zulassung stehen.

Bei Einspeisung geringer Anteile von Wasserstoff in ein Erdgas ohne kontinuierliche H₂-Qualitätsmessung gibt die PTB eine Mindestreinheit von 99,9 mol-% vor (4). Die Analyse eines solchen Wasserstoffs (Reinheit 3.0) gehört für entsprechend akkreditierte Labore im Gasfach wie das DBI inzwischen zur Routine.

Die Herausforderung stellen ganz klar sowohl für die Online-Messtechnik, aber auch die Laboranalytik, die höheren Qualitätsstufen dar. In **Tabelle 1** sind die Komponenten sowie

die notwendigen Messgrenzen für diese zusammengestellt. Grün markiert sind Komponenten, deren Messung nötig ist.

Tabelle 1 lässt auf den ersten Blick gar nicht alle analytischen Probleme erkennen. Diese verstecken sich auch in den Fußnoten des Normenwerks. Weitere relevante Bedingungen sind z. B.

- Die Summe an CO, Ameisensäure und Formaldehyd darf ebenfalls 0,2 ppm nicht übersteigen.
- Die Halogenverbindungen sind umfangreich definiert, HCl und Halogenide (R-X) sind zu messen.
- Die Berechnung der Kohlenwasserstoffe auf C-Basis heißt, dass mit steigender Kettenlänge die zulässige Konzentration fällt und damit deutlich unter 2 ppm liegt.

Erfahrungen aus den Gesprächen mit Endabnehmern des grünen Wasserstoffs zeigen, dass z. B. die Chemieindustrie eine Einhaltung dieser Werte fordert, um Schäden an technischen Anlagen auszuschließen. Dies ist technisch nachvoll-

Tabelle 1: Qualitätsanforderungen für Erdgas und Wasserstoff sowie deren Gemisch (1 µmol/mol = 1 ppm) (Zusammenstellung aus Forschungsprojekt MefHySto[5])

Komponente / Substanzgruppen	Grenzwerte			
	Erdgas	Mischung	Wasserstoff	
			≥98 Mol.-%	≥99,97 Mol.-%
O ₂	10 ppm	10 ppm	10 ppm	5 ppm
H ₂	0 - 20 Mol.-%	1 - 98 Mol.-%	98-100 Mol.-%	Rest
H ₂ O	50 mg/m ³	50 mg/m ³	50 mg/m ³	5 ppm
S gesamt	6 mg/m ³	6 mg/m ³	6 mg/m ³	4 ppb
H ₂ S + COS	5 mg/m ³	5 mg/m ³	5 mg/m ³	4 ppb
Merkaptane	6 mg/m ³	6 mg/m ³	6 mg/m ³	4 ppb
KW- Kondensationspunkt	< -2°C (0 - 70 bara)	< -2°C (0 - 70 bara)		
Kohlenwasserstoffe (inkl Methanol, Verdichteröle, Glykol..)*				2 ppm*
Methan (trace)				100 ppm
CO				0,2 ppm
Formaldehyd				0,2 ppm
Ameisensäure				0,2 ppm
NH ₃ /Amine	< 10 mg/m ³	< 10 mg/m ³	< 10 mg/m ³	0,1 ppm
Halogenverbindungen			0,05 ppm	0,05 ppm
Staub	technisch frei	technisch frei	technisch frei	1 mg/m ³
Silizium	0,3 mg/m ³			x
N ₂	0 - 20 Mol.-%	0 - 20 Mol.-%	0 - 2 Mol.-%	0,03 Mol.-%
CO ₂	2,5 - 4 Mol.-%	2,5 - 4 Mol.-%	?	2 ppm
nicht H ₂ -Gase (He, Ar)				≤ 300 ppm
Gaszusammensetzung				

* Die gesamten Kohlenwasserstoffe müssen auf C-Basis gemessen werden (µmolC/mol)

ziehbar, wie Erfahrungen aus dem Betrieb von Brennstoffzellen zeigen.

2. H₂-Verunreinigungen

Die potenziellen Quellen von Verunreinigungen sind bekannt und z. B. in [1] beschrieben. Dies können

- die Herstellung des Wasserstoffs,
- der Transport des Wasserstoffs und /oder
- die Speicherung des Wasserstoffs in UGS sein.

