



**Bild 1:** Blick auf das klimaneutrale Viertel „Neue Weststadt“ in Esslingen am Neckar  
© Maximilian Kamps, Stuttgart und Agentur Blumberg GmbH

## Pilotprojekt Esslinger Stadtquartier

Der Wasserstoff aus dem die Speicherträume sind

Der Einsatz von Wasserstoff als Energiespeicher ist bisher meist auf industrielle Anwendungen beschränkt. Dass eine 1 MW<sub>el</sub>-Hochleistungsanlage auch im öffentlichen Raum möglich ist, zeigt ein Pilotprojekt nahe Stuttgart. Entwickelt hat das zukunfts-fähige Energiekonzept das Steinbeis-Innovationszentrum Energie-, Gebäude- und Solartechnik Stuttgart. TÜV SÜD hat es sicherheitstechnisch begleitet und informiert Energie- und Wasserversorger darüber.

Wenn das energie- und klimapolitische Ziel der Bundesregierung Wirklichkeit werden soll, bis 2050 zu einem nahezu klimaneutralen Gebäudebestand zu kommen, sind noch Anstrengungen nötig. Die Immobilienbranche ist für fast 40 % aller CO<sub>2</sub>-Emissionen verantwortlich. Mehr als zwei Drittel davon entfallen auf den Gebäudebetrieb. Eine besonders sinnvolle Lösung ist, Energie aus erneuerbaren Quellen vor Ort zu gewinnen und zu speichern – und dabei Strom, Wärme, Kälte und Mobilität zu kombinieren.

### Energie vor Ort: Weite Transportwege entfallen

Unter dem Namen „Neue Weststadt“ wird derzeit in Esslingen am Neckar ein klimaneutrales Viertel gebaut, dem all dies gelingen dürfte (**Bild 1**). Angestrebt wird ein jährlicher CO<sub>2</sub>-Ausstoß von unter einer Tonne pro Bewohner für Wohnen

und Mobilität. Auf 100.000 m<sup>2</sup> entstehen dafür über 450 Wohnungen, Büro- und Gewerbeflächen sowie ein Neubau der Hochschule Esslingen. Technisches Herzstück ist eine unterirdische Energiezentrale. Überschüssiger Solarstrom von den Dächern (**Bild 2**) hilft dort, grünen Wasserstoff zu produzieren. Der wird künftig vor Ort in einem Blockheizkraftwerk rückverstromt, zur saisonalen Langzeitspeicherung ins Gasnetz eingespeist und darüber hinaus bedarfsgerecht an Industrie- und Mobilitätsunternehmen in regionalem Verbund geliefert. Noch dieses Jahr installieren die Ingenieure den Elektrolyseur. Er ist mit anderen Versorgungssystemen über ein „Smart Grid“ vernetzt, das den Versorgern überdies eine flexible Vermarktung der Energie erleichtert.

Durch die zentrale Lage im Stadtviertel entfallen weite Transportwege für den Wasserstoff. Zudem lässt sich die Abwärme aus der Elektrolyse nutzen, um die

benachbarten Gebäude zu heizen. Der Nutzungsgrad dürfte sich so von den üblichen 60 auf bis zu 85 % steigern lassen. Die Voraussetzungen dafür schafften eine optimierte Wärmedämmung sowie eine Gebäudetechnik auf Niedertemperaturbasis mit großflächigen Fußbodenheizungen und Frischwasserstationen. Eine Adsorptionskälteanlage soll Kälteenergie zur Klimatisierung der Arbeitsbereiche liefern.

Durch eine gemeinsame Förderung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) und des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) stehen für eine erfolgreiche Umsetzung und Begleitung des Vorhabens von rund 13 Mio. € zur Verfügung. Der Startschuss für das Projekt fiel im November 2017 – das interdisziplinäre Projektteam erarbeitet nun fünf Jahre lang vor Ort die Grundlagen für eine zukunfts-fähige Energieversorgung des klimaneutralen Stadtquartiers (**Bild 3**).

### Sicherheitstechnik und Genehmigungsrecht

Das sicherheitstechnische Know-how kommt von TÜV SÜD Industrie Service aus Filderstadt – und damit fast aus der Nachbarschaft. Bisher gibt es zwar vergleichbare Ein-Megawatt-Anlagen. Doch stehen diese vornehmlich in Erzeugernähe und nicht dort, wo die Energie gebraucht wird. Dabei stellt Wasserstoff im öffentlichen Raum an das Genehmigungsrecht und die Risikobeurteilung noch umfassendere Anforderungen als auf der grünen Wiese oder in zugangsbeschränkten Industriearealen.

Konkret umfasst die erforderliche Systemarchitektur nicht nur die städtebaulich integrierten Elektrolysestacks samt Nebenaggregaten zur Wasserstoffherstellung. Sicherheitstechnisch evaluiert werden mussten auch die Komponenten zur Wärmeerzeugung, wie Wasserstoff-Blockheizkraftwerk, Wärmepumpe, Gas-Spitzenlastkessel und Wärmespeicher. Über die Wohn-, Gewerbe- und ein Hochschulgebäude verteilte photovoltaikmodule mit einer Gesamtleistung von 1.500 kW<sub>p</sub> als auch eine im Erdreich verlegte Wasserstoffleitung und eine Wasserstoff-Abfüllanlage sind weitere Bestandteile.

### Produktionsumfang und Sonnenstunden

Die Produktionskapazität des Elektrolyseurs beläuft sich auf knapp eine halbe

Tonne Wasserstoff pro Tag. Das Verteilkonzept ist flexibel gestaltet, sodass der erzeugte Wasserstoff – nach kurzzeitiger Zwischenspeicherung – unmittelbar der jeweiligen Nutzung zugeführt werden kann. Durch die geringen Lagermengen konnte damit die Einordnung in die Störfall-Verordnung – 12. BImSchV vermieden werden. Die Genehmigung für den Betrieb nach Bundesimmissionsschutzgesetz liegt bereits vor.

Die Laufzeit des Elektrolyseurs richtet sich nach der Verfügbarkeit von erneuerbarem Überschussstrom und liegt bei rund 4.500 Stunden der etwa 8.760 Stunden, die ein Jahr umfasst. Mit dem Forschungsprojekt zur Energiewende soll der Umgang mit Überschüssen aus der erneuerbaren Stromerzeugung untersucht und somit ausschließlich „grüner“ Wasserstoff erzeugt werden.

### Technikverbund und Schutzkonzepte

Weil die Energiezentrale ein Verbund aus unterschiedlichen Anlagen darstellt, empfehlen die TÜV-SÜD-Experten ein übergreifendes dreistufiges Sicherheitskonzept des Zentrums für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW). Die erste Stufe umfasst die interne Überwachung der Elektrolyse-Einheiten mit Notabschaltung – auch aller Zündquellen – der Entspannung der Wasserstoff-Behälter und der Inertisierung aller Leitungen sowie

eine aktive Notentlüftung explosionsgefährdeter Zonen.

Stufe zwei betrifft die Überwachung des Aufstellraums. Hier geht es um die Notabschaltung der Elektrolyse-Einheiten und Zündquellen, der Entspannung der Wasserstoff-Behälter, der Inertisierung aller Leitungen, aber abhängig von der Wasserstoff-Konzentration im Raum, sowie um dessen aktive Entlüftung. Die dritte Stufe umfasst die Überwachung der Zuluft und das Auslösen der obigen Maßnahmen und das Abschalten der Gesamtanlage, falls Rauch oder Brände detektiert würden.

Entscheidend war hier die Entlüftung so zu realisieren, dass diese keine Beeinträchtigung im öffentlichen Raum bedingt – wie eine Lärmbelastung oder Risiken für die Anwohner. Dafür haben die TÜV SÜD-Experten Ausbreitungsrechnungen erstellt, welchen Weg etwaig abgelassener Wasserstoff je nach Witterung nehmen könnte. Umgekehrt durften potenzielle Brandgefahren aus dem öffentlichen Raum – beispielsweise durch Feuerwerkskörper oder Zigarettenreste – kein Risiko für die Anlage darstellen.

### Technische Details und Komponenten

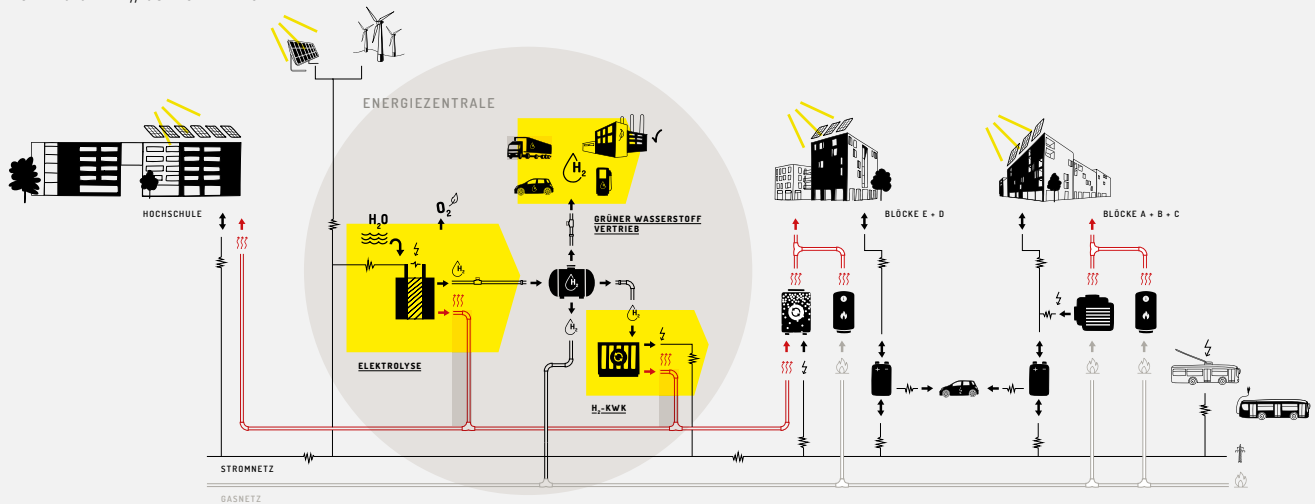
Die Wasserstoff-Produktion kombiniert unterschiedliche verfahrenstechnische Module wie die Wasser-Elektrolyse, Gas-aufbereitung und Leistungselektronik für den Gleichstrom. Der Elektrolyseur wird



**Bild 2:** Maximale Solarisierung des Gebäudekomplexes „Block B“

© Maximilian Kamps, Stuttgart und Agentur Blumberg GmbH

NEUE WESTSTADT // SCHAUBILD P2G2P



**Bild 3:** Energiekonzept des Klimaquartiers

© Agentur Blumberg GmbH

noch im Werk getestet – einschließlich aller Sicherheits- und Funktionskreisläufe – und verfügt über eine CE-Konformitätserklärung.

Nach dem Aufbau im Gebäude nimmt eine zugelassene Überwachungsstelle die Anlagenmodule auf Basis der Betriebssicherheitsverordnung ab. Neben dem Explosionsschutz betrifft das auch die Funktion beispielsweise der Elektroinstallation. Geprüft werden auch alle Verbindungspunkte und ob das geplante Sicherheitskonzept eingehalten wurde.

Im Versuchsbetrieb werden anschließend verschiedene Verschaltungen der Elektrolyse, der Gasbereitstellung und -aufbereitung sowie der Betriebsparameter variiert und aufgezeichnet. Schritt für Schritt lassen sich so Prozesse und Regelstrategien verbessern. Sicherheitstechnische Funktionen kommen nochmals separat auf den Prüfstand. Die vorliegende Anlage ist so ausgelegt, dass sie autonom arbeitet und sich selbst überwacht.

**Eigensichere Komponenten und Notstromaggregat**

Primär kommen bei dem Projekt zertifizierte, eigensichere Geräte und Komponenten zum Einsatz. Alle Sicherheits-

kreisläufe wurden einer Gefährdungsbeurteilung unterzogen. Die funktionale Sicherheit und damit die Ausfallwahrscheinlichkeiten wurden anhand von Safety Integrity Leveln (SIL) klassifiziert. Notausschalter entziehen der Anlage und den Modulen im Bedarfsfall den Strom. Zudem lassen sich diese durch Ventilkombinationen verfahrenstechnisch trennen und druckseitig entspannen. Mit den geprüften Schaltgeräten ist ein sicheres Abfahren jederzeit möglich – selbst bei ungeplanten Anlagenzuständen.

Ein Prozessleitsystem gibt Warnmeldungen aus, falls kritische Werte erreicht werden. So lässt sich im Gefahrenfall jederzeit rechtzeitig gegensteuern. Zudem existiert eine übergeordnete Sicherheitstechnik, die bei einzelnen Alarmen die Elektrolyse abschaltet und beispielsweise die elektrolytische Wasserstoffbereitstellung, die Pumpen, aber auch Begleitheizungen in Standby überführt. Selbst mögliche Stromausfälle bezieht das Sicherheitskonzept ein. Eine unterbrechungsfreie Stromversorgung ist in der Lage, sicherheitsrelevante Systeme mehrere Stunden zu versorgen. Dauert der Ausfall länger, baut die Anlage selbstständig den Betriebsdruck ab und aktiviert einen Wiedereinschaltenschutz, um einem unkontrollierten Anlaufen vorzubeugen.

**Fazit**

Auf Basis des Stands der Technik lassen sich heute bereits sichere und wirtschaftliche technische Lösungen finden, um erneuerbare Energie in Wasserstoff zu speichern – nicht nur in abgeschotteten Industriearealen, sondern auch im öffentlichen Raum. Das Esslinger Pilotprojekt kann damit ein Leuchtturm sein für den klimaneutralen Wohn- und Gewerbebau. Das integrative Gesamtkonzept steigert nicht zuletzt die regionale Wertschöpfung.

