



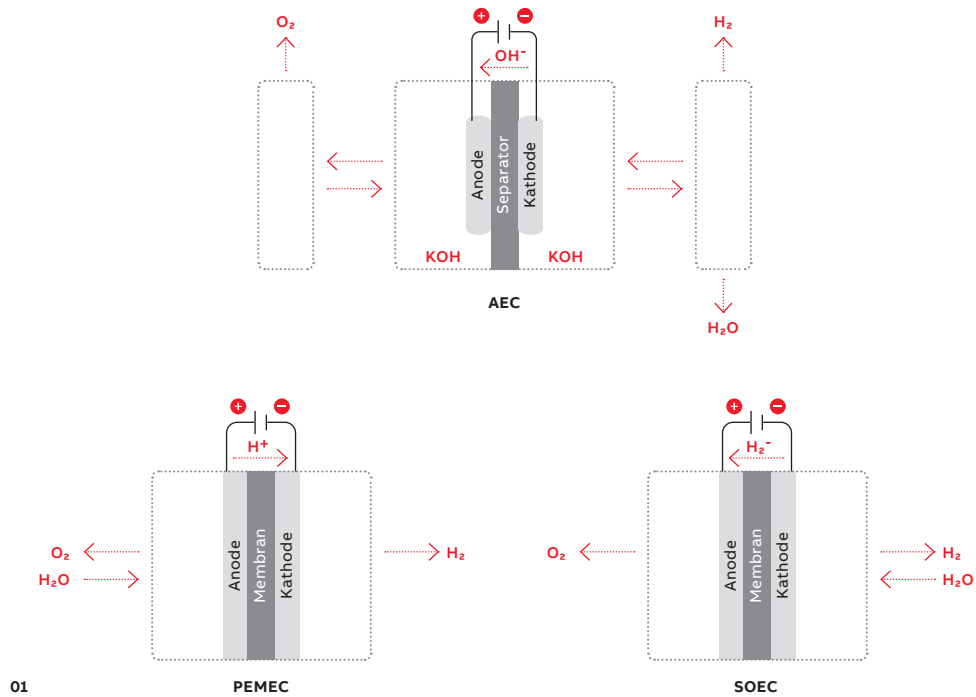
—
SENSORTECHNOLOGIEN FÜR DIE
H₂-WERTSCHÖPFUNGSKETTE

Ein besonderes Molekül

Die Herstellung von Wasserstoff mit grünem Strom hat das Potenzial, den Transportsektor und die Märkte für Strom, Gas, Chemikalien und Kraftstoffe grundlegend zu verändern. Doch das kleinste und flüchtigste Element im Periodensystem ist mit einer Reihe von Herausforderungen bei der Produktion, dem Transport, der Lagerung und der Nutzung verbunden. ABB bietet verschiedene Instrumentierungs- und Analysatorlösungen, die bei der Bewältigung dieser Herausforderungen helfen.

Wasserstoff ist im Begriff, eine zentrale Rolle bei der Realisierung eines kohlenstofffreien Energiesystems zu spielen. Er ist flexibel, kann Energie speichern und erlaubt den Transport großer Energiemengen per Pipeline und Schiff über große Entfernungen, was wiederum die Nutzung erneuerbarer Energiequellen an entlegenen Standorten ermöglicht.

Doch der Beitrag von Wasserstoff geht weit über die Energiespeicherung hinaus, denn er kann in Brennstoffe und Chemikalien umgewandelt werden. Zudem wird die Herstellung von Wasserstoff mit grünem Strom die aktuellen Strom-, Gas-, Chemikalien- und Kraftstoffmärkte grundlegend verändern [1]. Kurz gesagt, Wasserstoff ist der beste Kandidat für ein „sauberes Molekül“, das in der Lage ist, die „sauberen Elektronen“ des grünen Stroms zu ergänzen.



01

PEMEC

SOEC

—
01 Wasser- und Gasflüsse in den wichtigsten kommerziellen Elektrolyseurtypen.

Obwohl Wasserstoff im Wesentlichen CO_2 -frei ist, werden zu seiner Herstellung verschiedene Energiequellen und Technologien mit unterschiedlichen Auswirkungen auf den Treibhausgasausstoß verwendet.

