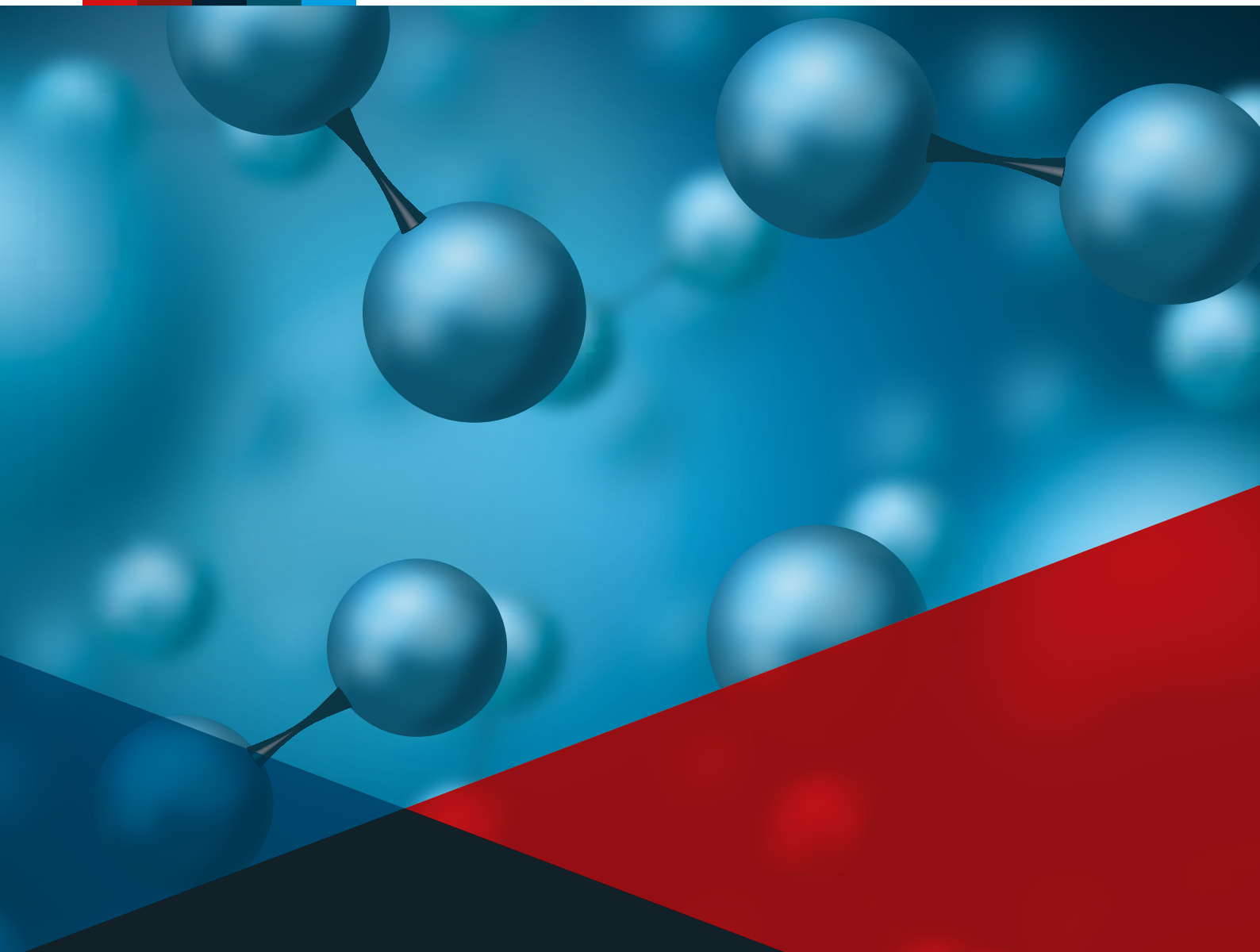


Sicherheit in Technik und Chemie



# WASSERSTOFF

## Unser Beitrag zur Sicherheit

*HYDROGEN*  
*Our contribution to safety*

# VORWORT

## *PREFACE*

Wasserstoff ist ein Schlüsselement für die Energiewende. Als sogenannter grüner Wasserstoff klimaneutral erzeugt, bietet der vielseitige Energieträger große Potenziale, um die CO<sub>2</sub>-Emissionen in Industrie und Verkehr nachhaltig zu senken.