**Autoren:**

**Guntram Schnotz**  
 TÜV SÜD Industrie Service GmbH  
 Filderstadt  
 Tel.: +49 711 7005-533  
 guntram.schnotz@tuev-sued.de  
 www.tuvsud.com/de

**Simon Marx**  
 Steinbeis-Innovationszentrum  
 Energie-, Gebäude- und Solartechnik  
 Stuttgart



Das Testgelände im Chemiapark Bitterfeld-Wolfen wird von der Linde AG über eine Rohrbrücke mit Wasserstoff versorgt

## Erste Erkenntnisse zum Wasserstoffprojekt „HYPOS: H2-Netz“ im Chemiapark Bitterfeld-Wolfen

Nach rund einem Jahr Betriebserfahrung im Wasserstoff-Forschungsprojekt „HYPOS:H2-Netz“ legt die Mitteldeutsche Netzgesellschaft Gas mbH (Mitnetz Gas) erste Ergebnisse vor. Der Betrieb der Testinfrastruktur im Chemiapark Bitterfeld-Wolfen läuft dabei bislang planmäßig und liefert wichtige Erkenntnisse bei der Verwendung und Verteilung von Wasserstoff im Netz.

Das „Wasserstoffdorf“ ging am 10. Mai 2019 offiziell in Betrieb. Damit begann die rund zweijährige Forschungsphase des Projektes, die bis Ende 2021 andauern wird. Das Budget beträgt insgesamt rund 3,8 Mio. €. Partner von Mitnetz Gas sind die DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH, die Rehau Unlimited Polymer Solutions AG + Co, die TÜV SÜD Industrie Service GmbH und die Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig.

Das Projekt „HYPOS: H<sub>2</sub>-Netz“ umfasst die Entwicklung des Verteilnetzes, die Errichtung der Anlagen und die Anbindung und Versorgung von Wasserstoffendverbrauchern. Dabei geht es darum, die im Jahr 2018 erbaute Infrastruktur und die folgende Anwendung des Energieträgers Wasserstoff technisch, wirtschaftlich und

ökologisch zu untersuchen. Das Versuchsgelände ist 12.000 m<sup>2</sup> groß und beherbergt unter anderem rund 1.200 m Rohrleitungen, eine Gasdruckregelanlage, verschiedene Mess- und Sicherheitseinrichtungen, ein H<sub>2</sub>-Brennstoffzellen-Blockheizkraftwerk und eine eigens für die Verbrennung von Wasserstoff konzipierte Fackel (**Bild 1**).

### Trendthema Wasserstoff

Obwohl Wasserstoff als Energieträger in jüngster Zeit zum Trendthema wurde und sowohl die Bundesregierung im Juni 2020 als auch die EU-Kommission im Juli 2020 eine Wasserstoffstrategie vorlegten, stecken die Erfahrungswerte bei der Verteilung reinen Wasserstoffs noch in den

Anfängen. Weltweit gibt es bislang nur wenige Rohrsysteme, die dazu ausschließlich auf Stahlwerkstoffen basieren.

Mitnetz Gas als Verteilnetzbetreiber legt gemeinsam mit den Projektpartnern daher im Projekt „HYPOS:H<sub>2</sub>-Netz“ den Fokus auf folgende Schwerpunkte:

- Leitungen: hochdichte Kunststoffrohrleitungen für das Verteilnetz und die Inneninstallation lösen die bisher bekannten Stahlrohrleitungen ab und wurden in der Bauphase mit modernen Verlegeverfahren erprobt
- Sicherheitstechnik: Ein eigens für die Wasserstoffverteilung, den Betrieb und die Instandhaltung entwickeltes System kommt zur Anwendung
- Odorierung: Insgesamt drei verschiedene schwefelfreie bzw. schwefelar-

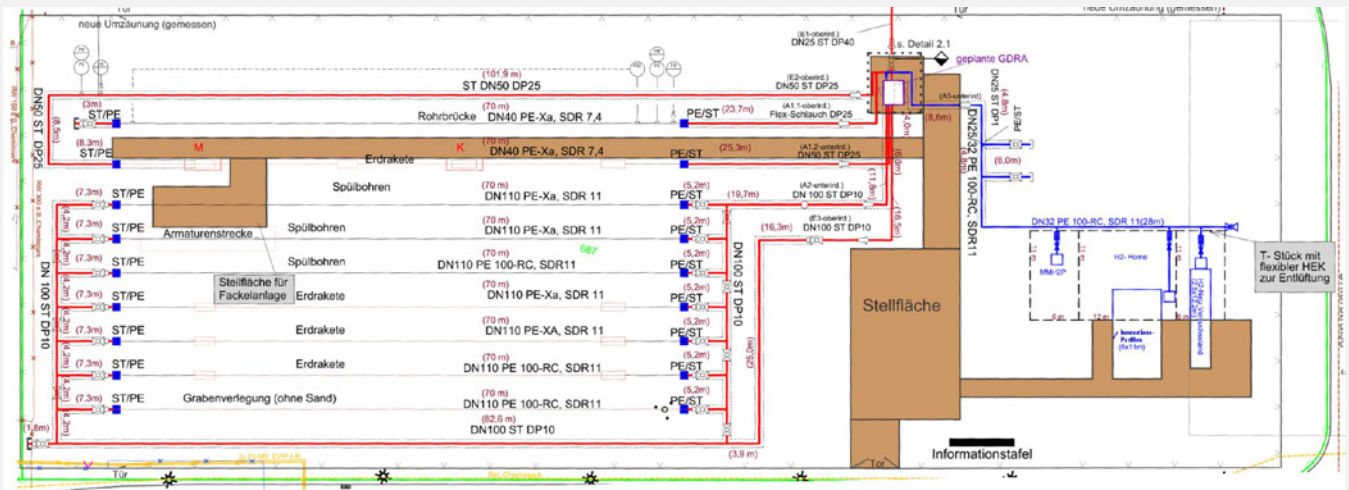


Bild 1: Bauplan

me Odoriermittel und ihre Auswirkungen auf die Technik werden untersucht

- Gesamtsystem: Bewertung und Optimierung hinsichtlich technischer, ökonomischer und ökologischer Parameter
- Lernen: Dokumentation des Wissenszuwachses bei der Wasserstoffverträglichkeit und -funktionalität

**Erste Ergebnisse liegen vor**

Nach rund einem Jahr Betriebserfahrung können bereits etliche Zwischenergebnisse festgehalten werden. In diese fließen sowohl die Erfahrungen aus der Konzeption der Anlage, der Bauphase und des Betriebes ein.

**Konzeptions- und Bauphase**

Die Bau- und Genehmigungsplanung für Wasserstoff-Projekte ist mit herkömmlichen Erdgas-Projekten vergleichbar. Standardisierte Genehmigungsprozesse bewirken keinerlei Mehraufwand. Von großem Vorteil ist, dass in der Erdgaswirtschaft verwendete Standardgeräte und Materialien einschlägiger Hersteller verwendet werden können und damit kostenintensive Sondergeräte obsolet machen. Eine Ausnahme bildet lediglich die eigens für das Projekt konzipierte Mikro-Odorieranlage. Für die Verlegung von Pipelines aus PE-Materialien

anstelle von Stahlrohren ist nach Einschätzung daher eine Kostensenkung von rund 30 % möglich. Mitnetz Gas legte darüber hinaus besonderes Augenmerk auf die Sicherheitstechnik, um den bisher geringen Anwendungserfahrungen mit Wasserstoff Rechnung zu tragen.

Nach Abschluss der Bauphase und nach der offiziellen Inbetriebnahme im Mai 2019 wurden im August 2019 die Endverbraucher im Energiepavillon an das H<sub>2</sub>-Netz angeschlossen und konnten fortan mit Wasserstoff versorgt werden. Unter dem Titel „HYPOS: H<sub>2</sub>-Home“ steht im Rahmen eines weiteren HYPOS-Teil-

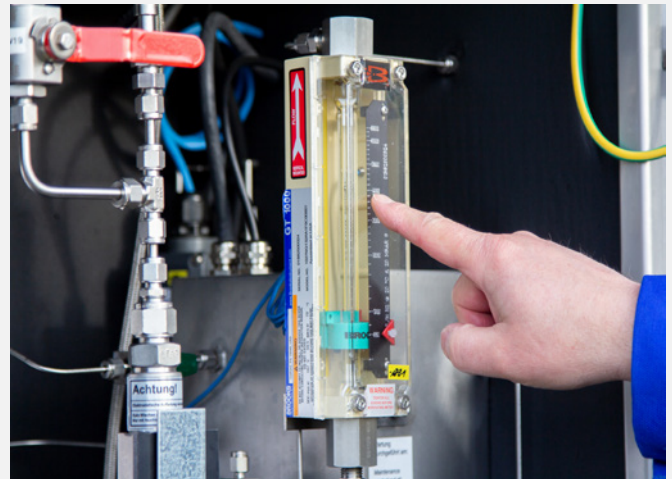
projektes aus dem Forschungsbereich „Verwertung und Vertrieb“ die Entwicklung, Realisierung und Optimierung eines BHKW-Systems zur Objektversorgung unter Einbezug einer H<sub>2</sub>-Brennstoffzelle (5 kW<sub>el</sub>/14 kW<sub>th</sub>) auf PEM-Basis und eines H<sub>2</sub>-Wärmeerzeugers (40 kW<sub>th</sub>) an. Weiterhin installierte das DBI zusammen mit Mitnetz Gas einen Versuchsstand in einem Container. In diesem werden auf einer Versuchsstrecke handelsübliche Erdgas-Komponenten, wie z. B. Gasströmungswächter und Gaszähler, auf ihre Wasserstofffunktionalität und -verträglichkeit untersucht.



Bild 2: Die Monteure schließen die Wasserstoffackel an das Hochdrucknetz an



**Bild 3:** Die Fackel sorgt für eine umweltschonende und sichere Verbrennung des Wasserstoffs



**Bild 4:** Überprüfung des Füllstandes der Odorieranlage durch Monteure der Mitnetz Gas

### Betriebserfahrungen Regel und Messtechnik

Der Betrieb der Gasdruckregel- und Messanlage (GDRMA) inklusive einer Wartung Anfang Mai 2020 zeigt, dass die Anlage den Betriebsanforderungen für Wasserstoff gewachsen ist. Die eingesetzte Regel- und Messtechnik muss den Betrieb mit gereinigten, nicht aggressiven technischen Gasen (Wasserstoff  $\geq 99,96$  Vol.%) gewährleisten. Ein gutes Regelverhalten und hohe Messgenauigkeit für alle Druckstufen entsprechend der sehr geringen Gasmengen ( $< 12 \text{ m}^3/\text{h}$ ) müssen vorhanden sein. Regelgeräte kommen bei „HYPOS: H<sub>2</sub>-Netz“ in den drei Druckstufen DP25, DP10 und DP1 zum Einsatz. Ein Gaszähler im DP1-Bereich wurde verbaut. Mitnetz Gas verwendet bei dem Projekt Standardgeräte einschlägiger Hersteller.

### Inspektion und Instandhaltung

Alle Inspektionen und Instandhaltungsmaßnahmen werden entsprechend dem

DVGW-Regelwerk durchgeführt. Die Anlagen werden jedoch in häufigeren Zyklen als gewöhnlich zum Sammeln von Erfahrungen inspiziert. Im Ergebnis gibt es aktuell keinen erhöhten Aufwand bei Wasserstoffanlagen im Vergleich zu Erdgasinfrastrukturen.

### Sicherheit

Mit einer Schadens- und Störfallsimulation konnte die reibungslose Funktionsweise der Sicherheitseinrichtungen nach einem Jahr Betriebszeitraum nachgewiesen werden. Mitnetz Gas simulierte sowohl an der Rohrbrücke als auch im erdverlegten Netz einen Gasaustritt und überprüfte die Sicherheitseinzelmaßnahmen. Durch den Einsatz der Wasserstofffackel wurde während der Simulation kein Wasserstoff in die Atmosphäre ausgeblasen, sondern mit Hilfe der Verbrennung des Wasserstoffes die Bildung von Explosionszonen in der Atmosphäre verhindert (**Bild 2 und 3**). Indem das Austreten von zündfähigen Gas-Gemi-

schichten in die Atmosphäre vermieden wird, erhöht sich die Sicherheit bei zukünftigen Betriebstätigkeiten an Wasserstoffnetzen.

### Odorierung

Sicherheitsrelevant ist beim Betrieb von Gasanlagen auch die Odorierung. Mitnetz Gas prüft insbesondere mit dem Projektpartner DBI die Möglichkeit einer Hochdruckodorierung und möchte die Wirksamkeit sowohl einer schwefelfreien als auch einer schwefelhaltigen Odorierung testen (**Bild 4**), die auch bei geringsten Gasmengen im Bereich von 3 bis 12  $\text{m}^3/\text{h}$  (z. B. Minimallastfall im Sommer) einsetzbar ist. In der ersten Phase wurde das Odoriermittel „Gasodor® S-Free“ mit hohen Wiederfindungsraten erfolgreich getestet. Aktuell wird das Odoriermittel „Scentinel® E“ auf seine Eignung untersucht. Auch der Einfluss auf die nachgelagerten Gasanwendungstechnologien, das H<sub>2</sub>-Brennstoffzellen-BHKW im Projekt „HYPOS: H<sub>2</sub>-Home“, wird untersucht. Ins-

„HYPOS: H<sub>2</sub>-Netz“ ist ein Teilprojekt von HYPOS (Hydrogen Power Storage & Solutions) East Germany, das seit 2013 den Aufbau einer grünen Wasserstoffwirtschaft in Mittel- und Ostdeutschland anstrebt. Die über 100 Mitglieder des HYPOS e. V. – eines davon ist Mitnetz Gas – bündeln darin ihre Kompetenzen aus Forschung und Praxis im Wasserstoffsektor. Derzeit sind 32 Einzelthemen unter dem Dach des

HYPOS e. V. in Form von Einzelprojekten vereint, die eine vollständige Wertschöpfungskette von der Wasserstoffherzeugung (chemische Umwandlung), über die Verteilung und Speicherung bis zur Verwertung und dem Vertrieb von Wasserstoff abbilden. Das Zwanzig20-Programm des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) unterstützt das Projekt unter dem Förderkennzeichen 03ZZ0708C.



**Bild 5:** In der eigens für das Projekt konzipierten Odoranlage werden verschiedene Geruchsstoffe getestet

gesamt werden im Rahmen des Projektes drei Odoriermittel getestet (**Bild 5**).