Eine zentrale Rolle spielt hierbei die Elektrolyse, ein elektrochemisches Verfahren, das Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff aufspaltet, ohne dabei CO_2 freizusetzen. Stammt der dazu notwendige Strom nachweislich ausschließlich aus erneuerbaren Quellen, spricht man von grünem Wasserstoff. Dieser gilt als der „Heilige Gral“ der Dekarbonisierungsbemühungen.

Obwohl weniger als 0,1 % des weltweit produzierten Wasserstoffs durch Elektrolyse gewonnen und größtenteils in Anwendungen mit besonderen Anforderungen an die Reinheit (z. B. für Elektronik und Polysilizium) verwendet wird [2], stößt grüner Wasserstoff auf ein breites Interesse und lockt zunehmend Investitionen an. So plant die Europäische Kommission die Bereitstellung von Ressourcen in nie dagewesener Höhe für die Entwicklung einer Wasserstoffstrategie mit dem Ziel, den Wert des europäischen Wasserstoffsektors von derzeit zwei Milliarden Euro bis zum Jahr 2030 auf 140 Milliarden Euro zu erhöhen, wobei über 140.000 Arbeitsplätze entstehen sollen [3].

Aus technischer Sicht stehen derzeit drei Technologien zur Produktion von H_2 zur Verfügung:

- alkalische Elektrolysezellen (AEC)
- Polymer-Elektrolyt-Membran-Elektrolysezellen (PEM oder PEMEC), auch Protonen-Austausch-Membran-Elektrolyseure genannt
- Festoxid-Elektrolysezellen (SOE oder SOEC) → 01

AEC-Elektrolyseure zeichnen sich im Vergleich zu den beiden anderen Technologien durch niedrigere Investitionskosten aus. Darüber hinaus sind sie die

—
Das Ziel ist es, den Wert des europäischen Wasserstoffsektors bis zum Jahr 2030 auf 140 Milliarden Euro zu erhöhen.

Technologie mit der größten Reife, d. h. AEC-Elektrolyseure haben ihre Zuverlässigkeit bereits im großen Maßstab bewiesen, wozu die PEM- und SOE-Prozesse bislang noch keine Zeit hatten.

PEM-Systeme hingegen zeichnen sich durch kurze Anfahrzeiten aus. Bei einem Betriebsdruck von bis zu 30 bar, den einige andere Elektrolyseurtechnologien ebenfalls erreichen können, benötigen sie weniger Platz als Elektrolyseurtechnologien, die bei Atmosphärendruck arbeiten. Dies minimiert die Kosten für die anschließende Verdichtung, wenn der Sauerstoff zur Einspeisung in ein Gasnetz oder für die Hochdruck-Speicherung vorgesehen ist.

Festoxid-Elektrolysezellen (SOE) sind im Grunde genommen umgekehrt arbeitende Festoxid-Brennstoffzellen. Die meisten SOE-Anlagen arbeiten bei Temperaturen zwischen 650 und 850 °C und nutzen Wasser in Form von Dampf, wobei



Nunzio Bonavita
ABB Process Automation
Measurement and
Analytics
Genoa, Italien

nunzio.bonavita@
it.abb.com

sie einen erheblichen Prozentsatz ihrer Energie aus der Wärme des Dampfes beziehen. Die Hochtemperatur-Elektrolyse bietet bedeutende Vorteile gegenüber Niedertemperatur-Technologien wie etwa einen hohen Wirkungsgrad und die Tatsache, dass keine teuren Edelmetall-Elektrokatalysatoren

Grüner Wasserstoff spielt eine bedeutende Rolle in Industrien mit schwer vermeidbaren CO₂-Emissionen.

erforderlich sind. Das bedeutet, dass zur Herstellung der gleichen Menge Wasserstoff im Vergleich zu einem PEM- oder AEC-Elektrolyseur etwa ein Drittel weniger an elektrischer Leistung benötigt wird [4]. Allerdings liegt die SOE-Technologie in der industriellen Entwicklung noch immer zurück.