Art und Größe der Verunreinigungen werden variieren. In einigen Fällen wird es zu gar keiner Verunreinigung kommen, in anderen Fällen wird diese im Laufe der Zeit abnehmen. Außerdem spielen neben der reinen Thermodynamik, d. h. der Löslichkeit einer Komponente im Gas in Abhängigkeit von Druck und Temperatur, kinetische Effekte eine Rolle. In Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit des Wasserstoffs kann die Gleichgewichtseinstellung und damit der Übergang einer Komponente in die H₂-Gasphase verzögert werden.

Die praktischen Erfahrungen insbesondere zu Verunreinigungen über den Pipelinetransport sind in der Gasindustrie eher gering und damit die Ergebnisse der ersten Feldversuche besonders interessant. Diese Feldversuche sind analytisch insbesondere hinsichtlich der Schwefelverbindungen und der Kohlenwasserstoffe zu begleiten.

3. Möglichkeiten der Wasserstoffanalytik

Die Anforderungen der gängigen Normen für Wasserstoff der Gruppe D stellen für die Analytik eine Herausforderung dar. Die große Anzahl der zu bestimmenden Parameter mit teil-

weise äußerst niedrigen Grenzwerten bedürfen einer Auswahl verschiedenster Analysemethoden.

Zu nennen sind hier beispielsweise die Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe (NMKW), welche auch oxidierte Spezies wie Alkohole, Aldehyde, Carbonsäuren etc. einschließen, oder die Gesamt-Halogenverbindungen, welche neben Wasserstoffchlorid (HCl) auch das breite Spektrum der organischen Halogenverbindungen enthalten. Die Eigenschaften der zu bestimmenden Parameter reichen von leichtflüchtig zu hochsiedend, von polar zu unpolar und erfordern unterschiedliche Herangehensweisen an Probenahme und Analytik. Verschiedene in Frage kommende Analysemethoden werden in **Tabelle 2** kurz aufgeführt (ISO 21087; [7]).

Die Analyse der Gaszusammensetzung, d. h. die Kontrolle der 99,97 mol-% H₂ sowie der Gase Stickstoff, Helium, Argon und Methan in der Größenordnung von 100 bis 300 ppm, ist mit der aktuell etablierten Messtechnik lösbar. Dies betrifft nicht nur die Analytik im Labor, sondern auch eine mögliche Kontrolle mit PGC. Eine eichamtliche Zulassung eines GC scheint nur eine Frage der Zeit zu sein. Herausforderung sind die validierte Messung sehr kleiner Konzentrationen von N₂, CH₄, Ar und He idealerweise mit Standard-Detektoren (FID, TCD). Die Bestimmung der Permanentgase kann ganz ähnlich zur Erdgasanalytik an einer Molsiebsäule erfolgen.

Durch Verwendung eines empfindlicheren Detektors können die in der ISO/DIS 14687:2018 geforderten Grenzwerte erreicht werden. Hier bietet sich z. B. der Barrier Discharge Ionization Detector (BID) von Shimadzu an. Durch Einsatz einer Ofenkühlung wird die Trennung von Argon und Sauerstoff erreicht. Die Nachweisgrenzen der Methode liegen für Argon, Sauerstoff und Stickstoff bei < 2 ppm, für Wasserstoff, Methan und Kohlenmonoxid bei ≤0,1 ppm und erreichen die