### Leitungstechnik

In Bezug auf die Leitungstechnik kommen bei „HYPOS: H<sub>2</sub>-Netz“ insbesondere moderne, hochdichte Metall-Kunststoff-Verbundrohre (MKV, PE-Xa) sowie hochspannungsrisssbeständige PE-Rohre (PE 100-RC) anstelle herkömmlicher Stahlrohrleitungen zum Einsatz. Hauptsächlich erfolgte die Verlegung im Erdreich (offene und geschlossene Bauweise), aber auch oberirdisch auf einer Rohrbrücke, um jegliche mögliche Einsatzfälle einer zukünftigen Anwendung abzubilden. Die Lagerung und Halterung der Rohrleitungen ist dabei von entscheidender sicherheitstechnischer Bedeutung. Mitnetz Gas plant die Überprüfung und den Nachweis der Eignung für verschiedene Umgebungsbedingungen gemeinsam mit den Projektpartnern, insbesondere mit der Rehau Unlimited Polymer Solutions AG + Co. Erforscht wird unter anderem der Einfluss von Temperaturschwankungen und UV-Strahlung auf die Längenausdehnung und Materialbeständigkeit im Wasserstoffkontext. In Bezug auf die



**Bild 6:** Die HYPOS-Projektverantwortlichen Martin Glas (links) und Patrick Becker an der Permeationsmesszelle an der Rohrbrücke

Durchlässigkeit weisen die Rohre auf Grundlage der Messungen des Projektpartners DBI keine sicherheitsrelevanten Verlustmengen in Form von Permeation oder Leckage auf. Der Einfluss der Verlegungsmethode lässt keinen signifikanten Unterschied auf die Permeationsraten erkennen. Lediglich die Auswahl des Materials führt in Abhängigkeit von Druckstufe und Temperaturverhältnissen zu deutlichen Unterschieden bei der Permeation (**Bild 6**).

### Fazit und Ausblick

Die Konzeptions- und Bauphase sowie das erste Forschungsjahr liefen ohne Komplikationen und nach Plan. Ein sicherer Betrieb der H<sub>2</sub>-Infrastruktur ist zu jedem Zeitpunkt möglich.

Nach den bisherigen Erfahrungen gehen die Projektpartner in technischer Hinsicht von einem insgesamt positiven Abschluss des Projektes zum Ende des Jahres 2021 aus. Durch die weltweite Aufmerksamkeit, die der Energieträger Wasserstoff derzeit erfährt, werden Forschungsergebnisse aus den HYPOS-Projekten eine große Nachfrage nicht nur

national, sondern auch international generieren. Im ersten Betriebsjahr besuchten bereits eine große Zahl an Interessenten im Rahmen eines monatlichen Tages der offenen Tür das „Wasserstoffdorf“ in Bitterfeld-Wolfen. Die Öffentlichkeit wird weiterhin regelmäßig auf das Testgelände eingeladen und über die neuen Entwicklungen informiert.

Interessenten können sich unter <https://event.enviam-gruppe.de/hypos-h2-netz> zu einer Besichtigung anmelden.

#### Autoren:

**M. Sc. Patrick Becker**  
Projektkoordinator Hypos Mitnetz Gas  
Tel.: 0341 120 7253  
[patrick.becker@mitnetz.gas.de](mailto:patrick.becker@mitnetz.gas.de)

**M. Eng. Martin Glas**  
Projektkoordinator Anlagenbau Wasserstoff/Biogas Mitnetz Gas  
Tel.: 0341 120 7238  
[martin.glas@mitnetz.gas.de](mailto:martin.glas@mitnetz.gas.de)

## Wasserstoff als Brennstoff für Heizthermen

Wasserstoff könnte als sauberer Energielieferant die Heiztechnikbranche revolutionieren. Erste Experimente laufen bereits und auch ebm-papst bereitet seine Gas-Luft-Verbundsysteme für Gasbrennwertgeräte auf den klimaneutralen Brennstoff vor.

Zu einer Zeit, als Kohle noch der Brennstoff Nummer eins war und die Diskussion um erneuerbare Energien in weiter Ferne lag, prophezeite Jules Vernes in seinem 1874 veröffentlichten Roman „Die geheimnisvolle Insel“: „Das Wasser ist die Kohle der Zukunft. Die Energie von morgen ist Wasser, das durch elektrischen Strom zerlegt worden ist. Die so zerlegten Elemente des Wassers, Wasserstoff und Sauerstoff, werden auf unabsehbare Zeit hinaus die Energieversorgung der Erde sichern.“ Knapp 150 Jahre nachdem der französische Schriftsteller diese Zeilen schrieb, hat sich seine Vision noch lange nicht erfüllt. Doch angesichts der Herausforderungen durch den Klimawandel und der Suche nach neuen Energiequellen erlebt Wasserstoff als Energielieferant in Politik, Wissenschaft und Industrie eine immer größere Aufmerksamkeit. Der Vorteil liegt schließlich auf der Hand: Bei der Ver-

brennung entsteht kein klimaschädliches Kohlenstoffdioxid – nur Wasser.

Der Nachteil: Wasserstoff kommt auf der Erde nahezu nur in gebundener Form vor. Um es zu gewinnen, benötigt man viel Energie. Wie schon von Jules Vernes umrissen, lässt sich das Element mittels Elektrolyse gewinnen. Bei diesem Verfahren wird mittels Strom das Wasser in seine Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt. Klimaneutral bleibt der Brennstoff also nur, wenn auch die Elektrizität aus umweltfreundlichen Quellen stammt. Hier kommen erneuerbare Energien ins Spiel. Durch deren Ausbau wird es immer wichtiger überschüssige Energie, die nicht sofort ins Netz eingespeist werden kann, auch über längeren Zeitraum zu speichern. Wind und Sonne halten sich eben nicht an die Nachfrage. In sogenannten Power to Gas-Anlagen lässt sich dieser klimafreundliche Strom nut-

zen, um beispielsweise Wasserstoff zu produzieren. Da Haushalte einen großen Anteil am CO<sub>2</sub> Ausstoß haben, könnte der Einsatz von Wasserstoff für das Heizen einen wesentlichen Beitrag zum Klimaschutz leisten. Noch ist die Herstellung recht kostenintensiv, doch die Heiztechnikbranche steht in den Startlöchern.

### Wasserstoff ist auf dem Vormarsch

Bereits heute ist es erlaubt, in Abhängigkeit von den Gaskennwerten nach DVGW Arbeitsblatt G260 Erdgas mit 4-10 % Wasserstoff anzureichern. Doch wäre es möglich ganz auf Wasserstoff umzusteigen? Momentan laufen mehrere Projekte, um genau das herauszufinden. So hat die britische Regierung mit „Hy4Heat“ ein Programm aufgesetzt, das prüfen soll, welche technischen und logistischen Hürden zu nehmen sind, um den Wasserstoffanteil nach und nach zu steigern. In Großbritannien ist mit 80 % der Anteil der Haushalte, die auf Gas setzen, im internationalen Vergleich besonders hoch, der positive Effekt wäre damit besonders spürbar. Die drittgrößte Stadt des Landes Leeds plant, einen Teil ihres Gasnetzes mittelfristig auf 100 % Wasserstoff umzustellen. Auch auf dem Festland, genauer gesagt in den Niederlanden, gehen die Überlegungen in eine ähnliche Richtung. Dort kommt hinzu, dass die Ressourcen der Erdgasfelder bald ausgeschöpft sind. In Rozenburg bei Rotterdam laufen bereits Feldtests mit einer Wasserstoffanreicherung von 100 %. Deutschland wiederum ist führend, wenn es um Power to Gas-Anlagen geht. Die Forscher untersuchen in Testanlagen, wie sich mit minimalem Energieeinsatz möglichst viel Wasserstoff erzeugen lässt. Und es gibt diverse Studien zur Umwandlung von Gaspipelines zu Wasserstoffpipelines. Kurz: Der Markt ist in Bewegung.



**Bild 1:** Das Grundprinzip der Brennwerttherme funktioniert auch mit Wasserstoff. Aber nur wenn die Komponenten entsprechend angepasst werden. Der Wasserstoff brennt anders als Erdgas  
Foto: © ebm-papst



## Was für Hersteller von Brennwertthermen bei der Umstellung auf Wasserstoff wichtig ist

1. Die Flammgeschwindigkeit ist achtmal höher als bei Methan. Die Gebläse müssen auf den höheren Druckverlust der Brenner angepasst werden.
2. Wegen der geringfügig niedrigeren dynamischen Viskosität muss auf die Leckage geachtet werden.
3. Wasserstoff hat eine hohe Permeabilität. Es müssen geeignete Elastomer-Werkstoffe verwendet werden.
4. Flammen-Messverfahren mittels Ionisation ist bei 100 % Wasserstoff nicht möglich. Hersteller müssen andere Sensoren oder Thermoelemente erproben.
5. Zündbelastungen und Zündzeiten müssen bei reinem Wasserstoff möglichst niedrig gehalten werden.
6. Der Heizwert von Wasserstoff ist im Vergleich zu Methan geringer. Umso wichtiger ist ein perfekt abgestimmter Gas-Luft-Verbund.

### Herausforderungen für Hersteller

Etliche Hersteller arbeiten daher daran, ihre Brennwertgeräte auf den sauberen Energielieferanten vorzubereiten (Bild 1). Ziel ist es, dies mit möglichst wenigen

technischen und konstruktiven Änderungen zu schaffen. Die gute Nachricht: Das bisherige Funktionsprinzip kann bestehen bleiben. Aufgrund der Eigenschaften von Wasserstoff müssen hier jedoch im Wesentlichen folgende Aspekte berücksichtig

werden: die Leckage-Anforderungen, die Materialverträglichkeit und vor allem das Brennverhalten.

Stichwort Leckage: Wasserstoff ist das leichteste aller chemischen Elemente mit der niedrigsten Dichte, es besitzt eine

## Stoffdaten für typische Brenngase bei Heizgeräten im Vergleich

		Wasserstoff H2	Methan CH4	Propan C3H8		
1	volumenbezogener Heizwert (interior)	$H_i$	10,782 <sup>1)</sup>	35,894 <sup>1)</sup>	93,118 <sup>1)</sup>	[MJ/m <sup>3</sup> ]
2	volumenbezogener Brennwert (superior)	$H_s$	12,745 <sup>1)</sup>	39,831 <sup>1)</sup>	101,142 <sup>1)</sup>	[MJ/m <sup>3</sup> ]
3	Dichte im Normzustand	$\rho$	0,08989 <sup>2)</sup>	0,7175 <sup>2)</sup>	2,0100 <sup>2)</sup>	[kg/m <sup>3</sup> ]
4	relative Dichte	$d_r$	0,070 <sup>2)</sup>	0,555 <sup>2)</sup>	1,554 <sup>2)</sup>	[ - ]
5	oberer Wobbeindex	$W_o$	48,34 <sup>3)</sup>	53,47 <sup>3)</sup>	81,12 <sup>3)</sup>	[MJ/m <sup>2</sup> ]
6	dynamische Viskosität	$\eta$	0,0000088 <sup>3)</sup>	0,0000110 <sup>3)</sup>	0,0000081 <sup>3)</sup>	[kg/ms]
7	kinematische Viskosität	$\nu$	0,000106 <sup>3)</sup>	0,0000167 <sup>3)</sup>	0,0000044 <sup>3)</sup>	[m <sup>2</sup> /s]
8	obere Zündgrenze	OZG	77 <sup>4)</sup>	16,5 <sup>4)</sup>	10,9 <sup>4)</sup>	[Vol-%]
9	untere Zündgrenze	UZG	4 <sup>4)</sup>	4,4 <sup>4)</sup>	1,7 <sup>4)</sup>	[Vol-%]
10	Zündtemperatur in Luft	$\vartheta_z$	530 <sup>5)</sup>	645 <sup>5)</sup>	510 <sup>5)</sup>	[°C]
11	Mindestzündenergie	MZE	0,017 <sup>5)</sup>	0,23 <sup>5)</sup>	0,24 <sup>5)</sup>	[mJ]
12	maximaler Explosionsdruck	$p_{max}$	8,3 <sup>6)</sup>	8,1 <sup>6)</sup>	9,4 <sup>6)</sup>	[bar]
13	max. zeitlicher Druckanstieg pro Volumen	$K_{st}$	800 <sup>6)</sup>	68 <sup>6)</sup>	70 <sup>6)</sup>	[bar(m/s)]
14	max. Druckanstiegsgeschwindigkeit	$(\Delta p/\Delta t)_{max}$	3321 <sup>6)</sup>	284 <sup>6)</sup>	291 <sup>6)</sup>	[bar/s]
15	theoret. stöchiom. Verbrennungstemperatur in Luft	$\vartheta_{max}$	2086 <sup>7)</sup>	1922 <sup>7)</sup>	1964 <sup>7)</sup>	[°C]
16	max. Flammgeschwindigkeit in Luft	$u_{max}$	346 <sup>8)</sup>	43 <sup>8)</sup>	47 <sup>8)</sup>	[cm/s]
17	Normspaltweite	NSW	0,29 <sup>9)</sup>	1,14 <sup>9)</sup>	0,92 <sup>9)</sup>	[mm]
18	Mindestluftbedarf	$l_{min}$	2,38 <sup>10)</sup>	9,52 <sup>10)</sup>	23,8 <sup>10)</sup>	[m <sup>3</sup> L/m <sup>3</sup> B]
19	Taupunkttemperatur bei $\lambda=1$	$\vartheta_t$	73 <sup>11)</sup>	60 <sup>11)</sup>	56 <sup>11)</sup>	[°C]
20	Mindestabgasmenge feucht ( $\lambda=1$ , Normbedingungen)	$v_{min,f}$	2,88 <sup>12)</sup>	10,52 <sup>12)</sup>	25,8 <sup>12)</sup>	[m <sup>3</sup> fA/m <sup>3</sup> B]
21	Mindestabgasmenge trocken ( $\lambda=1$ , Normbedingungen)	$v_{min,t}$	1,88 <sup>12)</sup>	8,52 <sup>12)</sup>	21,8 <sup>12)</sup>	[m <sup>3</sup> fA/m <sup>3</sup> B]

<sup>1)</sup>Cerbe, Lendt, et al., Grundlagen der Gastechnik, München, Hanser, 8. Aufl. 2017  
<sup>2)</sup>Scholten, Dör, Werschki, Mögliche Beeinflussung von Bauteilen der Gasinstallation durch Wasserstoffanteile, DVGW-Forschungsbericht G201615, 2018  
<sup>3)</sup>Bender, sicherer Umgang mit Gefahrstoffen, Wiley-VCH, Weinheim, 5. Aufl 2018  
<sup>4)</sup>Hirsch, Brandes, sicherheitstechnische Kenngrößen bei nicht atmosphärischen Bedingungen PTB, Braunschweig 2014  
<sup>5)</sup>VBIG-Leitfaden, Explosionschutz, 2010  
<sup>6)</sup>Hauptmann, Prozess und Anlagensicherheit, Springer Verlag, Berlin Heidelberg 2013

Bild 2: Vergleich der Stoffdaten von Wasserstoff, Methan und Propan

Foto: © ebm-papst

höhere Permeabilität als Erdgas durch Elastomere und Kunststoffe hindurch und hat wegen der etwas kleineren dynamischen Viskosität eine geringfügig höhere Leckage als Erdgas. Die Dichtigkeit der Komponenten in der Brennwerttherme muss entsprechend angepasst und mit entsprechenden Prüfverfahren kontrolliert werden. Ebenfalls gilt es, die Verträglichkeit der Materialien zu überprüfen.