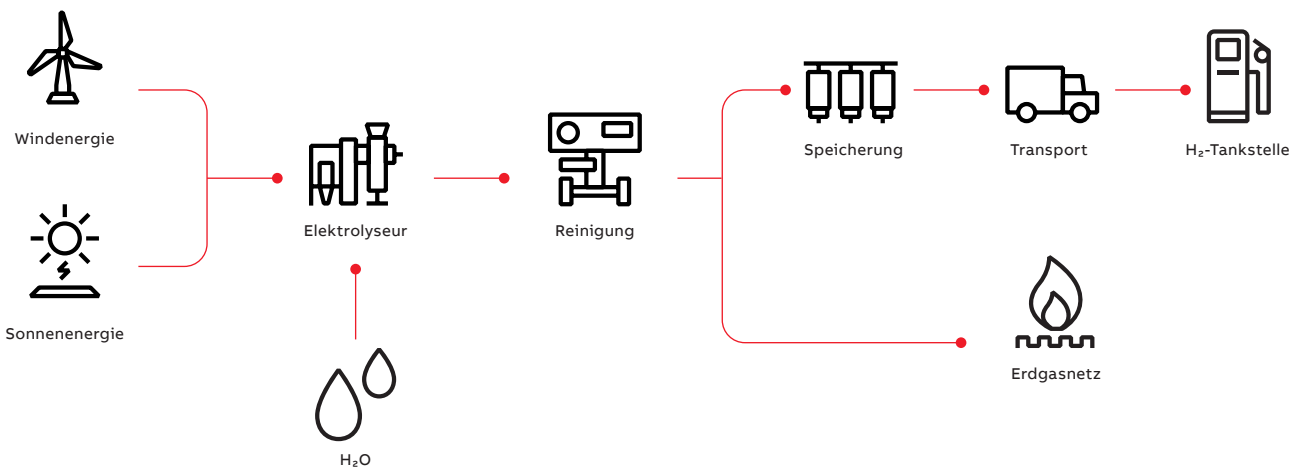
Die grüne Wasserstoff-Wertschöpfungskette

Die Produktion ist nur der Anfang der Wasserstoff-Wertschöpfungskette, die auch den Transport, die Speicherung und die Endnutzung umfasst → 02. Die meisten betriebswirtschaftlichen und technischen Herausforderungen im Zusammenhang mit H₂ sind auf die chemischen und physikalischen Eigenschaften des Moleküls zurückzuführen. Da es das kleinste und leichteste in der Natur vorkommende Molekül ist, weist Wasserstoff einen sehr niedrigen Siedepunkt und – unter normalen Bedingungen – eine sehr geringe Dichte auf. Um ihn in einen bedeutenden Energieträger zu verwandeln, muss er unter Druck komprimiert und entweder verflüssigt oder in einen anderen chemischen Träger umgewandelt werden.

Üblicherweise gelangt H₂ von seiner Produktionsstätte per Pipeline, per Lkw in Tankwagen für kryogene Flüssigkeiten oder in speziellen Anhängern mit Druckbehältern (sogenannte Tube-Trailer), per Eisenbahn oder per Schiff zu seinem Bestimmungsort. Pipelines sind die wirtschaftlichste Lösung für den Transport großer Mengen innerhalb eines Landes, doch für einen ökonomischen Transport über größere Entfernungen muss das H₂ entweder verflüssigt oder in ein anderes Trägermedium wie Ammoniak oder Benzyltoluol umgewandelt werden.

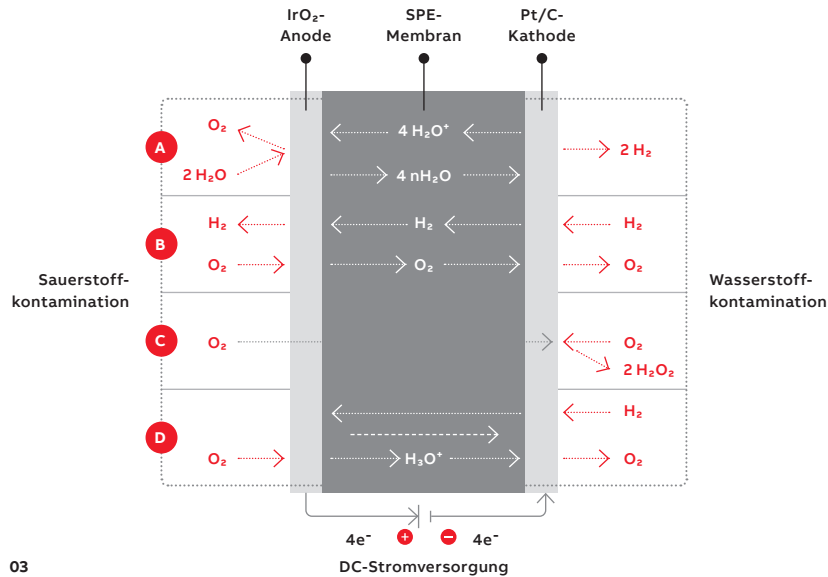
Je nach erforderlicher Speicherdauer kann Wasserstoff in folgenden Formen gespeichert werden:

- In Gasform: Dies ist die kostengünstigste Möglichkeit. In dieser Form kann der Wasserstoff unterirdisch in Salzkavernen oder erschöpften Gasfeldern oder – wie bei Brennstoffzellen-Fahrzeugen – in Drucktanks gespeichert werden.
- In flüssiger Form: Hierbei wird gasförmiger Wasserstoff in reiner Form verflüssigt, um die Energiedichte zu erhöhen. Diese Speichermöglichkeit ist effizienter als die gasförmige Speicherung, aber auch teurer, da hierfür drei Schritte notwendig sind: die Verflüssigung, bei der der gasförmige Wasserstoff auf unter -253 °C abgekühlt wird, die Speicherung in flüssiger Form und die Rückvergasung (Regasifizierung).
- In chemischer Form: In diesem Fall wird das H₂ an ein anderes Atom oder Molekül gebunden. Ammoniak und sogenannte flüssige organische Wasserstoffträger (Liquid Organic Hydrogen Carriers, LOHC) gehören zu den vielversprechendsten Molekülen, die eine Speicherung in flüssiger Form erlauben.



—
02 Produktion und Nutzung von Wasserstoff.

—
03 Wasserstoffreaktionen und Stoffaustauschmechanismen. SPE: Solid Polymer Electrolyte (polymerer Festelektrolyt); Pt/C: Platin auf Kohlenstoff (Platin auf Kohlenstoff).



03

Der letzte Schritt in der grünen Wasserstoff-Wertschöpfungskette ist die Endnutzung. Ohne zu sehr ins Detail zu gehen, lassen sich drei Hauptanwendungsbereiche unterscheiden:

- **Mobilität:** Grüner Wasserstoff wird im Verkehrswesen in Verbindung mit Brennstoffzellen genutzt. Mit Brennstoffzellen betriebene Elektrofahrzeuge haben einen Wasserstofftank, aus dem eine Brennstoffzelle gespeist wird, die den Strom für den Elektromotor erzeugt. Der Schwerpunkt in diesem Bereich liegt gegenwärtig auf dem öffentlichen Personenverkehr und Sonderfahrzeugen für Flughäfen, Einkaufszentren usw.
- **Industrie:** Grüner Wasserstoff kann nicht nur sogenannten „grauen“ Wasserstoff (der durch Dampfreformierung fossiler Brennstoffe gewonnen wird) in traditionellen Sektoren wie der Raffination und der Düngemittelherstellung ersetzen. Er spielt auch eine bedeutende Rolle bei der Reduktion der CO₂-Emissionen in Industrien, in denen Emissionen schwer vermeidbar sind (engl. „hard-to-abate“), weil die Verwendung von Strom nicht möglich oder nicht praktikabel ist, wie etwa bei der Herstellung von Stahl, Glas und Keramik.
- **Haushalt:** Durch die Beimischung von Wasserstoff zu Erdgas und die anschließende Verwendung als Haushaltsgas lassen sich Wärme und Strom mit geringeren Emissionen erzeugen als mit Erdgas allein. Dies ist ein Bereich, in den bereits viele Gasversorger investieren. Die Beimischung von Wasserstoff zu vorhandenen Erdgasnetzen ist technisch möglich und in begrenzten Anteilen in vielen Ländern erlaubt. Zurzeit gilt in mehreren Ländern für vorhandene Leitungsnetze eine Wasserstoff-Obergrenze von 2 %.

Messherausforderungen

Als kleinstes und flüchtigstes Element im Periodensystem besitzt Wasserstoff einige besondere physikalisch-chemische Eigenschaften, die eine Reihe von Messproblemen nach sich ziehen. Zur Realisierung einer echten Wasserstoffwirtschaft müssen verschiedene sensorische Herausforderungen bewältigt werden, die im Folgenden kurz umrissen werden sollen.