Tabelle 2: Mögliche Analysemethoden für die zu messenden Parameter

Analyt	Grenzwert (µmol/mol)	mgf. Methoden
Wasser	5	Cavity Ring Down Spectroscopy (CRDS); Spiegelmessung; FTIR; OFCEAS; GC/MS
Nichtmethankohlenwasserstoffe (NMKW)	2	GC/FID; GC/MS (Anreicherung); GC-Plasmadetektion; FTIR, CRDS
Sauerstoff	5	GC-Plasmadetektion; GC-MS (jet-pulse-inj.); CRDS, elektrochem. Sensor; GC/TCD
Helium	300	GC/TCD; EI-MS
Argon, Stickstoff	300	GC-Plasmadetektion, GC/TCD; GC-MS (jet-pulse-inj.)
Kohlendioxid	2	GC-Plasmadetektion; GC/FID (Methanizer); GC/MS (jet-pulse-inj.); CRDS; FTIR; OFCEAS
Kohlenmonoxid	0,2	GC-Plasmadetektion; GC/FID (Methanizer); CRDS; FTIR; OFCEAS; GC/TCD
Schwefel ges.	0.004	tlw. mit Anreicherung; GC/SCD; GC/PFPD; GC/MS; GC/AED; GC/ECD
Formaldehyd	0,2	GC/MS (Anreicherung); CRDS, OFCEAS; HPLC (als DNPH-Derivat); FTIR; GC-Plasmadetektion
Ameisensäure	0,2	FTIR, OFCEAS; IC; GC/MS; GC-Plasmadetektion
Ammoniak	0,1	GC/MS; FTIR; CRDS; OFCEAS; GC-Plasmadetektion
Halogenierte Verbindungen	0,05	GC/MS (Anreicherung); GC/ECD (nur org. Verb.); OFCEAS (nur HCl); IC (nach Wickbold-Verbrennung)

geforderten Grenzen damit sicher. Das DBI hat für verschiedene Verbindungen die Validierung der Messung abgeschlossen; damit erfolgt erstmals in Deutschland die Einbindung dieser Kombination GC/BID in eine Laborakkreditierung.

Es ist zu erwarten, dass die Bestimmung des Kohlendioxids und der NMKW mit der GC/BID-Methode ebenfalls gelingen werden, wobei die NMKW nach Anreicherung auch mittels GC/FID quantifiziert werden können.

Die kritischen Komponenten Ammoniak, Ameisensäure und Formaldehyd können mit der OFCEAS (Optical Feedback Cavity Enhanced Absorption Spectroscopy) bestimmt werden (Bild 1).

Diese Technik beruht auf einer Sensitivitätssteigerung durch optische Verlängerung des Lichtweges auf bis zu 20 km. Dadurch kann die Signalintensität um ein 1000faches verbessert werden. Das im DBI verwendete Messgerät analysiert zusätzlich zu den oben genannten Komponenten auch Schwefelwasserstoff, Carbonylsulfid, Kohlenmonoxid, Kohlendioxid und Methan. Durch die Überschneidung einiger Komponenten sind Vergleichsmessungen innerhalb des Labors möglich, wodurch eine regelmäßige Qualitätskontrolle gewährleistet werden kann. Dieses Gerät etabliert sich gerade in verschiedenen Laboren und Forschungseinrichtungen, allerdings handelt es sich hinsichtlich Erschütterungen um ein empfindliches Gerät, so dass es sich nicht für den mobilen Einsatz eignet und die Proben z. B. von H₂-Tankstellen in das Labor zur Analyse transportiert werden müssen.

Neben Schwefelwasserstoff und Carbonylsulfid existieren noch viele andere Schwefelverbindungen (Bild 2), deren Detektion in Wasserstoffproben ebenso unerlässlich ist.



Bild 1: ProCeaS®-Analyser der Firma ap2e

Diese werden vom oben beschriebenen OFCEAS-Verfahren nicht erfasst, sind aber starke Katalysatorgifte. Deshalb wird für deren Kontrolle am DBI ein GC/SCD mit einer Kühlfalle verwendet. Hier sind sowohl die Bestimmung der einzelnen Schwefelverbindungen als auch eine Gesamtschwefel-Bestimmung (ohne gaschromatographische Trennung) durchführbar.