Besondere Aufmerksamkeit erfordert das Brennverhalten (siehe **Bild 2**). So ist die Flammgeschwindigkeit achtmal höher als bei Methan. Dementsprechend können Hersteller nicht mit den bisherigen Brennern arbeiten, der Druckverlust steigt und die Leistung der Gebläse muss

optimiert werden. Vor allem muss darauf geachtet werden, dass die Zündung nicht zu spät erfolgt. Wasserstoff ist nämlich sehr reaktiv und zündet wesentlich besser als Methan. Der Feuerungsautomat muss deshalb geringere Zündzeiten berücksichtigen. Ein weiterer Knackpunkt ist, dass für die Kontrolle und Überwachung der Verbrennung die gängigen Flammenmessverfahren mittels Ionisation nicht möglich sind. Heizgerätehersteller müssen also neue Sensoren oder Thermoelemente erproben.

Ein entscheidender Punkt ist zudem: Wasserstoff hat zwar einen geringeren Heizwert als Methan, der für den Austausch von Brenngasen wichtige Wobbeindex ist jedoch annähernd gleich hoch.

Um eine optimale Vermischung im Venturi zu realisieren, muss der Gas-Luft-Verbundregler entsprechend angepasst werden. Dem Zusammenspiel von Gasgebläse, Venturi und Gasventil kommt dementsprechend eine wichtige Bedeutung zu.

### NRV 118 bereit für H<sub>2</sub>

Der NRV 118 (**Bild 3**) von ebm-papst ist ohne Änderungen bereits für den Einsatz mit einem Wasserstoffanteil von bis zu 10 % ausgelegt. Die Ingenieure des Landshuter Standorts haben das etablierte Verbundsystem NRV 118 nun in mehreren Untersuchungen und ersten Feldtests auf die Wasserstofftauglichkeit überprüft. Das Ergebnis: Mit einigen Änderungen lässt sich das Verbundsystem auf den Einsatz mit 100 Prozent Wasserstoff anpassen. Das betrifft beispielsweise die Dichtigkeit von Gasventil und Gebläse, die erhöht wurden. Die verwendeten Kunststoffe und Metalle wurden auf ihre Eignung überprüft.

Ein weiterer Pluspunkt: Dank spezieller Vormischeinrichtung ist der NRV 118 bestens für den Wasserstoffeinsatz geeignet. Das „pre-fan-mix“-Gasgebläse kompensiert den niedrigeren Wobbeindex und Heizwert von Wasserstoff im Saugbetrieb. Komplizierte Steuerleitungen sind nicht erforderlich. Zudem können höhere Modulationen gefahren werden, da sich das Gasventil durch den Unterdruck optimal ansteuern lässt. Unter dem Strich können Hersteller damit auch bei einem Einsatz von 100 % Wasserstoff auf den „NRV 118 Hydrogen“ setzen. Es wird noch einige Zeit dauern, bis der saubere Brennstoff flächendeckend zum Heizen eingesetzt werden kann (**Bild 4**). Aber wenn die Entwicklungen in Wissenschaft, Politik und Industrie so weitergehen, könnte Jules Vernes Vision in nicht allzu ferner Zukunft aus dem Reich der Fiktion in die Realität treten.



**Bild 3:** Der „NRV 118 – Hydrogen“ ist für den Wasserstoffeinsatz bestens geeignet  
Foto: © ebm-papst



**Bild 4:** Noch ist es eine Vision. Aber Wasserstoff könnte in Zukunft das Erdgas ablösen und als klimaneutraler Brennstoff die Wärmeerzeugung übernehmen  
Foto: © ebm-papst

#### Autor:

Jürgen Schwalme  
ebm-papst  
Landshut GmbH  
[www.ebmpapst.com](http://www.ebmpapst.com)

## „Wir sehen eine reelle Chance für den Wirtschaftsstandort Deutschland, im Bereich der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie eine Vorreiterrolle einzunehmen“

Interview mit **Jörg Starr**, H<sub>2</sub>-Projektchef bei Audi und CEP-Vorsitzender zu Perspektiven und Chancen der Wasserstoffmobilität

**gwf:** *Im Zuge von Klimawandel und Coronakrise ist ein grüner Neustart aktuell in aller Munde. Was ist Ihr Standpunkt zum Thema? Welche Stellschrauben halten Sie für am wichtigsten, an denen die deutsche Wirtschaft jetzt drehen muss?*

**Starr:** Mehrere Punkte müssen aktuell in den Fokus rücken: Zum einen der Aufbau von Elektrolyse-Kapazitäten, zum anderen der Ausbau einer H<sub>2</sub>-Infrastruktur für LKW, Busse und PKW.

Die Clean Energy Partnership plädiert zudem ganz konkret dafür, dass die Bundesregierung die nationalen Ziele für den Anteil der erneuerbaren Energien der in den Verkehr gebrachten Kraftstoffe auf mindestens 20 % anhebt. Dabei muss grüner Wasserstoff vollumfänglich angerechnet werden. Nur so gelingt es, einen Markt für grünen Wasserstoff zu schaffen. Der Weg, um den realen Bedarf zu decken, wäre geebnet und die Wasserstoffproduktion würde wirtschaftlich attraktiv.

**gwf:** *Wie stehen Sie zur Nationalen Wasserstoffstrategie der Bundesregierung und wie sollten Ihrer Meinung nach die nächsten, konkreten Schritte aussehen?*

**Starr:** Die Clean Energy Partnership setzt sich seit Jahren für eine zielführende Gestaltung der regulatorischen Rahmenbedingungen einer nachhaltigen Etablierung der H<sub>2</sub>-Mobilität ein, die eng mit den Erfordernissen der heimischen Wirtschaft abgestimmt ist. Von daher verstehen wir die Verabschiedung der Nationalen Wasserstoffstrategie (NWS) als einen ersten, entscheidenden Schritt hin zu einer erfolgreichen Verkehrswende, der die Erreichung der Klimaziele 2050 maßgeblich vorantreiben wird. Von nun an geht es um eine konsequente, sehr zeitnahe Umsetzung der Pläne, um mittel- und

langfristig einen investitionssicheren Handlungsrahmen für die heimische Wirtschaft zu schaffen.

Die Anerkennung von grünem Wasserstoff als Kraftstoff und Speichermedium kann nur ein erster Schritt in diese, richtige Richtung sein. Was wir jetzt ganz konkret brauchen, ist eine rasche, konsequente Regulierung, konkrete Gesetze und Verordnungen.

**gwf:** *Inwiefern Denken Sie, dass die Krise einen Katalysator darstellt, sodass durch Bundes- und Europa-Fonds im Rahmen der Energiewende Investitionssicherheit gegeben werden kann oder haben Sie die Befürchtungen, dass die Energiewende aufgrund der Krise und der damit verbundenen Kosten stark stagnieren könnte?*

**Starr:** Es müssen langfristige Businessmodelle generiert werden und dies geschieht mitnichten durch Stagnation. Ich bin fest davon überzeugt, dass wir diese Krise als Chance nutzen werden. Nach wie vor gibt es den Wunsch nach mehr Mobilität – aber bitte klimafreundlich. Aus meiner Sicht wird diese Haltung durch die Krise nur noch verstärkt.

**gwf:** *In der CEP befinden sich diverse Global Player der Automobilbranche, die selbst aktuell noch keine Brennstoffzellenfahrzeuge in Serie produzieren. Auch auf Ihr Unternehmen AUDI trifft das zu. Wirkt das für Außenstehende nicht widersprüchlich?*

**Starr:** In der Außenwirkung mag das so aussehen; das Thema ist aber deutlich komplexer. Brennstoffzellen-Fahrzeuge werden in Zukunft die Lücke füllen, die batterieelektrische Fahrzeuge hinterlassen, und somit unser Portfolio ideal ergänzen. Wir erwarten in den nächsten Jahren einen signifikanten Hochlauf batterieelek-

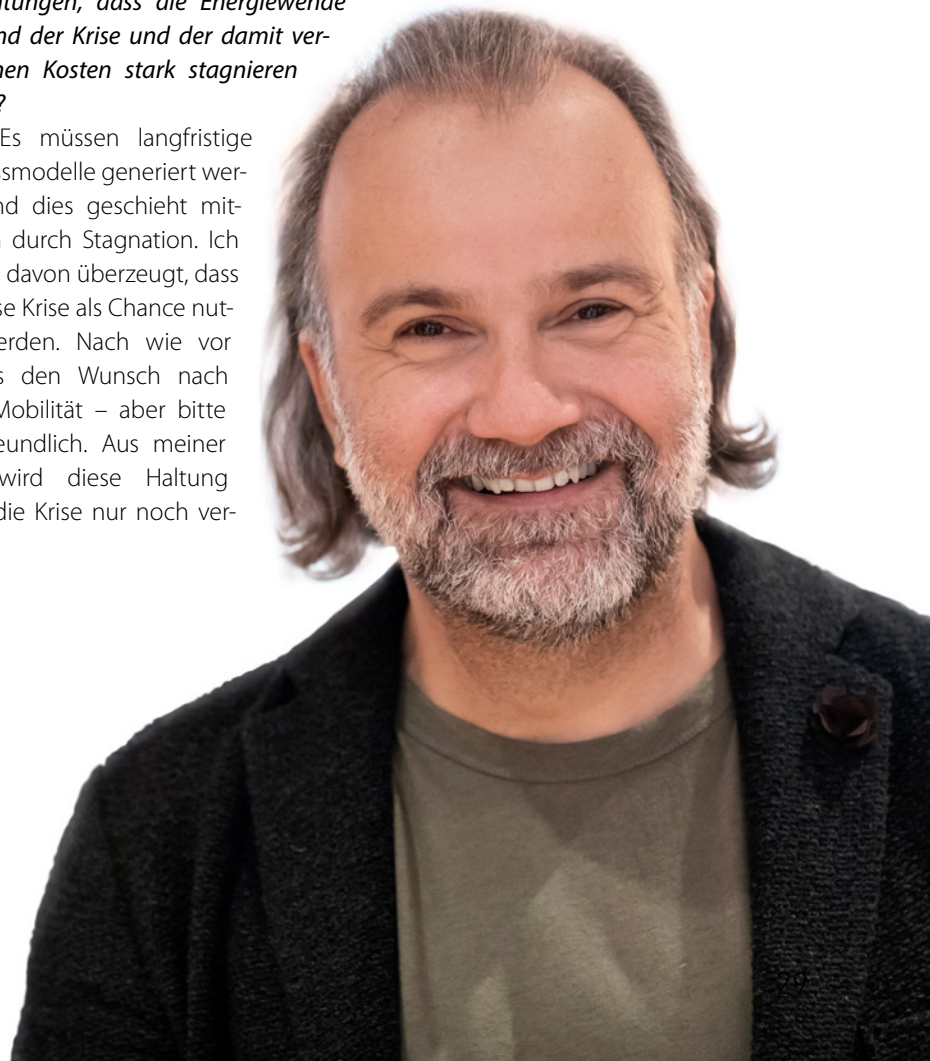


Bild: © Albrechtmarschner Fotografen

trischer Fahrzeuge - passend zu den Klimazielen und der daraus abgeleiteten notwendigen CO<sub>2</sub>-Reduktion. Für die Hersteller werden dann in einem zweiten Schritt Brennstoffzellen-Fahrzeuge das Portfolio ergänzen. Für Trucks ab 40 t sehen wir unsere Technologie aufgrund der hohen Reichweiten und kurzen Betankungszeiten sowieso als alternativlos an.

**gwf: Sie erwähnten es bereits: Durch die steigenden Vorgaben bekommt das Stichwort Heavy Duty eine immer größere Relevanz im Einsatz von Wasserstoff, wo genau sehen Sie dort die Stärken der Brennstoffzellentechnologien im Vergleich zu anderen Antrieben?**

**Starr:** Schwere Fahrzeuge verbrennen in der Regel große Mengen an fossilen

Brennstoffen, daher ist das Potenzial des Wasserstoffantriebs zur Verringerung der Emissionen hier sehr hoch. Dies kann sich erheblich auf die Qualität der Atmosphäre im Arbeitsbereich dieser Fahrzeuge auswirken und auch auf die Luftqualität im Allgemeinen. Je größer ein Fahrzeug und je weiter es fährt, desto mehr macht es Sinn, den Strom für einen Elektroantrieb durch eine Brennstoffzelle zu produzieren und nicht tonnenschwere Batterien einzusetzen. Laster mit Brennstoffzelle kommen auf eine deutlich höhere Reichweite als batteriegetriebene Fahrzeuge, lassen sich schneller auftanken und verwenden weniger kritische Rohstoffe.

**gwf: Heavy Duty wird von vielen Experten als potenzieller Problemlöser des bekann-**

**ten Henne-Ei-Problems von Wasserstoff-tankstellen und -fahrzeugen gesehen. Wie steht die CEP dazu und was sind Ihre Pläne hinsichtlich des Ausbaus beider Faktoren?**

**Starr:** Wir machen uns gerade gemeinsam mit Hydrogen Europe und unserem Partner H<sub>2</sub> Mobility in einem Projekt Gedanken über Tankstandards für LKW. Wir wissen, dass diese im Schnitt 80 KG Wasserstoff an Bord haben werden. Wie das technologisch umgesetzt werden kann, ist aber noch offen. So prüfen wir gerade verschiedene Möglichkeiten und die Kosten, um dann die beste Variante auswählen zu können. Die Entscheidung wird dann für die gesamte Tankinfrastruktur in der EU gelten und natürlich auch für die Hersteller. Erste Tankstellen sind 2023 geplant: hier spielt die auch Förderung der EU eine wesentliche Rolle.