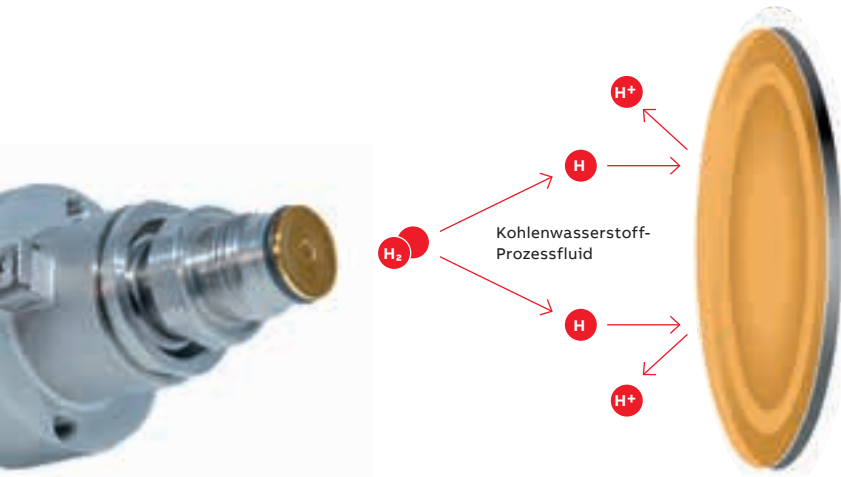
Elektrolyseure benötigen empfindliche Gasanalysatoren, um einen sicheren Betrieb zu gewährleisten. Einfach gesagt, entsteht in einem Elektrolyseur an der Anode Sauerstoff und an der Kathode Wasserstoff. Dies ist jedoch eine starke Vereinfachung eines äußerst komplexen elektrochemischen Vorgangs. Viele der Reaktionen, die in einem Elektrolyseur stattfinden, können zur

—
Elektrolyseure benötigen Gasanalysatoren, um einen sicheren Betrieb zu gewährleisten.

Bildung kleiner Sauerstoffkonzentrationen im Wasserstoffstrom und umgekehrt führen. Außerdem kann es innerhalb des Zellenstapels (Stack) eines Elektrolyseurs zu Gasleckagen von einer Zellen- zur anderen kommen, was erhebliche Sicherheitsrisiken mit sich bringt →03.

Produktion

Die Prozesssteuerung eines Wasserstoff-Elektrolyseurs muss verschiedene Aufgaben erfüllen: einen sicheren Betrieb gewährleisten, für eine effiziente Umwandlung von Strom in Wasserstoff sorgen und die Reinheit des Wasserstoffs



04

und Sauerstoffs sicherstellen. Die Norm ISO 22734:2019 definiert eine Vielzahl von Parametern, die gemessen werden müssen, um einen sicheren und zuverlässigen Betrieb von Wasserstoff-Elektrolyseuren zu gewährleisten [5].

Während viele der zu messenden Parameter (z. B. die Temperatur im Stack zur Verhinderung einer Überhitzung, Gasverunreinigungen usw.) für alle Elektrolyseure gleich sind, gelten andere speziell für die im ersten Abschnitt dieses Artikels beschriebenen Elektrolyseurtechnologien. So ist die Erkennung von gefährlichen Flüssigkeitsleckagen beim Umgang mit hochkonzentrierten Kaliumhydroxidlösungen in einem AEC-Elektrolyseur relevanter als bei der Verwendung von reinem Wasser in einem PEM-System, bei dem es eher auf die Reinheit des Wassers ankommt. Die SOE-Technologie stellt wiederum besondere Messanforderungen im Hinblick auf die Dampfversorgung und die damit verbundenen hohen Temperaturen.

Speicherung und Transport

Die Speicherung und Handhabung von Wasserstoff ist mit bestimmten Sicherheitsanforderungen verbunden, die verstanden und beherrscht werden müssen, um sichere Betriebsabläufe zu gewährleisten. Wasserstoff birgt einige potenzielle Gefahren, weil:

- zu seiner Zündung eine sehr geringe Zündenergie erforderlich ist (0,017 mJ gegenüber 0,25 mJ für Kohlenwasserstoffe). Leckagen aus Rohrleitungsflanschen sind besonders gefährlich, da die durch die Leckage selbst erzeugte Reibung schon als Zündquelle dienen kann. Hinzu kommt, dass Wasserstoff im Falle einer Zündung mit einer unsichtbaren Flamme und geringer Wärmeabstrahlung brennen kann, was ein Erkennen der Flamme erschwert.