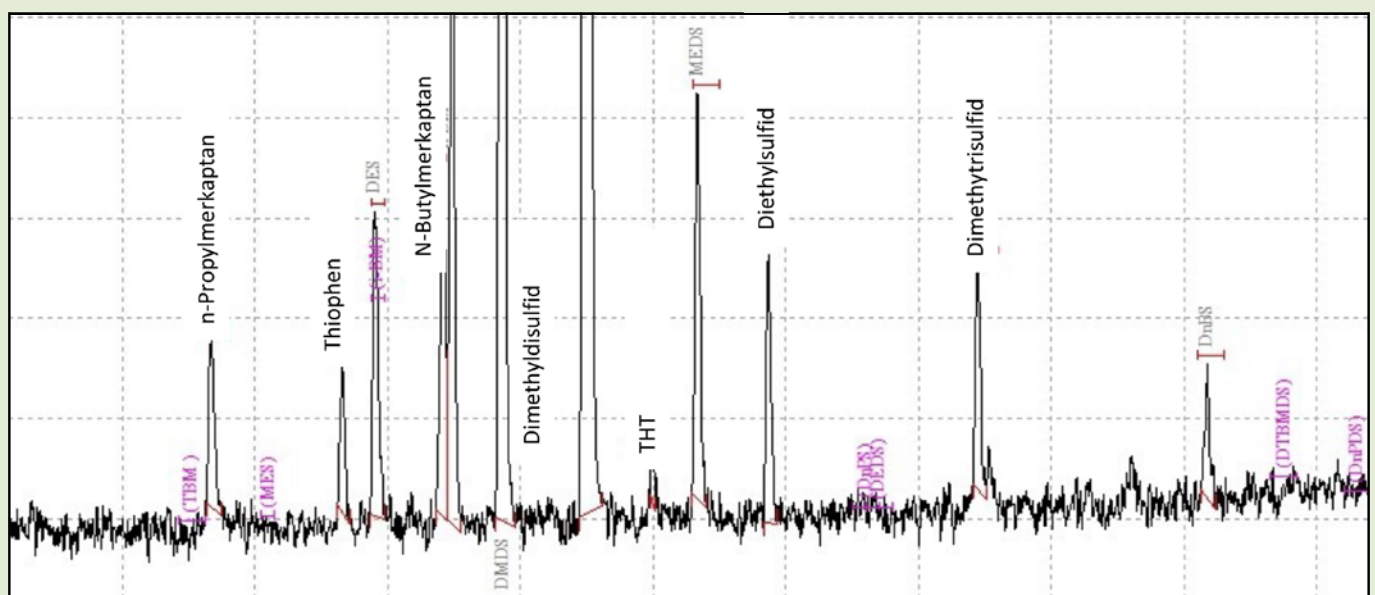


Bild 2: GC/FPD-Chromatogramm von Schwefelverbindungen einer Leitungsablagung

Die Bestimmung des Wassergehaltes in Wasserstoffproben erfolgt sensorisch, mit Taupunktspiegeln oder mittels Cavity-Ring-Down-Spectroscopy (CRDS). Diese letztgenannte Methode erfasst den Wassergehalt direkt in ppm (bzw. mg/m^3) und wird gerade genutzt, um die Umrechnung von Wassergehalt in Taupunkt (Messgröße der Taupunktspiegel) auf thermodynamisch sichere Füße zu stellen. Dieses optische Messgerät nutzt ebenso wie die OFCEAS optische Resonatoren, um den Lichtweg zu verlängern und Messwerte bis zu 0,05 ppm zu erfassen.

Die verbleibenden Halogenverbindungen stellen eine sehr vielseitige Stoffgruppe dar. Neben den anorganischen Spezies (HCl , HBr , Cl_2) existiert eine Vielzahl an organischen Halogenverbindungen mit unterschiedlicher Kettenlänge und Flüchtigkeit. Um sowohl die sehr leichtflüchtigen Halogenide als auch die schwererflüchtigen trappen zu können, ist eine Kombination aus verschiedenen Adsorbentien notwendig.

Die Messung des Sauerstoffgehaltes zwischen 1 und 10 ppm kann weiterhin mit den etablierten Systemen (z. B. oxy. IQ) erfolgen, alternativ mittels Gaschromatograph. Die Messung des Staubgehaltes im Wasserstoff ist aktuell wenig in Diskussion. Die übliche Vorgehensweise – Nutzung eines Filters und Rückwägung – ist möglich, sollte aber auf Grund des extrem geringen Grenzwertes mindestens überprüft werden.