**Clean Energy Partnership – der Wasserstoff Think-Tank**

Die Clean Energy Partnership (CEP) ist eine Industriepartnerschaft aus branchenübergreifenden Unternehmen, die an der Marktaktivierung einer Wasserstoff- und Brennstoffzellenmobilität arbeiten. Gegründet 2002 als Initiative aus Politik und Industrie, hat die CEP sich 2017 hin zu einer reinen Industriepartnerschaft entwickelt. Gemeinsam arbeiten Technologie-, Automobil-, Energie- und Mineralölkonzerne an Synergien und nutzbaren Ressourcen innerhalb eines geschützten Rahmens.

In verschiedenen Arbeitsgruppen kommen Vertreter von Air Liquide, Audi, BMW, Daimler, EWE, GP Joule, H<sub>2</sub> Mobility, Honda, Hyundai, Linde, Infraser, Höchst, OMV, Shell, Total, Toyota und der Westfalen Gruppe zusammen und denken das Thema Mobilität neu.

**gwf: Wie positionieren Sie sich bezüglich der Farbenskala von Wasserstoff? Bevorzugen Sie die Verwendung von grünem Wasserstoff oder vertreten Sie eine liberale Meinung, in der ein Farbenmix zu Beginn unumgänglich ist?**

**Starr:** Natürlich setzen wir in der CEP auf Grünen Wasserstoff und schließen uns der CertifHy-Definition an. Ich sehe die Diskussion um die Farbenlehre eher kritisch. Entscheidend ist doch, dass der Wasserstoff nachvollziehbar sauber ist. Bei der Elektrolyse haben wir immer noch das Problem, dass der Strom so stark mit Umlagen- und Abgaben belastet ist, dass es die Wasserstoffproduktion unwirtschaftlich macht. Auf der anderen Seite geben wir Windparkbetreibern jedes Jahr Millionen, damit sie ihre Anlagen abregeln. Wenn wir diesen Strom für die Elektrolyse nutzen könnten, wäre schon viel gewonnen. Eine Fraunhofer-Studie sagt langfristig ein Potenzial von 200 TWh an abschaltbaren Lasten aus Erneuerbaren in Deutschland voraus. Das ist schon mal ein guter Anfang.

**gwf: Eine große Sorge beim wirtschaftlichen Umschwung im Rahmen der Energiewende ist der Verlust vieler Arbeitsplätze z. B. in der Braunkohle. Wie schätzen Sie diese Umstrukturierung ein,**



H<sub>2</sub>-Produktionsanlage in Leuna

Bild: © Linde

werden äquivalent viele Arbeitsplätze neu geschaffen?

**Starr:** Eins ist klar: Energie- und Mobilitätssektor stehen vor großen Umbrüchen. Daran ist nicht zu rütteln. Und natürlich ist es immer bedauerlich, wenn Arbeitsplätze verloren gehen. Aber deshalb eine nicht zukunftsfähige Technologie weiter zu erhalten, verlagert das Problem nur auf einen späteren Zeitpunkt. Betroffenen müssen Perspektiven aufgezeigt werden. Wasserstoff ist eine solche. Wir sehen hier eine reelle Chance für den Wirtschaftsstandort Deutschland, generationsübergreifend im Bereich der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie eine Vorreiterrolle einzunehmen. Mit guten Prognosen für den heimischen Arbeitsmarkt: 35.000 bis 70.000 Arbeitsplätze könnten in diesem Kontext bis zum Jahr 2030 neu entstehen und bis zum Jahr 2050 150.000. Durch eine mit konventionellen Antriebsformen durchaus vergleichbare Wertschöpfungstiefe der H<sub>2</sub>-Mobilität kann die Automobilindustrie eine tragende Säule der deutschen Wirtschaft bleiben. Daher begrüßen wir das in der NWS verankerte Ziel, die Wettbewerbsfähigkeit der Wirtschaft durch For-



Grüner Wasserstoff als Chance für die zukünftige Automobilindustrie Bild: © Albrechtsbestebilder

schung und Entwicklung im Bereich Wasserstofftechnologien zu fördern.

**gwf: Welchen Einfluss hat die Verkehrswende auf die deutsche Automobilbranche und welchen Stand wird diese in 20 Jahren in der Wirtschaft haben?**

**Starr:** Ich denke, wenn wir das Thema Verkehrswende plus die Chancen der Di-

gitalisierung richtig anfassen, haben deutsche Automobiler hervorragende Chancen, sich in der Zukunft hin zu herausragenden Technologiekonzernen zu entwickeln. Denn: Mobilität wird auch in Zukunft eine wesentliche Rolle spielen.

**gwf: Vielen Dank für das Interview!**

## Bei uns ist mehr für Sie drin!

**Das umfangreiche Produktportfolio von Kager – eine Lösung für jede thermische Herausforderung.**

Bei Fragen der Hochtemperaturtechnik, der Beschichtungstechnik sowie der Klebe- und Dichtungstechnologie steht Ihnen Kager Industrieprodukte mit einem breit gefächerten Portfolio und einem qualifizierten Beraterteam zur Seite.

Viele Kunden in eMobility, Hybrid- und Brennstoffzellentechnik setzen im Rahmen ihrer Fertigung, Konstruktion und Produktentwicklung auf unsere innovativen Lösungen.

Hochtemperaturprodukte | Kälteerzeugung | Dichten und Kleben | Messtechnik | Beschichtungen | Problemlöser



Paul-Ehrlich-Str. 10a  
D-63128 Dietzenbach  
Tel. +49-(0)6074-40093-0  
info@kager.de

[www.kager.de](http://www.kager.de)

Zertifiziert nach  
DIN EN ISO 9001:2015



# Methan-Plasmalyse – Emissionsfreie Wasserstoffherzeugung aus Gas

Wasserstoff hat das Potenzial, die Energiegewinnung, aber auch die Wärmeerzeugung und den Verkehr, zu dekarbonisieren. Damit kann Wasserstoff den entscheidenden Beitrag zur Erreichung der Klimaziele leisten. Entscheidend für die Nachhaltigkeit und Umweltverträglichkeit von Wasserstoff ist jedoch die Art, wie und woraus er gewonnen wird. Ein klimaneutrales und kostengünstiges Herstellungsverfahren ist die Methan-Plasmalyse. Hierbei wird Erdgas oder Biogas (CH<sub>4</sub>) unter sehr geringem Energieaufwand in Wasserstoff und festen Kohlenstoff umgewandelt – ohne dass dabei CO<sub>2</sub> entsteht. Der Wasserstoff kann direkt für die CO<sub>2</sub>-freie Wärme- und Stromgewinnung in Wasserstoff-BHKWs oder Brennstoffzellen genutzt werden. Das CO<sub>2</sub> wird als Carbon Black dauerhaft in Produkten gebunden. Damit ist die Plasmalyse nicht nur eine marktreife Technologie zur CO<sub>2</sub>-Reduktion, sondern eine echte Alternative zur umstrittenen CCS-Speicherung.

Deutschland soll bei der Nutzung neuartiger klimafreundlicher Wasserstoff-Energie weltweit zum Vorbild werden. Dazu verabschiedete das Bundeskabinett am 9. Juni 2020 in Berlin eine Strategie, die Milliarden-Zuschüsse, rechtliche Erleichterungen und konkrete Produktionsziele vorsieht. Denn Wasserstoff hat das Potenzial, die Energiegewinnung, vor allem aber auch die Wärmeerzeugung und den Verkehr, zu dekarbonisieren. Damit kann Wasserstoff den entscheidenden Beitrag zur Erreichung der Klimaziele leisten. Entscheidend für die Nachhaltigkeit und Umweltverträglich-

keit von Wasserstoff ist jedoch die Art, wie er gewonnen wird.

## Grüner Wasserstoff als Beitrag zur Energiewende

Die Vision einer grünen Wasserstoffwirtschaft ist es, aus Solar- und Windkraft Strom zu gewinnen, der dann zur Produktion von Wasserstoff genutzt wird. Das gängigste Verfahren ist die Elektrolyse, bei der destilliertes Wasser mit Hilfe von Strom in Sauerstoff und Wasserstoff gespalten wird. Es benötigt jedoch viel Energie (> 43kWh/kg H<sub>2</sub>) und ist sehr teuer.

Gegenwärtig betragen die Kosten für die Wasserstoffherzeugung durch strombasierte Verfahren mit erneuerbarem Strom etwa das Drei- bis Fünffache der Kosten für Wasserstoff auf Gas- oder Kohlebasis.

Der so gewonnene Wasserstoff lässt sich transportieren, um sowohl die Industrie wie auch die Verbraucher flächendeckend zu versorgen. Über verschiedene Technologien, wie z. B. Blockheizkraftwerke, Brennstoffzellen und Gasturbinen, lässt sich aus Wasserstoff emissionsfrei Strom und Wärme erzeugen (Bild 1) Außerdem soll zukünftig der Wasserstoff in das Gasnetz einge-

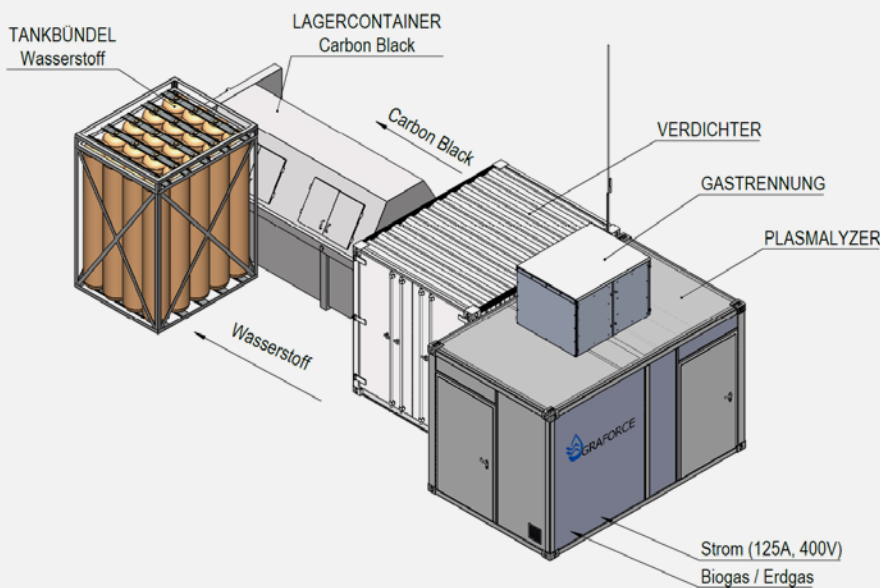


Bild 1: Schema der Plasmalyse-Anlage



Bild 2: Plasma

speist, als Reinstoff hochwertigen Anwendungen der Industrie zugeführt und in Brennstoffzellenfahrzeugen als Kraftstoff eingesetzt werden.

**Methan-Plasmalyse: So wird Gas klimafreundlich**

Das Konzept der Gewinnung von Wasserstoff aus Erdgas ist nicht neu. Bisherige Verfahren sind allerdings alles andere als umweltfreundlich: Methan und Wasser werden unter Hitze in Wasserstoff und CO<sub>2</sub> umgewandelt, das überflüssige CO<sub>2</sub> wird in die Atmosphäre abgegeben und verstärkt so den globalen Treibhauseffekt. Die Methanpyrolyse hingegen wandelt Methan in Wasserstoff und festen Kohlenstoff, allerdings kommt sie bisher nur im Labormaßstab zur Anwendung.

Die Methan-Plasmalyse von Graforce (Bild 1 und 2) ist ein inzwischen industriereifes, erprobtes Verfahren zur klimafreundlichen Wasserstoffherstellung.



Bild 3: Wasserstoffcontainer

Anstelle von Wasser werden Kohlenwasserstoffverbindungen in Klär-, Biogas oder Erdgas (C<sub>x</sub>H<sub>x</sub>-Verbindungen) als Wasserstoffquelle genutzt. Diese werden unter sehr geringem Energieaufwand in Wasserstoff und festen Kohlenstoff umgewandelt – ohne dass CO<sub>2</sub> entsteht. Weil der Wasserstoff in Methan wesentlich

schwächer gebunden als z. B. in Wasser reichen bereits 10 kWh Energie, um aus 4 kg Methan 1 kg Wasserstoff und 3 kg elementaren Kohlenstoff zu gewinnen.

Der Wasserstoff (Bild 3) kann in einem Wasserstoff-BHKW oder einer Brennstoffzelle CO<sub>2</sub>-frei Wärme und Strom erzeugen. Der elementare Kohlenstoff – auch



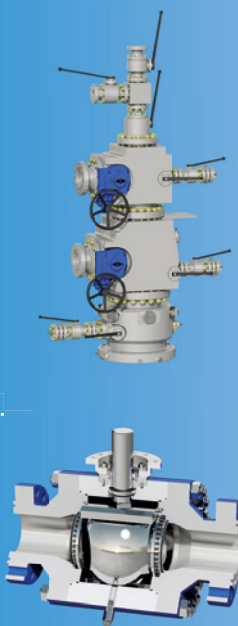
**ZUKUNFTSSICHER FÜR WASSERSTOFF ?!**



Kugelhähne, Bohrlochköpfe und Prüfungen für Wasserstoff-Anwendungen.

Die richtige Auswahl von Werkstoffen und zuverlässige Dichtheitstests geben Sicherheit.

- 1. Materialeignungsprüfung
- 2. Test auf Wasserstoff-Dichtheit





**Bild 4:** Dr. Jens Hanke, Gründer und CTO von Graforce, zeigt das in Kohlenstoff umgewandelte CO<sub>2</sub> nach der Plasmalyse

Carbon Black genannt – ist ein wertvoller Rohstoff, der in Farben und Keramiken, der Elektroindustrie oder zur Herstellung von Asphalt verwendet wird (Bild 4). Somit wird das CO<sub>2</sub> nicht mehr frei, sondern dauerhaft in Produkten gebunden. Damit bietet Graforce erstmals eine marktreife Technologie zur CO<sub>2</sub>-Reduktion und eine echte Alternative zur umstrittenen CCS-Speicherung.