Auch als Speicher und beim Transport des Stroms, den Wasser-, Windkraft- und Solaranlagen erzeugen, kann Wasserstoff zum Einsatz kommen. Er hat damit für den Ausbau der erneuerbaren Energien und die Erreichung der Klimaschutzziele, die sich Deutschland und die EU gesetzt haben, eine zentrale Rolle. Der großtechnische Einsatz des Energieträgers in den genannten Bereichen kann zu einer Wasserstoffindustrie mit großem Innovationspotenzial führen.

Die Bundesregierung will daher strategisch die gesamten Wasserstofftechnologien als Schlüsselemente der Energiewende weiter etablieren und hierfür regelsetzend Märkte erschließen. Dazu sollen die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Wirtschaft in der Wasserstofftechnologie weiter gesteigert und die Wertschöpfungsketten in Deutschland nachhaltig gesichert werden.

Die BAM unterstützt die Bundesregierung und die deutsche Wirtschaft in ihrem Ziel, eine Führungsposition in den Wasserstofftechnologien einzunehmen.

Dafür leisten wir signifikante sicherheits-, chemisch- und materialtechnische Beiträge über die gesamte Wertschöpfungskette hinweg. Wir fördern damit die Innovationskraft Deutschlands im Bereich der erneuerbaren Energien.

Prof. Dr. Ulrich Panne

Präsident der  
Bundesanstalt für Materialforschung  
und -prüfung (BAM)

*Hydrogen is a key element for the energy turnaround. Produced in a climate-neutral way as so-called green hydrogen, this versatile energy source offers great potential for sustainably reducing CO<sub>2</sub> emissions in industry and transport.*

*Hydrogen can also be used to store and transport the electricity generated by water, wind and solar power plants. It therefore plays a central role in the expansion of renewable energies and in achieving the climate protection goals that Germany and the EU have set themselves. The large-scale use of the energy source in the above-mentioned areas can lead to a hydrogen industry with great innovation potential.*

*The Federal Government therefore will continue to strategically establish hydrogen technologies as key elements of the energy turnaround and develop regulatory markets. Thus, it is important to increase the competitiveness of the German industry in hydrogen technologies and ensure its added value chains in the long term.*

*BAM supports the German government and industry in their aim to achieve a leading position in hydrogen technologies. We significantly contribute to all points along the added value chain in terms of safety, chemical and material technologies, thus promoting Germany's innovative strength in the area of renewable energy technologies.*

Prof. Dr. Ulrich Panne,

President of the  
Bundesanstalt für Materialforschung  
und -prüfung (BAM)

# INHALT

## CONTENT

|                                                                                                                                                                               |    |                                                                                                                                                                          |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Sicherheit macht Märkte<br><i>Safety creates markets</i>                                                                                                                      | 6  | Druckgasspeicher – Behördliche<br>Aufgabe und Forschungsschwerpunkt<br>der BAM<br><i>Compressed gas storage vessels –<br/>An official task and research focus at BAM</i> | 19 |
| Wasserstoff – Energieträger der Zukunft<br><i>Hydrogen – the energy source of the future</i>                                                                                  | 8  |                                                                                                                                                                          |    |
| Die vielen Aspekte einer<br>Wasserstofftankstelle<br><i>The many aspects of a hydrogen<br/>filling station</i>                                                                | 10 | Druckgasspeicher – Ressortberatung und<br>Rechtsfortentwicklung<br><i>Compressed gas storage vessels –<br/>Departmental advice and legal development</i>                 | 21 |
| Wasserstofferzeugung – Trennung der<br>Wassermoleküle durch Elektrolyse<br><i>Hydrogen production – Splitting water<br/>molecules through electrolysis</i>                    | 12 | Glasspeicher – ein ungewöhnliches Material<br>für Hochdruckspeicher<br><i>Glass storage vessels – an unusual<br/>material for high pressure storage</i>                  | 23 |
| Wie Energie aus regenerativen Quellen<br>zwischengespeichert werden kann<br><i>How energy from regenerative sources<br/>can be temporarily stored</i>                         | 13 | Prüf- und Messverfahren für<br>Wasserstofftechnologien<br><i>Test and measurement methods<br/>for hydrogen technologies</i>                                              | 25 |
| BAM-Standards schaffen die Grundlagen<br>für marktreife Power-to-Gas-Technologien<br><i>BAM Standards create the Foundations for<br/>Marketable Power-To-Gas Technologies</i> | 14 | Risikoanalyse/Konsequenz-Betrachtung<br><i>Risk analysis/Consequent consideration</i>                                                                                    | 27 |
| Explosionsschutz – Die BAM macht die<br>Nutzung von Gasgemischen sicher<br><i>Explosion Protection – BAM makes<br/>the use of gas mixtures safe</i>                           | 16 | Werkstoffe für Wasserstoff<br><i>Materials for Hydrogen</i>                                                                                                              | 29 |
| Tribologie – Welche Schmierstoffe<br>brauchen wir bei der Nutzung von<br>Wasserstoff?<br><i>Tribology – Which lubricants do<br/>we need when using hydrogen?</i>              | 17 | Wasserstoffabsorption, -diffusion<br>und -messung<br><i>Hydrogen absorption, diffusion<br/>and measurement</i>                                                           | 30 |
|                                                                                                                                                                               |    | Wasserstoffabhängige mechanische<br>Eigenschaften und Rissbildung<br><i>Hydrogen dependent mechanical<br/>properties and cracking</i>                                    | 32 |