4. Probenahme

Die Notwendigkeit, verschiedene Analysemethoden anzuwenden, um alle Parameter in den gewünschten Grenzen analysieren zu können, erfordert eine entsprechend große Probenmenge. Es ist davon auszugehen, dass 2-3 Probenahmegefäße (z. B. Edelstahlzylinder) benötigt werden.

Die Reaktivität einiger der Parameter (z. B. Schwefelverbindungen, Ammoniak, Ameisensäure, Formaldehyd) erfordern besondere Maßnahmen bei Probenahme, -transport und -lagerung. Vom Probenahmestutzen über Druckminderer und Ventile bis zum Probenbehälter muss jede mit der Probe in Kontakt kommende Oberfläche passiviert sein. Es existieren einige Studien zur Stabilität reaktiver Verbindungen im äußersten Spurenbereich. So wurden verschiedene Aluminium- und Edelstahlbehälter (passiviert und nicht passiviert) untersucht. Eine Zusammenfassung solcher Studien kann in [6] nachgelesen werden. Demzufolge zeigte sich im Rahmen des EU-Projektes MetroHyVe, dass Edelstahlzylinder mit einer Sulfinert®-Beschichtung eine vergleichsweise gute Probenstabilität gewährleisten. Eine möglichst kurze Zeitspanne zwischen Probenahme und Analyse ist jedoch trotz allem von Vorteil.

Die Probenahme kann parallel zur Betankung eines Kraftfahrzeuges oder auch direkt ohne Kfz durchgeführt werden. Mit der ISO 19880-1 (Anhang K) und der ASTM D7606-17 stehen Normen für die Probenahme von Wasserstoff unter Hochdruck zur Verfügung.

Im Rahmen des Projektes RingWaBe sollen unter anderem auch verschiedene Probenahmetechniken miteinander verglichen und validiert werden.

5. Forschungs- und Entwicklungsbedarf, analytische und normative Grenzen

Die Analyse der oben genannten Verbindungen ist zwar weitgehend, aber längst nicht komplett gelöst. Für Analysen im Labor werden Verfahren gerade getestet und anschließend validiert. Die Verfahren sind viel aufwändiger im Vergleich zur Erdgasanalytik. Formale Unsicherheiten werden gesehen bei:

- den Nichtmethankohlenwasserstoffen: Die Kombination aus verschiedenen Grenzen für verschiedene Komponenten in Abhängigkeit von der C-Zahl (Kettenlänge) macht eine Kalibrierung z. B. auf einen Summenparameter fast unmöglich. Die Messung der Einzelkomponenten fordert aber eine Grenze.
- Definition der halogenierten Verbindungen: Wie kann man die Erfassung aller halogenierten Verbindungen beim gewählten Analyseverfahren garantieren?

Die Normgebung weist Lücken bezüglich der oben genannten Analyseverfahren auf. Gelegentlich können ASTM-Verfahren für die Validierung und Akkreditierung von Analyseverfahren herangezogen werden (Beispiel Wassergehaltsmessung mittels CRDS).

Prüfgase sind nur eingeschränkt bzw. in höheren Konzentrationen verfügbar. Nicht in jedem Fall müssen die Prüfgase in der Matrix Wasserstoff hergestellt werden, aber geringe Konzentrationen z. B. von Gasen im unteren ppm-Bereich sind notwendig. Untersuchungen zur Stabilität solcher Gase laufen und zeigen zum Teil ungünstige Ergebnisse. Im Projekt MefHySto [5] wird beispielsweise aktuell die Stabilität eines O_2 -Prüfgases mit 5 ppm O_2 untersucht.

Es fehlen Datensätze für thermodynamische Zusammenhänge. Dies betrifft beispielsweise die Löslichkeit von Wasser und Kohlenwasserstoffen in Wasserstoff und Wasserstoff-Erdgas-Gemischen. Diese Zusammenhänge sind nicht nur für die Analytik interessant, sondern z. B. auch für Ad- und Desorptionsprozesse in Pipelines.