### Einsatz von Klär- oder Biogas ermöglicht negative CO<sub>2</sub>-Emissionen

Wird für die Methan-Plasmalyse Biogas oder Klärgas verwendet, kann eine verfahrenstechnische CO<sub>2</sub>-Senke realisiert werden. Das heißt, die Energiegewinnung ist nicht nur CO<sub>2</sub>-neutral, sondern es wird der Atmosphäre sogar CO<sub>2</sub> entzogen. Die Methan-Plasmalyse gehört damit zu den Negativ-Emissions-Technologien. Diese sind laut Weltenergieericht entscheidend, um das Ziel der Klimaneutralität zu erreichen, denn viele Emissionen lassen sich nur mit großem finanziellen und technischen Aufwand reduzieren oder auch gar nicht vermeiden.

Das Plasmalyse-Verfahren bietet Industrieunternehmen, Hotels oder Einkaufszentren dagegen die Möglichkeit

den Anforderungen des Klimawandels gerecht werden und gleichzeitig Kosten einzusparen. Ein Vorreiter auf diesem Gebiet wird das MOA Hotel in Berlin: Das gehobene Konferenzhotel mit 360 Zimmern und 30 Konferenzräumen soll in Zukunft nicht mehr mit Erdgas beheizt werden. Stattdessen wird dann in einem Methan-Plasmalyzer aus Biogas Wasserstoff erzeugt und dieser in modifizierten Gas-Brennwertkesseln zur Wärmegewinnung genutzt. Der anfallende elementare Kohlenstoff wird zur Herstellung von Asphalt verwendet.

### „Abfallstoffe“ bergen enormes Wasserstoffpotenzial

Klärgas ist eine erneuerbare Ressource, die als vielseitig einsetzbarer Energieträger zum Klimaschutz und insbesondere zur CO<sub>2</sub>-Reduktion noch viel zu wenig Beachtung findet. Dabei könnte die Wasserstoffherzeugung aus Klär- und Biogas sowie Biomasse von heute 9 TWh auf um die 100 TWh im Jahr 2035 gesteigert werden.

Weltweit fallen in der Landwirtschaft jedes Jahr rund 1,5 Bill. m<sup>3</sup> Biomasse an (Gülle u. ä.). Darin enthalten sind energiereiche organische Reststoffe, aus denen per Plasmalyse 724 Mio. t grünen Wasserstoff erzeugt und dabei gleichzei-

tig 6.500 Mio. t CO<sub>2</sub> eingespart werden könnte.

Grüner Wasserstoff kann darüber hinaus auch aus organischen und anorganischen Verbindungen in industriellem Abwasser oder Kunststoff gewonnen werden. Gerade Schmutzwasser enthält einen hohen Anteil an wertvollen Stickstoff- und Kohlenstoffverbindungen, aus denen grüner Wasserstoff, Methan oder Stickstoff erzeugt werden können. So wird das Schmutzwasser nicht nur gereinigt, sondern auch das energetische Potenzial erschlossen.

Die Herstellung von Wasserstoff durch Plasmalyse benötigt im Vergleich zum klassischen Elektrolyse-Verfahren wesentlich weniger Energie und ist damit deutlich günstiger. Während die Kosten in herkömmlichen Verfahren bei 6 bis 8 € pro kg Wasserstoff liegen, sind es bei der Plasmalyse lediglich 1,5 bis 3 €.

In einer Power-to-Gas-Tankanlage (P2G) wird in Berlin seit 2018 aus dem Schmutzwasser der Berliner Wasserbetriebe (BWB) ein klimafreundliches, gasförmiges Treibstoffgemisch aus Wasserstoff und Biomethan für Erdgasfahrzeuge erzeugt. Weltweit sind weitere Anlagensysteme für 2 bis 10 m<sup>3</sup> Schmutzwasser pro Stunde in Planung.

### Fazit

Innovative Negativ-Emissions-Technologien wie die Plasmalyse tragen dazu bei, die notwendigen und definierten Klimaziele zu erreichen. Durch sie lässt sich das große Potenzial von Wasserstoff als vielseitig einsetzbarem Energieträger für Industrie, Gewerbe und Dienstleister heben. Nur mit einem hohen Anteil erneuerbarer Energien und smarten Innovationen, die auch das Potenzial von Abfallstoffen erschließen, kann eine nachhaltige, umweltschonende Energieversorgung gelingen – die auch wirtschaftlich ist.

### Autor:

**Dr. Jens Hanke**  
**Graforce GmbH**  
**Tel.: +49 30 63 2222 110**  
**hanke@graforce.de**



# Erklärung und beispielhafte Auslegung einer Wasserstofftankstelle für 20 Busse

## Hintergrund

Ende Mai verkündete die bayrische Staatsregierung, dass sie 100 Wasserstofftankstellen bauen möchte. Dabei soll der Fokus jedoch auf der Betankung von Brennstoffzellen(BZ)-Nutzfahrzeugen, insbesondere BZ-Bussen und -LKW liegen und nicht wie bisher auf BZ-PKW Tankstellen.<sup>1</sup> Kurze Zeit später zog die Bundesregierung mit der Nationalen Wasserstoffstrategie nach und plant Milliarden in den Ausbau der Wasserstoffinfrastruktur zu investieren.<sup>2</sup> Vor diesem Hintergrund lohnt es sich, einen Blick auf die Funktionsweise und Auslegung einer Wasserstofftankstelle zu werfen, um zu verstehen, welche Anforderungen und Herausforderungen eine solche Anlage mit sich bringt. Da der Einsatz von Wasserstoff gerade im Schwerlastverkehr, also für BZ-Busse, -LKW und -Schienenfahrzeuge in Zukunft immer wichtiger wird, liegt hier ein besonderes Augenmerk auf BZ-Bus-Wasserstofftankstellen. Diese arbeiten mit 350 Bar Druck und haben spezielle Anforderungen bezüglich der Betankungs-Zykluszahl.

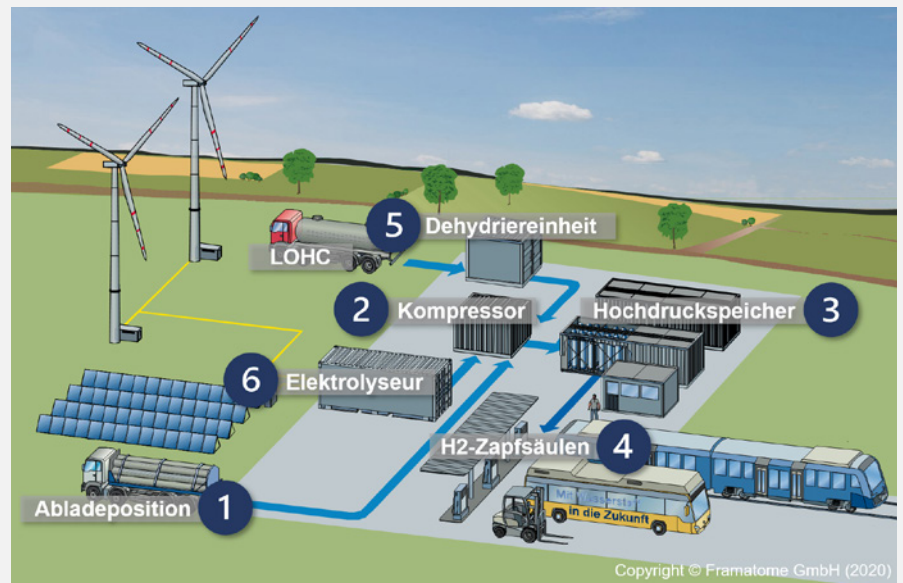
In **Bild 1** sind die unterschiedlichen Komponenten einer Wasserstofftankstelle abgebildet. Wenn man den Weg des Wasserstoffs ausgehend von der Anlieferung betrachtet, dann startet man an der H<sub>2</sub>-Tafel und Abladeposition (1). Der Wasserstoff wird in gasförmiger oder in flüssiger Form angeliefert. Flüssiger Wasserstoff muss dabei gekühlt auf -253°C geliefert werden. Bei Verwendung der Variante

mit LOHC<sup>3</sup> muss der Wasserstoff nach der Anlieferung durch Dehydrierung aus dem LOHC gelöst werden (5). Optional lässt sich die Tankstelle auch vor Ort mit Wasserstoff versorgen, indem ein Elektrolyseur Wasserstoff erzeugt (6). Nach der Anlieferung erfolgt die Verdichtung mithilfe eines Kompressors (2) und die Speicherung in einem oder mehreren Hochdruckspeichern (3). Im letzten Schritt erfolgt die Vertankung über die H<sub>2</sub>-Zapfsäulen (4) in die BZ-Nutzfahrzeuge.

Eine typische Bustankstelle, wie sie von Covalion als Marke der Framatome

GmbH errichtet wird, könnte zum Beispiel die Anforderung aufweisen, dass täglich 20 BZ-Busse betankt werden müssen. Anhand von diesem typischen Beispielprojekt soll erläutert werden, weshalb eine gute Planung und Auslegung einer Wasserstofftankstelle essenziell für den späteren Betrieb ist. Damit eine Tankstelle korrekt ausgelegt werden kann, müssen verschiedene Parameter bekannt sein. Auf diese wird im Folgenden eingegangen. Zudem wird beschrieben, wie sich die Parameter auf die Auslegung auswirken.

<sup>3</sup> Liquid Organic Hydrogen Carrier



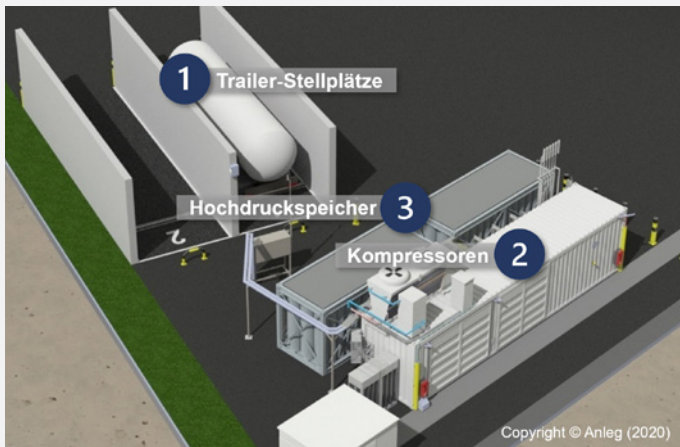
**Bild 1:** Wasserstofftankstelle mit verschiedenen Versorgungsmöglichkeiten

**Tabelle 1** zeigt in der linken Spalte die Komponenten einer Wasserstofftankstelle mit gasförmiger Wasserstoffanlieferung. In der rechten Spalte befindet sich die beispielhaften Auslegungen für eine Wasserstofftankstelle, wie sie im Kapitel 2 beschrieben wird

Komponenten	Auslegung für eine beispielhafte Wasserstofftankstelle
1. H <sub>2</sub> -Tafel und Abladepositionen	2 Stellflächen für Traileranlieferung
2. H <sub>2</sub> -Kompressor	2 Hochdruckspeicher in je einem 20' - Containern (6 Module)
3. Hochdruckspeicher	2 Kompressoren in einem 40' - Container
4. H <sub>2</sub> -Zapfsäulen-Einheit	Abgabereinrichtung und 10' Kühlcontainer
5./6. Elektrolyseur/LOHC	

<sup>1</sup> Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie (2020): Bayerische Wasserstoffstrategie. Abgerufen von [https://www.stmwi.bayern.de/fileadmin/user\\_upload/stmwi/Publikationen/2020/2020-05-28\\_Bayerische\\_Wasserstoffstrategie.pdf](https://www.stmwi.bayern.de/fileadmin/user_upload/stmwi/Publikationen/2020/2020-05-28_Bayerische_Wasserstoffstrategie.pdf)

<sup>2</sup> Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2020): Die Nationale Wasserstoffstrategie. Abgerufen von <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.html>



**Bild 2:** Typisches Layout Wasserstofftankstelle für 20 BZ-Busse mit ca. 500 kg Vertankungsmenge/Tag mit Wasserstoff Hochdruck (500 bar), einer Speicherkapazität von ca. 1.150 kg und Wasserstoffanlieferung per Trailer

### Auslegung einer Wasserstofftankstelle mit reinem Überströmprinzip

Zunächst werden die grundsätzlichen Anforderungen für die Auslegung einer Wasserstofftankstelle betrachtet. Ausgehend von diesen wird dann die Auslegung für eine beispielhafte Tankstelle Schritt für Schritt erläutert. Die Anforderungen lassen sich grob in zwei Kategorien unterteilen:

1. Anforderungen ausgehend von den **BZ-Nutzfahrzeugen**
2. Anforderungen ausgehend von dem **Betriebshof** bzw. den örtlichen Gegebenheiten

In der ersten Kategorie muss geklärt werden, welche BZ-Nutzfahrzeuge eingesetzt werden und welchen Tagesverbrauch diese aufweisen. Daraufhin wird eine Gesamtmenge an benötigtem Wasserstoff pro Tag festgelegt. Ein weiterer wichtiger Parameter ist die benötigte Betankungszeit pro Bus und die Anzahl der Back-to-Back<sup>4</sup> Betankungen. Die Anzahl der Back-to-Back Betankungen, welche auch Folgebetankung genannt werden, ist eine wichtige Größe, um die Leistungsfähigkeit einer Wasserstofftankstelle zu bestimmen. Je größer die Zeitabstände zwischen den einzelnen Betankungsvorgängen sind, desto mehr Zeit steht für die Verdichtung des Wasserstoffes zur Verfügung. Der Vorteil besteht darin, dass weniger Hochdruckspeicher vor-

gehalten werden müssen und zudem die Kühlung der gesamten Anlage geringer dimensioniert werden kann.

In der zweiten Kategorie ist die zur Verfügung stehende Fläche eine wichtige Größe für die Auslegung der Tankstelle und die Menge des Wasserstoffes, welcher dort gespeichert und vorgehalten werden kann und soll. Diese Größe hat ebenfalls einen Einfluss auf das Anlieferungskonzept zur Versorgung der Tankstelle mit Wasserstoff. Bei der Lage innerhalb Deutschlands kann es aufgrund verschiedener Erdbebenzonen zu unterschiedlichen Anforderungen beim Sicherheitskonzept kommen. Schließlich ist auch der Leistungsbedarf einer Wasserstofftankstelle durch Kompressoren und Kühlung zu berücksichtigen, weshalb auch die zur Verfügung stehende elektrische Leistung betrachtet werden muss.