|                                                                                                                                                                                              |    |                                                                                                                                                                                          |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Lokalisierung von Wasserstoff durch hochauflösende bildgebende Verfahren<br><i>Localization of hydrogen by high-resolution imaging techniques</i>                                            | 34 | Projekt Wasserstoffspeicher – Neuartige Speichermaterialien für Wasserstofftankstellen<br><i>Project Hydrogen Storage Tanks – Novel storage materials for hydrogen filling stations</i>  | 47 |
| Selbstheilung von Rissen in Dichtungen von Hochtemperatur-Brennstoffzellen<br><i>Self-healing of cracks in seals of high temperature fuel cells</i>                                          | 36 | Langfristige und kontinuierliche Forschung für die Sicherheit – Abgeschlossene Wasserstoff-Projekte<br><i>Long-term and continuous research for safety – Completed hydrogen projects</i> | 50 |
| Projekt MefHySto – Metrologie für fortschrittliche Wasserstoffspeicherlösungen<br><i>Project MefHySto – Metrology for Advanced Hydrogen Storage Solutions</i>                                | 38 | Prüfeinrichtungen, Prüftechnik<br><i>Testing Equipment and Facilities</i>                                                                                                                | 54 |
| Tiefbohrlöcher noch sicherer durch Faseroptische Sensorik<br><i>Deep boreholes safer thanks to fiber optic sensors</i>                                                                       | 40 |                                                                                                                                                                                          |    |
| Projekt DELFIN – Wie man Wasserstoffspeicher leichter und sicherer macht<br><i>Project DELFIN – How to make the storage of hydrogen safer and easier</i>                                     | 41 |                                                                                                                                                                                          |    |
| Projekt TAHYA – Mit Carbonfasern zu besonders effizienten und sicheren Wasserstofftanks<br><i>Project Tahya – Using carbon fibres to make particularly efficient and safe hydrogen tanks</i> | 43 |                                                                                                                                                                                          |    |
| Projekt GW4SHM – Strukturüberwachung für Wasserstoff-Drucktanks<br><i>Project GW4SHM – Structural Health Monitoring for Hydrogen pressure vessels</i>                                        | 45 |                                                                                                                                                                                          |    |

# SICHERHEIT MACHT MÄRKTE

*SAFETY CREATES MARKETS*

Verantwortungsvoller technologischer Wandel ist ein Garant für den Wohlstand unserer Gesellschaft. Neue Technologien sind die Basis für die erfolgreiche Weiterentwicklung des Wirtschaftsstandortes Deutschland und für eine Wertschöpfung in globalen Märkten. Die nachhaltige Sicherheit neuer Technologien schafft das Vertrauen von Bürger\*innen in den Wandel und sichert unsere Zukunft.

In den Spitzen- und Schlüsseltechnologien Materialwissenschaft, Werkstofftechnik und Chemie leistet die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) einen entscheidenden Beitrag zur technischen Sicherheit von Produkten, Prozessen und der Lebens- und Arbeitswelt der Menschen. Dazu forschen, prüfen und beraten wir mit unserer fachlichen Kompetenz und langjährigen Erfahrung an den Schnittstellen von Wissenschaft, Technik, Wirtschaft und Politik.