- H_2 ein sehr kleines Molekül ist, das zu Ionen dissoziiert. Bei hohen Temperaturen kann es diffundieren und Metalle durchdringen, was zur Versprödung von Ausrüstungen und Rohrleitungen führt [6].

Eine genaue und zuverlässige Überwachung der Infrastruktur ist daher unerlässlich. Darüber hinaus gibt es noch viele ungelöste Probleme, z. B. bei der Überwachung langer und/oder unterirdisch verlaufender Pipelines [7]. Vor der Speicherung muss dem Wasserstoffgas in einer sogenannten Vortrocknung Feuchtigkeit entzogen werden, weshalb Speichereinrichtungen neben einer zuverlässigen Leckageerkennung auch Analysatoren zur Feststellung der Reinheit des Wasserstoffs benötigen.

Endnutzung

Unterschiedliche Arten der Endnutzung sind mit unterschiedlichen Problemen verbunden. Im Bereich der Mobilität liegen die Hauptherausforderungen in der präzisen Durchflussmessung und in

— Die „H-Shield“-Option bietet ein hohes Maß an Schutz gegen das Eindringen von Wasserstoff.

der Messung sehr geringer Verunreinigungen (z. B. ein Gesamtschwefelgehalt in der Größenordnung von 4 nmol/mol) an jeder Tankstelle zum Schutz der Brennstoffzellen [8]. Am tiefsten hängen die Früchte wohl bei der Zumischung von Wasserstoff zu Erdgas-Verteilnetzen. Hier liegen die größten Messherausforderungen in folgenden Bereichen:

- Sicherstellung eines genauen und wirksamen Mischungsverhältnisses und Messung der H_2 -Qualität
- Erweiterung und Anpassung von Verfahren für den eichpflichtigen Verkehr. Dies ist wichtig, weil der Heizwert pro Volumeneinheit von Wasserstoff geringer ist als der von Erdgas.
- Verhindern von wasserstoffinduzierter Rissbildung. Bei einigen Stahlsorten kann ein zu hoher Wasserstoffanteil insbesondere bei höheren Temperaturen zur Versprödung und zum Bruch führen.

ABB-Lösungen und Erfolgsgeschichten

ABB hat eine Reihe von Instrumentierungs- und Analysatorlösungen für Wasserstoffanwendungen entwickelt. Zu den Produkten, die speziell auf die Herausforderungen im Zusammenhang mit grünem Wasserstoff ausgelegt sind, gehört die sogenannte „H-Shield“-Option für Druck-, Füllstand- und Durchflussmessprodukte, die ein hohes Maß an Schutz gegen das Eindringen von Wasserstoff bietet →04. Der H-Shield wird durch Aufdampfen

—
04 Trennmembran mit ABB H-Shield-Beschichtung.

—
05 ABB-Gaschromatograph mit Wärmeleitfähigkeitsdetektor.



05

aufgetragen und bildet eine Schutzschicht gleichmäßiger Dicke auf der Membranoberfläche. Dabei bleibt die Membran flexibel genug, um auf sich verändernde Druckverhältnisse zu reagieren [9].

Im Hinblick auf die Entwicklung von Fahrzeugen mit Brennstoffzellenantrieb bietet ABB mit dem Sensyflow FMT700-P einen kompakten thermischen Masse-Durchflussmesser, der die Palette der bewährten Produkte zur Messung der Motoransaugluft auf Prüfständen ergänzt. Das Gerät eignet sich ideal für die Feinabstimmung der Effizienz von Brennstoffzellen. Dank seiner konkurrenzlosen Ansprechzeit (25 ms) wird er von führenden Automobilherstellern auf der ganzen Welt zur Ansaugluftmessung in der Qualitätssicherung, in Prüfstandanwendungen und in der Forschung und Entwicklung eingesetzt [10].

Darüber hinaus trägt ABB mit ihren Analysegeräten zum sicheren Betrieb von Elektrolyseuren bei. Die Analysatoren ermöglichen die genaue Messung von Verunreinigungen in den O₂- und H₂-Flüssen in explosionsgefährdeten Bereichen. Ist eine semikontinuierliche Messung ausrei-

chend, können diese Messungen in einem Gerät kombiniert werden [11].