Es gibt unterschiedliche Konzepte, Wasserstofftankstellen auszulegen. Im Folgenden wird eine Variante beschrieben, die das Betanken per reinem Überströmen vorsieht, also ohne aktives Verdichten während der Betankung.

An die Wasserstofftankstelle werden folgende Anforderungen gestellt: Die Tankstelle soll täglich bis zu 20 BZ-Busse betanken, die in zwei Betankungszyklen zu je  $\leq$  zehn BZ-Bussen stattfinden. Die Befüllung jedes BZ-Busses<sup>5</sup> soll in  $\leq$  10 Minuten erfolgen. Die örtlichen Gegebenheiten sollen in das Design mit einbezogen werden und die Komponenten sowohl außerhalb in Container oder in bestehende Gebäude integriert werden.

Die klimatischen und geologischen Anforderungen an die Tankstelle sollen ebenfalls berücksichtigt werden.

Die Auslegung der Wasserstofftankstelle erfolgt dann nach Parametern, welche den effizientesten und kostengünstigsten Betrieb am gegebenen Standort ermöglichen und ist an SAE J2601<sup>6</sup> angelehnt.

**Tabelle 1** gibt einen Überblick über die ausgelegten Komponenten der Tankstelle. Für die Versorgung mit Wasserstoff soll sich hier für das Konzept mit gasförmiger Wasserstoffanlieferung in Trailern entschieden werden. Jeder Trailer hat eine Kapazität von bis zu 500 kg Wasserstoff, der auf 200-300 bar Druckniveau angeliefert wird. Wie in **Bild 2** ersichtlich ist, stehen zwei Trailer-Stellplätze zur Verfügung (1), um einen einfachen und sicheren Trailerwechsel zu ermöglichen.

Über die H<sub>2</sub>-Tafel gelangt der Wasserstoff von den Trailern zu den Kompressoren (2). Die Kompressoren befinden sich beispielsweise in einem 40-Fuß Container, welcher durch eine gasdichte Wand in zwei Räume unterteilt ist. Die Kompressoren können redundant ausgelegt werden, in diesem Fall befinden sich im ersten Raum die zwei (redundanten) H<sub>2</sub>-Kompressoren sowie eine Ventilinsel. Im zweiten Raum sind Hydraulikaggregate und die Elektronik zur Ansteuerung positioniert. Des Weiteren kann, wenn gewünscht, platzsparend auf dem Dach der Containereinheit der Wärmetauscher inklusive Steuerung für die Kompressor- und Hydraulikkühlung installiert werden. Der gasförmige Wasserstoff wird mithilfe der Kompressoren bei ca. 15 °C auf ca. 500 bar<sub>g</sub> verdichtet und daraufhin in den Hochdruckspeichern bis zur Betankung gelagert.

Zur Speicherung des Wasserstoffes stehen in dem Beispiel zwei stationäre Hochdruckspeicher mit einem Speichervolumen von ca. 1.150 kg<sup>7</sup> zur Verfügung (3). Die Speicher werden hinsichtlich einer möglichen Kaskadierung im Rahmen

<sup>4</sup> Busse kommen alle hintereinander „in einem Zeitfenster, in dem Busse in kurzen Abständen betankt werden“

<sup>5</sup> Tankvolumen der BZ-Busse: 25 - 30 kg H<sub>2</sub>

<sup>6</sup> weltweiter Standard für Wasserstofftankstellen

<sup>7</sup> Durch Kombination von den zwei stationären Hochdruckspeichern und einem mobilen Trailer stehen vor Ort bis zu 1.650 kg Wasserstoff zur Verfügung.

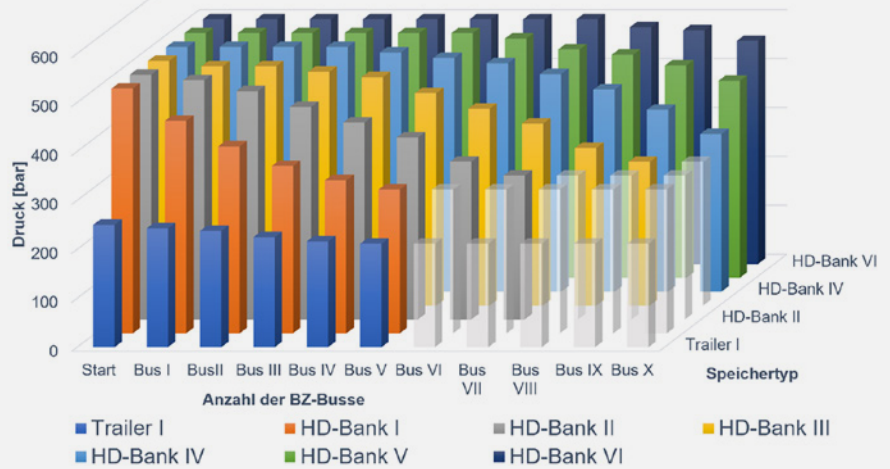
einer Parameterstudie analysiert und der wirtschaftlichste Ansatz mit den geringsten Energieverlusten, unter Berücksichtigung des Betriebsregimes, wird für die Umsetzung herangezogen. Dabei bestehen die Hochdruckspeicher jeweils aus einem 20-Fuß Container, der aus drei gleichgroßen Modulen besteht, bei einem Nenndruck von 500 bar<sub>g</sub> und 15 °C. Jedes Modul besteht aus zwei Segmenten, die mit einem eigenem Manometer<sup>8</sup> inklusive Absperrventil ausgestattet und somit individuell absperrenbar sind. Dadurch ist ein inkrementelles Auffüllen der Tanks möglich.

Unterirdische Edelstahlrohre verbinden die einzelnen Komponenten der Tankstelle und die H<sub>2</sub>-Zapfsäulen-Einheit(en). Je nach Tanktyp der Fahrzeuge (z. B. bei Typ IV Tanks) ist noch eine Vorkühlung erforderlich, da sich der Tank des BZ-Fahrzeuges bei der Betankung erwärmt. Die H<sub>2</sub>-Zapfsäulen-Einheit ist in **Bild 2** nicht dargestellt.

Die H<sub>2</sub>-Zapfsäulen-Einheit besteht aus Abgabereinrichtung und Kühlung. Der/ Die Abgabereinrichtung<sup>9</sup> zur Betankung der BZ-Busse können ggf. auch Indoor, z. B. in der Bushalle aufgestellt werden. Diese Möglichkeit wird durch eine sicherheitstechnische Betrachtung geprüft.

Die Betankung der BZ-Busse erfolgt mittels Überströmen. Das Überströmen vollzieht sich durch ein erzwungenes Ungleichgewicht zwischen Trailer und stationären Speichern sowie dem Tank des BZ-Busses. Für den Betrieb wird der effizienteste und energiesparendste Betriebsmodus gewählt, abhängig von der notwendigen Durchflussmenge. Dabei gibt es zwei grundsätzliche Betriebsmodi für die Betankung durch Überströmen. Zunächst wird der Tank des BZ-Busses per Überströmen aus dem Trailer betankt. Da der Trailer jedoch einen Druck von maximal 300 bar<sub>g</sub> aufweist und der Tank für den vollständig beladenen Zustand einen größeren Druck als 350 bar<sub>g</sub> hat, kann der Trailer den Tank des BZ-Busses nicht vollständig durch Überströmen füllen. Hierfür werden nun die kaskadierten Hochdruck-

Druckverhalten – Back-to-Back 10 Busse



**Bild 3:** Verhalten des Drucks in den Hochdruckspeichern und in einem Trailer während der Back-to-Back Betankung von zehn BZ-Bussen

speicher eingesetzt, welche bei einem Nenndruck von ca. 500 bar<sub>g</sub> die Tanks des BZ-Fahrzeuges betanken können.

Es wird ständig von der Anlage abgefragt und überprüft, welcher Betriebsmodus für die zu betankenden BZ-Busse am besten geeignet ist. In Abhängigkeit von der Ist-Temperatur und dem Ist-Druck innerhalb der Module wird die passende Betriebsweise und werden die passenden Module der Speicher gewählt. Die zur Vertankung aus dem stationären Speicher entnommene Masse an Wasserstoff wird aus dem Lieferwasserstoff-Trailer über die Kompressor-Einheit wieder nachgespeist. Hierdurch wird gewährleistet, dass der Druck der Hochdruckspeicher wieder 500 bar<sub>g</sub> erreicht.

**Beispielhaftes Druckverhalten während des Betankens von zehn BZ-Bussen Back-to-Back**

Die Betankung von mehreren BZ-Bussen in kurzen zeitlichen Abständen erfolgt über die kaskadierte Betankung aus den unterschiedlichen Speichersegmenten. Der Vorgang wird im Folgenden erläutert.

In **Bild 3** ist das Druckverhalten in dem Trailer und in den sechs Modulen der zwei Hochdruckspeicher zu sehen, wenn zehn BZ-Busse Back-to-Back betankt werden. Dabei sind die Säulen in der **Bild 3** ausgegraut, wenn das zugehörige

Speichermodul nicht mehr für die Betankung mittels Überströmen genutzt werden kann. Die Abbruchkriterien für die Wahl eines neuen Speichermoduls sind dabei die Temperatur oder der Druck. Man erkennt, dass bis zur Betankung des 6. BZ-Busses die Trailer noch genutzt werden, wenn auch nur minimal, da hier die Druckänderung äußerst gering ist. Ab der Betankung des 6. BZ-Busses muss das 2. HD-Modul aktiviert werden.

Wenn man sich die dunkelblauen Säulen des 6. HD-Moduls anschaut, so lässt sich zudem feststellen, dass ab der Betankung des 8. BZ-Busses dieses Modul ebenfalls zur Betankung beiträgt. Aufgrund der passgenauen Auslegung ist es mit dieser Wasserstofftankstelle möglich, im reinen Überströmprinzip zehn BZ-Busse Back-to-Back zu betanken und damit die gewünschten Anforderungen zu erfüllen.

**Autor und Kontakt:**

Tim Vogel  
 Framatome GmbH  
 2<sup>nd</sup>-Life Batteriespeicher und Wasserstofftechnologien  
 Tel.: +49 9131 900 92450  
 tim.vogel@framatome.com

<sup>8</sup> Druckmessgerät

<sup>9</sup> Dispenser

# Gasdruckregelung und Gasfilterung von Wasserstoff bis 16 bar aus Deutschland

Aufgrund der immer aktueller werdenden Thematik rund um die Gasdruckregelung von Wasserstoff und widersprüchlicher Aussagen rund um die Verwendung von Aluminiumlegierungen bei diesen Anwendungen bis 16 bar hat die Medenus Gas-Druckregeltechnik GmbH die RWTH Aachen beauftragt, eine umfassende Untersuchung und Literaturrecherche diesbezüglich durchzuführen. Untersucht werden sollten speziell die bei der Medenus Gas-Druckregeltechnik GmbH verwendeten Aluminiumlegierungen mit dem Ziel, die offenen Fragen wissenschaftlich zu belegen und zu beantworten.

Die untersuchten Legierungen werden sowohl bei den federbelasteten (R und RS-Serien) und pilotgesteuerten Gasdruckreglern (RS-Serie, **Bild 1**), bei den Zellengasfiltern (DF-Serie **Bild 2**) und bei den Sicherheitsabblaseventilen (SL-Serie) in allen Nennweiten bis DN200 bei Medenus eingesetzt.



**Bild 1:** Gasdruckregler RS254-DN50 mit Einbaulänge 230 mm

## Ausarbeitung der RWTH Aachen (aufgrund des Umfangs der Ausarbeitung auf die relevantesten Abschnitte gekürzt):

### Fragestellung

Die hypoeutektische AlSi7Mg0,3 Aluminium-Gusslegierung (EN-AC 42100) findet breite Anwendung in der Automobilindustrie oder Luft- und Raumfahrttechnik und wird auch für sicherheitsrelevante Strukturbauteile eingesetzt. Dieses Anwendungsspektrum begründet sich in den günstigen Eigenschaften des Werkstoffs, wie z. B. geringe Dichte, gute Vergießbarkeit, gute mechanische Eigenschaften im wärmebehandelten Zustand und allgemein gute Korrosionsbeständigkeit.

Als Werkstoff für Gasdruckregelmaturen für Wasserstoff werden bisher vor allem Stahlguss-, Gusseisen- und Messingwerkstoffe verwendet. Aufgrund der attraktiven Eigenschaften von AlSi7Mg0,3 soll nun jedoch anhand der Literatur der letzten 20 Jahre die Eignung des Werkstoffs für einen solchen Anwendungsfall mit besonderem Fokus auf die Gefahr durch Wasserstoffversprödung beleuchtet werden.

### Ausgangslage und Literaturrecherche

Allgemein bekannt ist die hohe Wasserstofflöslichkeit in flüssigem Aluminium, welche aufgrund der gleichzeitig geringen Löslichkeit im Feststoff zu Gasblasenbildung bei der Erstarrung führen kann. Die resultierende Porosität im Werkstoff kann eine dramatische Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften zur Folge haben, lässt sich aber durch eine Entgasungsbehandlung weitgehend vermeiden. Die Reaktion von gasförmigem Wasserstoff mit dem erstarrten Gusswerkstoff wurde in der Literatur bisher jedoch nicht untersucht.

Für Aluminium-Knetlegierungen ist die Reaktion mit Wasserstoff im festen Zustand deutlich besser erforscht und

umfasst die Phänomene der Spannungsrisskorrosion, bei der unter mechanischer Last und unter Einfluss eines korrosiven Mediums eine gleichzeitige anodische Auflösungsreaktion und kathodische Wasserstoffversprödung stattfinden kann, und des „Environmentally Assisted Cracking“ (EAC), das eine reine Wasserstoffversprödung an feuchter Luft ohne Auflösung des Werkstoffs beschreibt. Auch der Effekt von trockenem Wasserstoffgas auf die mechanischen Eigenschaften von Aluminium und seinen Legierungen wurde bereits von mehreren Gruppen untersucht und bisher als vernachlässigbar eingestuft. Als Grund wird die schützende Wirkung der dünnen Oxidschicht auf Aluminium vermutet, an der die energetisch ungünstige Spaltung und Anlagerung von Wasserstoffmolekülen gehemmt ist.