Als Kompetenzzentrum „Sicherheit in Technik und Chemie“ leisten wir einen entscheidenden Beitrag zur Entwicklung der deutschen Wirtschaft. Sicherheit macht Märkte.

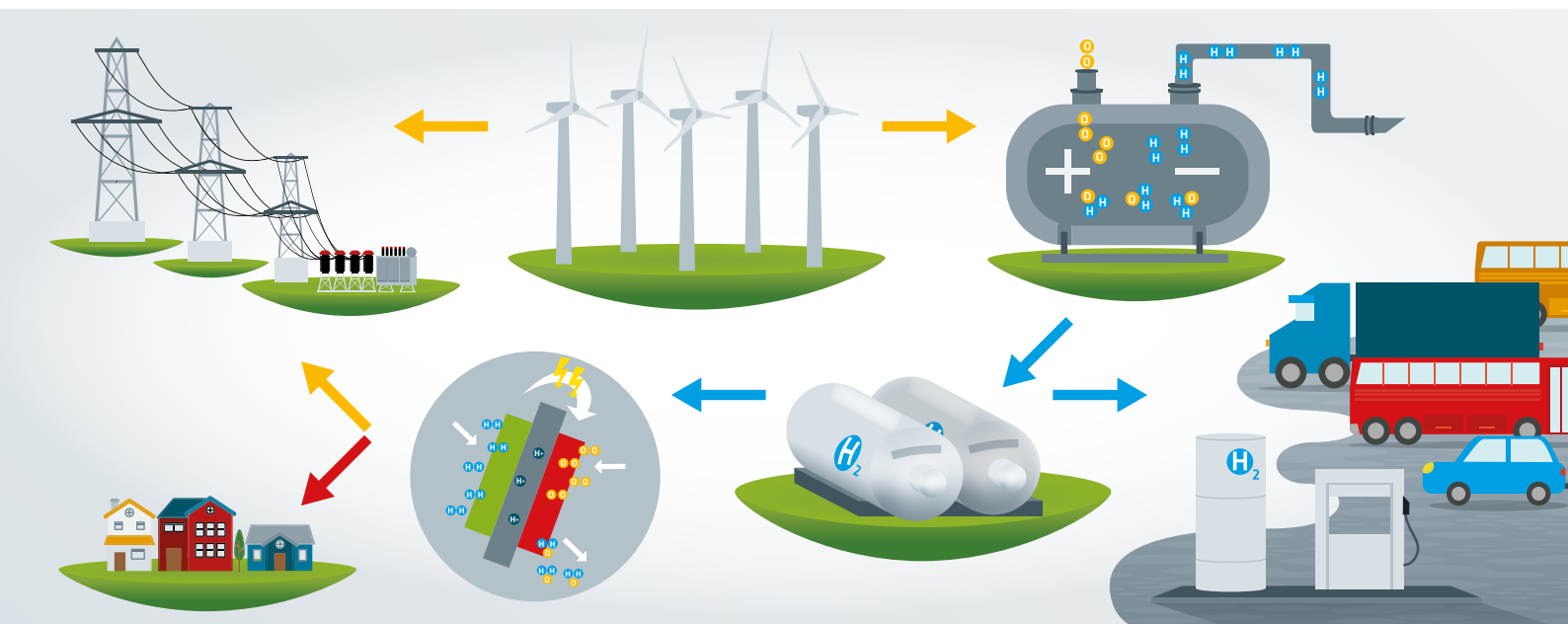
*Responsible technological change helps guarantee our society's prosperity. And new technologies are key to Germany's status as a top business location. But the long-term safety of new technologies is also essential to build public trust in change and safeguard our future.*

*By working at the cutting edges of materials science, materials engineering and chemistry, the Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) makes a crucial contribution to the technical safety of products, processes and to people's life and work. For this purpose, we carry out research, perform tests and provide advice based on our technical expertise and many years of experience at the interfaces of science, technology, industry and politics.*

*As a centre of excellence for safety in technology and chemistry, we make a significant contribution to the development of German industry. Safety creates markets.*

# WASSERSTOFF – Energieträger der Zukunft

*HYDROGEN –  
the energy source of the future*



■ Strom  
■ Wasserstoff  
■ Fernwärme

Als Energieträger kann Wasserstoff mit Hilfe von Brennstoffzellen in Elektrizität umgewandelt werden, um direkt in das vorhandene Stromnetz eingespeist zu werden oder um Elektromotoren anzutreiben. Als „Abgas“ entsteht lediglich Wasserdampf.