Möglichkeiten von On-Line-Messungen über die Analyse des Wasserstoffgehaltes und der Permanentgase hinaus werden aktuell nicht gesehen. Ausgenommen ist die Bestimmung des Sauerstoff- und Wassergehaltes mittels Sensorik. Labor-GC können im Leitungsnetz oder an Speichern Aufgaben bei der Schwefel- und Kohlenwasserstoffkontrolle übernehmen, erfordern aber andere Sicherheitsmaßnahmen als z. B. PGC.

Die Probenahme von Reingasen insbesondere bei hohen Drücken ist aufwändig und erfordert weitere Untersuchungen. Ziel ist eine Validierung der verschiedenen möglichen Probenahmeprozedere.

In diesem Zusammenhang sollte nicht unerwähnt bleiben, dass die aktuell definierten Grenzwerte für hochreinen Wasserstoff einer weiteren Diskussion unterliegen und durchaus noch verschoben werden könnten und/oder weitere Komponenten relevant werden.

6. Schlussfolgerungen und Zusammenfassung

Die Analyse von Wasserstoff der Qualität 98 mol-% (Gruppe A) ist Routine und analytisch weitgehend gelöst. Die Analyse einer sehr hohen Qualität von Wasserstoff, konkret der Qualität der Gruppe D mit 99,97 mol-% Wasserstoff, ist analytisch aufwändig und noch mit verschiedenen offenen Fragen versehen. Diese offenen Fragen betreffen

- die Validierung von Probenahmeverfahren,
- die Verfügbarkeit von Prüfgasen mit auf Spurenanalytik angepasster Zusammensetzung,
- die Verfügbarkeit von Normen für die jetzt notwendige Spurenanalytik und
- die Validierung der teilweise sehr speziellen Analyseverfahren.

Die Analyse von Proben hochreinen Wasserstoffs in Laboren wird zunehmend Stand der Technik. Neue Analyseverfahren oder Detektoren wurden akkreditiert, so dass den Kunden solche Analysen angeboten werden können. Allerdings ist die Eignung von Probenahmeverfahren weiter Untersuchungsgegenstand.

Die Entwicklung von PGC mit eichamtlicher Zulassung für die Kontrolle des Wasserstoffgehaltes und der Permanentgase ist auf gutem Wege. Problematisch bezüglich einer on-line-Messung bleiben Komponentengruppen (NMHC, Schwefelverbindungen) sowie Einzelkomponenten wie Ammoniak oder CO.

Unkritisch ist die Messung des Wasser- und Sauerstoffgehaltes in Wasserstoff einzustufen, da prinzipiell geeignete Sensoren für die kontinuierliche Überwachung existieren.

Literatur

- [1] DVGW-Bericht G 202141: H₂-Kurzstudie: Wasserstoffqualität in einem gesamtdeutschen Wasserstoffnetz; DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH (2022) ISO 14687:2019 Hydrogen fuel quality - Product specification

- [2] Lubenau, U.; Baumann, D.; Obenaus, K. und Decker, C.: Umstellung von Erdgasleitungen auf Wasserstoff - Auswirkungen von Ablagerungen und Kondensaten auf die Wasserstoffqualität, in gwf Gas + Energie, 2-3; S-47-51; 2023
- [3] Technische Regel – Arbeitsblatt DVGW G 260 (A): Gasbeschaffenheit; 11/2021
- [4] PTB: Technische Richtlinien. Messgeräte für Gas. G 19 „Wasserstoff im Gasnetz“ 02/2023
- [5] Projekt MefHySto – „Metrology for Hydrogen Storage“ in : <https://mefhysto.eu/> [aufgerufen am 14.07.2023]
- [6] Arrhenius, K. et al.: International Journal of Hydrogen Energy 46, 34839-34853, 2021
- [7] Brown, A.S. et al.: NPL Report AS 64 "Methods for the analysis of trace-level impurities in hydrogen for fuel cell applications, 2011

Autor:innen



Udo Lubenau

DBI - Gastechnologisches Institut gGmbH |
Freiberg |
Tel: +49 341 2457-113 |
Udo.Lubenau@dbi-gruppe.de



Dr. Daniela Baumann

DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH |
Leipzig |
Tel: +49 341 2457-113 |
daniela.baumann@dbi-gruppe.de