Die Degradation der mechanischen Eigenschaften von Aluminiumwerkstoffen aufgrund von Wasserstoff wird meist der Anlagerung des Wasserstoffs an „Fallen“ wie Korngrenzen, Ausscheidungen, Versetzungen und Leerstellen zugeschrieben, welche zu einer lokalen Verringerung der Duktilität führt. Bekannte Mechanismen sind hydrogen-enhanced localized plasticity (HELP), hydrogen-enhanced decohesion (HEDE) und absorption-induced dislocation emission (AIDE). Besonders die Zweitphasen  $MgZn_2$ ,  $Mg_2Si$ , Al-Fe-Si und  $Al_7Cu_2Fe$  wurden als Wasserstofffallen identifiziert. Die Wasserstoffversprödungsanfälligkeit kann somit unter anderem mit der vorliegenden Mikrostruktur korreliert werden.

Für die Al-Zn-Mg(-Cu) Knetlegierungen der 7xxx Serie wurde bereits eine Anfälligkeit sowohl für Spannungsrisskorrosion, als auch für EAC beobachtet. Während die Dominanz der Wasserstoffversprödung bei der Spannungsrisskorrosion noch nicht eindeutig geklärt wurde, konnte bei der Untersuchung von EAC eine eindeutige Korrelation zwischen der Rissfortschrittsgeschwindigkeit und der

## Zum Unternehmen

Seit 1972 produziert die Medenus Gas- Druckregeltechnik GmbH mit Sitz in Olpe (Bild rechts), Nordrheinwestfalen, Gasdruckregler für die Industrie und damit kann man auch auf eine lange Erfahrung in der Handhabung von Wasserstoffanwendungen zurückblicken. In der Erdgasversorgung gerade erst in der Diskussion und in der Entstehung, sind Anwendungen bis zu 100 % Wasserstoff in der Industrie schon lange Standard.

Aktuell wird viel über Lieferketten und Lieferausfälle berichtet. Dieser Problematik kann man nur dadurch entgegenwirken, wenn man auf lokale Lieferanten setzt und eine entsprechende Bevorratung aufweisen kann. Alle 16 bar Produkte werden bei Medenus zu 100 % in Deutschland gefertigt. Damit lässt sich eine Standardlieferzeit auch für Wasserstoffanwendungen von 2-3 Wochen realisieren, im Notfall auch über eine Expressproduktion innerhalb einer



Der neue Standort in Olpe mit Eröffnung im September 2020

Woche. Die Ersatzteile sind immer ab Lager verfügbar und das Lager beinhaltet eine Produktionskapazität eines halben Jahres für Standardgeräte.

relativen Feuchte, welche den Wasserstoffeintrag bestimmt, ermittelt werden. In trockener Wasserstoffgasatmosphäre wurde jedoch keine Versprödung von 7xxx Legierungen beobachtet. In der Mikrostruktur von 7xxx Legierungen liegen neben den feinverteilten festigkeitssteigernden  $MgZn_2$ -Phasen auch Cu-reiche Phasen wie  $Al_2Cu_7Fe$  und je nach Zusammensetzung auch  $Mg_2Si$  und Al-Fe-Si vor.

Die Al-Mg-Si(-Cu)-Legierungen der 6xxx Serie sind bekannt dafür unempfindlich für Spannungsrisskorrosion zu sein und auch über EAC von 6xxx Legierungen ist in der Literatur nichts bekannt. Trotz eines fehlenden Beweises für die Wasserstoffversprödungsanfälligkeit von 6xxx Legierungen, wird die Möglichkeit von einigen Gruppen weiter diskutiert. Bei der Untersuchung von 6061-T6 in trockenem Wasserstoffgas wurde jedoch kein negativer Effekt auf die mechanischen Eigenschaften beobachtet, weswegen der Werkstoff heute unter anderem als Auskleidung für Hochdruck-Wasserstofftanks verwendet wird. Die Mikrostruktur von 6xxx Legierungen zeichnet sich vor allem durch  $Mg_2Si$  Phasen aus neben denen typischerweise auch noch Al-Fe-Si-Phasen vorliegen. Sie ist allerdings frei von den zinkhaltigen Phasen der 7xxx Legierungen und bietet somit tendenziell weniger Wasserstoffal-

len. Beim Vergleich von 6061-T6 und 7075-T6 wurde auch eine niedrigere Verteilungsdichte von Ausscheidungen in der 6xxx Legierung beobachtet, was zusätzlich eine geringere Menge an angelagertem Wasserstoff im Werkstoff bewirkt.

Die Wasserstoffanfälligkeit von  $AlSi_7Mg_0,3$  wurde in der Literatur der letzten 20 Jahre nicht untersucht. Auch Korrosionsuntersuchungen fokussierten sich in der Vergangenheit vor allem auf Knetlegierungen, da in Gusswerkstoffen typischerweise viele und komplexe intermetallische Phasen vorliegen, deren elektrochemische Eigenschaften weitgehend unbekannt sind. Dennoch zeigen einige Arbeiten eine allgemein geringe Korrosionsrate von  $AlSi_7Mg_0,3$  in künstlichem Meerwasser und eine Anfälligkeit für interkristalline Korrosion im Gusszustand, welche sich jedoch gut durch hohe Abkühlraten minimieren lässt. Die Mikrostruktur des Werkstoffs ist in der Literatur jedoch ausführlich beschrieben.

Das Gussgefüge der untereutektischen  $AlSi_7Mg_0,3$ -Legierung weist Dendriten aus  $\alpha$ -Aluminium auf, in deren Zwischenräumen sich ein Al-Si-Eutektikum ausbildet.

Auch Al-Fe-Si-Phasen treten auf, wobei sich bei höheren Abkühlraten bevorzugt die  $\alpha$ -Al-Fe-Si-Phase ausbildet und bei niedrigeren Abkühlraten die

$\beta$ - $Al_5FeSi$ -Phase. Durch ein Lösungsglühen kann der Anteil von in der Matrix gelöstem Mg und somit die Festigkeit deutlich erhöht werden. Die höhere Festigkeit führt auch zu verbesserten Ermüdungsei-



**Bild 2:** Zellenfilter mit Differenzdruckmanometer

genschaften, welche durch eine Rissablenkung an den faserigen Si-Partikeln im Eutektikum weiter unterstützt wird.

Für eine weitere Verbesserung der mechanischen Eigenschaften wird der Werkstoff oft in den T6 Zustand überführt, welcher durch eine Alterungsbehandlung eingestellt wird. Hierdurch verändert sich die Mikrostruktur von einer dendritischen zu einer homogenen Al-Matrix, in der fein verteilte Mg<sub>2</sub>Si Phasen einen Anstieg der Festigkeit bewirken. Die Si-Partikel hingegen vergrößern während der Wärmebehandlung und nehmen eine globulitische Form an, welche sich positiv auf die Duktilität des Werkstoffs auswirkt. Auch der Qualitätsindex, welcher sowohl Festigkeit als auch Duktilität von Gusswerkstoffen in einer Größe zusammenfasst, fällt für den T6 Zustand um bis zu 90 MPa höher aus, als für den Gusszustand. Bei dynamischer Belastung wurde zusätzlich gezeigt, dass AlSi7Mg0,3 im T6 Zustand nicht-proportionalen Normal- und Scherspannungen besser standhält als duktile Stähle.

Aufgrund der chemischen Zusammensetzung von AlSi7Mg0,3 und der Mikrostruktur im T6 Zustand, mit den gemeinsam auftretenden Phasen Mg<sub>2</sub>Si und AlFeSi in einer homogenen α-Al Matrix, lässt sich dieser Werkstoff eher mit den Al-Mg-Si(-Cu) Knetlegierungen der 6xxx Serie vergleichen, als mit den Al-Zn-Mg(-Cu) Knetlegierungen der 7xxx Serie. Durch

die fehlenden zinkhaltigen Phasen ist zu vermuten, dass bei einer vergleichbaren Ausscheidungsichte in AlSi7Mg0,3-T6 und 6xxx Legierungen weniger Wasserstoff fallen und somit vermutlich weniger gebundener Wasserstoff vorliegt, als bei 7xxx-Legierungen. Außerdem ist die Versetzungsdichte im Vergleich zum Knetwerkstoff aufgrund der fehlenden Umformung reduziert, wodurch nochmals weniger Wasserstoff fallen im Gusswerkstoff vorliegen. Die Rolle der primären Si-Phasen bei der Wasserstoffversprödung von Aluminiumwerkstoffen ist in der Literatur der letzten 20 Jahre nicht untersucht worden. Ihre globulitische Form im T6 Zustand verringert allerdings lokale Spannungskonzentrationen aufgrund von geometrischer Kerbwirkung, was ein Versagen des Werkstoffs an diesen Phasen unwahrscheinlich macht.

### Zusammenfassung und Prognose

#### Zur Anwendung von Gussteilen aus AlSi7Mg0,3 ST6 in Gasdruckregelarmaturen für trockene Wasserstoffgasatmosphäre

Die Gusslegierung AlSi7Mg0,3 ST6 besitzt eine potenziell niedrigere Anzahl an Wasserstofffallen in der Mikrostruktur im Vergleich zu für EAC und Spannungsrisskorrosion anfälligen 7xxxer Legierungen. Die 6xxx Legierungen hingegen sind im

Einsatz als Auskleidung für Hochdruckwasserstofftanks bewährt. Aufgrund der mikrostrukturellen und chemischen Nähe der genannten Alu-Gusslegierung zu den 6xxxer Knetlegierungen ist aufgrund der hier erfolgten umfangreichen Literaturrecherche davon auszugehen, dass die AlSi7Mg0,3 ST6 sich ähnlich resistent verhält und in trockener Wasserstoffatmosphäre beständig ist. Zudem sind keine Nachteile zum Stahl- und Sphäroguss belegbar.

Die Kombination von günstigen mechanischen, Bearbeitungs- und Korrosionseigenschaften der AlSi7Mg0,3-S/K-T6 Legierung macht diesen Werkstoff somit zu einer attraktiven Alternative zu den konventionellen Stahl- Gusseisen- und auch Kupferwerkstoffen in Gasdruckregelarmaturen für trockenes Wasserstoffgas, die bis zu 16 bar Druck Verwendung finden.

#### Autorin:

Prof. Dr.-Ing. Daniela Zander  
RWTH Aachen

#### Kontakt:

Franz Feichtner  
Medenus Gas- Druckregeltechnik GmbH  
Olpe  
Tel.: +49 151 5100 2711  
f.feichtner@medenus.de



# BRANCHENNEWS RELEVANZ UND MEHRWERT

## Der Newsletter für die Gas- und Energiebranche

- Märkte, Firmen und Produkte
- Technik-Themen für ihre berufliche Praxis
- Aktuelle Debatten und Branchentrends
- An 10.000 Entscheider sowie Fach- und Führungskräfte

[www.gwf-gas.de](http://www.gwf-gas.de)

## Gassensoren schützen in der Wasserstoff-Auto-Forschung

Beim Brennstoffzellenauto dient Wasserstoff als Speichermedium, die Zelle erzeugt Strom und der E-Motor sorgt für den Antrieb. Dabei entsteht nur Wasserdampf, aber keinerlei Abgase. Bei der Herstellung von Wasserstoff ist eine Überwachung durch eine Gaswarnanlage unabdingbar. Bei Forschungsarbeiten kann es jederzeit zu Leckagen kommen und katastrophale Schäden im Fall einer Zündung verursachen. Zur erfolgreichen Gasüberwachung mit festgelegten SIL Anforderungen kommt das MSR-Electronic Produkt PolyXeta®2 mit dem innovativen Wechselsensor X-Change zur Anwendung.

Die Wasserstoff-Auto-Forschung gilt als charmante Zukunftsvision. Nicht zuletzt, weil Wasserstoff sauber, sicher und nahezu unbegrenzt verfügbar ist. Tatsächlich ist dieses Element so häufig, dass es über 2/3 aller Materialien auf der Welt ausmacht. Das bedeutet, dass sich H<sub>2</sub> aufgrund seines reichen Vorkommens stets lokal gewinnen lässt.

In der Entwicklungsabteilung für wasserstoffbetriebene Fahrzeuge eines namhaften Automobilherstellers in Baden-Württemberg wird auf hohe Sicherheit geachtet. Dazu wird eine zuverlässige



Das sichere System PolyXeta®2 von MSR-Electronic Foto: © MSR-Electronic GmbH

Überwachung der Gaskonzentration benötigt, um die leichtflüchtigen organischen Wasserstoffmoleküle zu detektieren. Nach einer Fernkalibrierung hochrobuster PolyXeta®2 Sensoren von MSR-Electronic kann somit ein präziser

und stabiler Wasserstoffgehalt in der Luft angezeigt werden. Das Messverfahren mit integrierter Temperatur- und Driftkompensation steht für höchste Genauigkeit und Zuverlässigkeit bei langer Lebensdauer des Sensors. Dieser verfügt über einen Standard-Analogausgang 4-20 mA und zwei Relais mit einstellbaren Schaltschwellen. Im Ernstfall einer Leckage kann somit frühzeitig vor Entstehen einer zündfähigen Gaskonzentration gewarnt und Gegenmaßnahmen eingeleitet werden. Die schrittweise Umrüstung von 190 Transmittern und die Wartung übernimmt in diesem Fall der Partner Gawado Gaswarnsysteme.

MSR-Electronic verfügt über ein breites Spektrum an Methoden für die permanente Detektion von Gasen. Auf dieser Basis entwickelt MSR-Electronic individuelle Gassensoren für industrielle Anwendungen, bei denen extreme Bedingungen herrschen.

### Kontakt:

**MSR-Electronic GmbH**  
**Pocking**  
**Tel.: +49 8531 9004-0**  
**m.kr@msr-group.eu**  
**www.msr-electronic.de**



### Ihr Kontakt zur Redaktion

**Volker Trenkle**

Telefon +49 201 82002-53, Telefax +49 201 82002-40, E-Mail: v.trenkle@vulkan-verlag.de