Wasserstoff bietet sich schon jetzt als Energiespeicher an, um Überschussenergien aus Solar- und Windkraft zu speichern: Durch Elektrolyse wird aus Wasser Wasserstoff gewonnen (POWER-to-GAS). Dieser kann dann gespeichert und später wieder rückverstromt oder direkt zum Betanken von Wasserstoff-Fahrzeugen verwendet werden. Der große Vorteil von Wasserstoff in Gasspeichern liegt in der gegenüber Batterien deutlich höheren Energiedichte, was in Fahrzeugen zu deutlich größeren Reichweiten führt.

Wissenschaftler\*innen der BAM sorgen durch ihre Expertise in Forschung und Zulassung dafür, dass die Sicherheit im Fahrzeug, während des Transportes und beim Umgang mit Wasserstoff gewährleistet werden kann.

Die BAM ist nahezu über die gesamte Wertschöpfungskette hinweg wissenschaftlich tätig. So reicht ihr Leistungsangebot im Rahmen der sicherheitstechnischen Bewertung und Weiterentwicklung von Wasserstofftechnologien von der Wasserstoffherzeugung über die fortschrittliche Speicherung von Wasserstoff bis hin zum Transport zum Endverbraucher und der Nutzung.

Um potenzielle Risiken frühzeitig erkennen zu können, werden diese Aktivitäten proaktiv durch die sicherheitstechnischen Beurteilungen von Wasserstoffgasgemischen und durch Risikoanalysen unterstützt. Komplettiert wird das Spektrum der BAM durch Untersuchungen zum Verhalten wasserstoffführender metallischer Komponenten über die Analytik zur Absorption, Permeation und Akkumulation von Wasserstoff in Werkstoffen über die Reinheit von Gasen bis hin zur Gasanalyse und -sensorik im Falle unbeabsichtigter Gasaustritte.

*As an energy source, hydrogen can be converted into electricity with the help of fuel cells. This electricity can then be fed directly into the existing power grid or used to drive electric motors. Water vapour is the only 'exhaust gas' produced.*

*Hydrogen is already a viable means of energy storage for excess solar and wind power: hydrogen can be gained from water by means of electrolysis (power-to-gas).*

*Hydrogen can be stored and later reconverted into electricity, or directly used to refuel hydrogen vehicles. The greatest advantage of using hydrogen in gas storage units is its significantly higher energy density compared to batteries, allowing vehicles to cover significantly greater distances.*

*BAM scientists use their research expertise and approval to ensure that safety in the vehicle is guaranteed both during transport and when hydrogen is being handled.*