Wie schon erwähnt, stellt die Beimischung von Wasserstoff zum Erdgasnetz eine ausgereifte Möglichkeit zur Reduzierung der CO₂-Belastung dar. Hier eignet sich der PGC1000 von ABB ideal zur Überwachung der Zusammensetzung von Gasgemischen in Transport- und Verteilnetzen. Der PGC1000 ist ein schneller Prozessgas-Chromatograph mit einem Wärmeleitfähigkeitsdetektor. Zu den bewährten Anwendungen von Gasanalysatoren dieser Art gehören die Überwachung des Heizwerts von Erdgas in Brennersteuerungssystemen und die Sicherung der richtigen Verbrennungsstöchiometrie →05.

Die Erfahrungen, die ABB mit diesen Gasanalysatoren gemacht hat, lassen sich auf die Überwachung von Erdgasleitungen mit beigemischtetem Wasserstoff übertragen. Die Marktakzeptanz ist äußerst vielversprechend: Allein in Italien, wo Betreiber von Gastransport- und -verteilnetzen in ehrgeizige Programme zur H₂-Beimischung investieren, wurden in den vergangenen Monaten mehr als 35 Analysatoren bereitgestellt. •

Literaturhinweise

[1] Hydrogen Council, McKinsey & Company: „Hydrogen for Net-Zero“. November 2021. Verfügbar unter: <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2021/11/Hydrogen-for-Net-Zero.pdf> (abgerufen am 11.08.2022).

[2] McKinsey & Company: „The net-zero transition: what it would cost, what it would bring“. Januar 2022. Verfügbar unter: <https://www.mckinsey.com/business-functions/sustainability/our-insights/the-net-zero-transition-what-it-would-cost-what-it-could-bring> (abgerufen am 11.08.2022).

[3] L. Collins: „EU aims to make green hydrogen cost-competitive within two years: leaked strategy document“. Recharge 19/6/2020. Verfügbar unter: <https://www.recharge-news.com/transition/eu-aims-to-make-green-hydrogen-cost-competitive-within-two-years-leaked-strategy-document/2-1-829768> (abgerufen am 11.08.2022).

[4] ABB: „Green Hydrogen, Instrumentation and analyzer solutions for a sustainable future“. ABB White Paper, 2021. Verfügbar unter: <https://campaign.abb.com/l/501021/2021-09-28/v9lq6p> (abgerufen am 11.08.2022).

[5] ISO 22734:2019: „Hydrogen generators using water electrolysis – Industrial, commercial, and residential applications“. September 2019. Verfügbar unter: <https://www.iso.org/standard/69212.html> (angerufen am 11.08.2022).

[6] ABB: „Hydrogen safety – Hydrogen handling and key process safety steps“. ABB White Paper, 2022. Verfügbar unter: <https://new.abb.com/process-automation/energy-industries/hydrogen/white-paper-process-safety-and-hydrogen> (abgerufen am 11.08.2022).

[7] S. Elaoud, E. Hadj-Taïeb: „Leak detection of hydrogen-natural gas

mixtures in pipes using the characteristics method of specified time intervals“. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, September 2010, S. 637–645.

[8] National Physical Laboratory: „Energy transition: Measurement needs within the hydrogen industry“. NPL Report, Dezember 2017. Verfügbar unter: <https://www.npl.co.uk/getattachment/bebd3592-e413-43e7-9556-e4dc2c0533d7/energy-transition-measurement-needs.pdf?lang=en-GB&ext=.pdf> (abgerufen am 11.08.2022).

[9] ABB: „Tackling the issue of hydrogen

permeation in pressure transmitters“. ABB White Paper, 2021. Verfügbar unter: <https://campaign.abb.com/l/501021/2021-11-05/vpy3nk> (abgerufen am 11.08.2022).

[10] G. Weppner: „Finetuning für die Brennstoffzellenforschung“. *ABB Review* 04/2021, S. 48–49.

[11] S. Gibbons: „Gas analysis in the circular economy“. *Gasworld*, Juni 2021. Verfügbar unter: <https://www.gasworld.com/gas-analysis-in-the-circular-economy/2021176.article> (abgerufen am 11.08.2022).