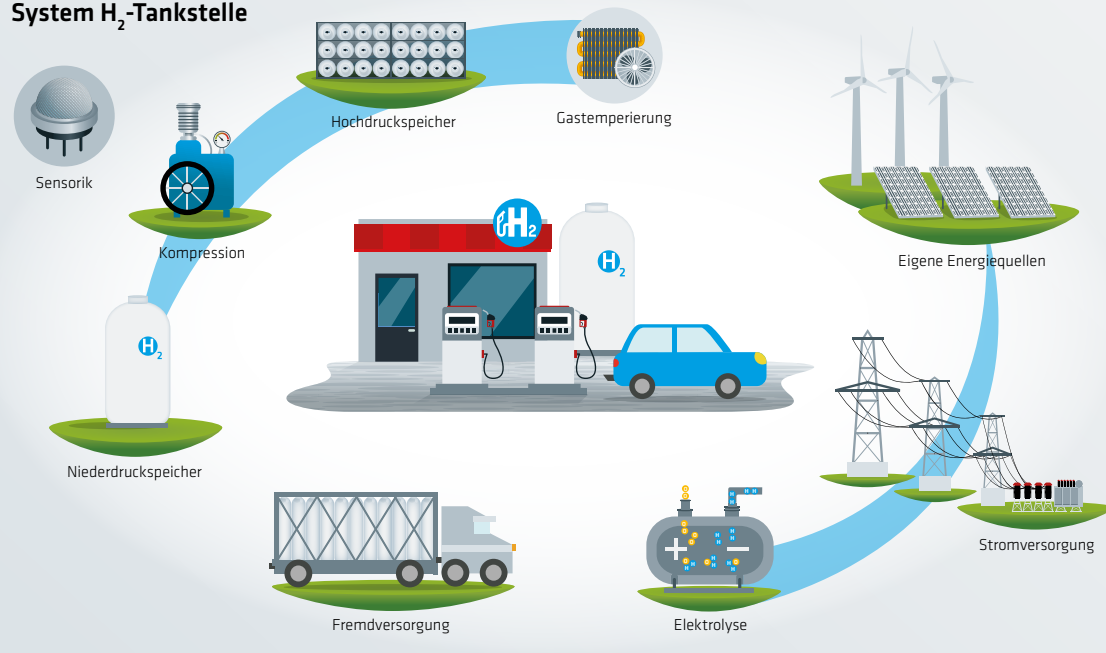
*BAM is scientifically active along almost the entire value chain; from safe and efficient hydrogen production to the (temporary) storage of hydrogen in compressed gas storage tanks and transport – by means of a trailer vehicle, for example – to the end consumer.*

*In order to be able to identify potential risks at an early stage, these activities are proactively supported by safety assessment of hydrogenous gas mixtures and by risk analyses. BAM's spectrum is completed by investigations on the behaviour of hydrogen-carrying metallic components, analysis of the absorption, permeation and accumulation of hydrogen in materials, gas purity and gas analysis and sensor technology in case of unintentional gas leakage.*

# DIE VIELEN ASPEKTE EINES WASSERSTOFFTANKSTELLE

## THE MANY ASPECTS OF A HYDROGEN FILLING STATION

### System H<sub>2</sub>-Tankstelle



*Die vernetzte Wasserstoff-tankstelle: Erzeugung, Lagerung und Verteilung von klimaneutralem „grünen Wasserstoff“*

*The networked hydrogen filling station: production, storage and distribution of climate-neutral „green hydrogen“*

Die Bundesregierung fördert den Aufbau eines Tankstellennetzes als wichtigen Bestandteil einer zu schaffenden Versorgungsinfrastruktur für Wasserstoff. Denn ein dichtes, verlässliches Netz ist essenziell für eine breite Akzeptanz der Nutzung von Wasserstofffahrzeugen.

Die Wasserstofftankstelle ist dabei zentraler Baustein eines Gesamtsystems, in welchem mehrere technische Komponenten zusammenwirken, vom Elektrolyseur über die Kompressoren bis zu den Hochdruck-Pufferspeichern. Sogar eine Brennstoffzelle zur Eigenversorgung kann dazukommen. All diese Komponenten müssen sicher sein – im Transport, bei Annahme und Speicherung in Lagertanks oder an der Schnittstelle zum Fahrzeug. Die in der BAM vereinten Disziplinen decken nahezu alle sicherheitstechnischen Fragestellungen ab. Dabei ist allen klar, dass betreibende Unternehmen und Kund\*innen durchaus unterschiedliche Prioritäten setzen.

Betreibende Unternehmen von Wasserstofftankstellen wollen die Tankstelleninfrastruktur wirtschaftlich, sicher und verlässlich aufgesetzt wissen und erhoffen sich von der Energiewende mittelfristig einen wirtschaftlichen Erfolg. Für die tankenden Kund\*innen ist dagegen die ständige Verfügbarkeit im noch sehr dünnen Tankstellennetz von vorrangiger Bedeutung. Das deutsche Wasserstoff-Tankstellennetz soll bis Ende 2021 eine ausreichende Kapazität für 60.000 Pkw und 500 Nutzfahrzeuge bereitstellen.

Nicht zu vernachlässigen ist auch die Qualität des Wasserstoffs, um Schäden z. B. an der Brennstoffzelle auszuschließen. Überhaupt ist die Frage der Sicherheit der zentrale Aspekt für die nachhaltige gesellschaftliche Akzeptanz der Technologien. Und Sicherheit ist die Kernkompetenz der BAM, die im Bereich Wasserstoff sowohl forscht als auch zahlreiche Dienstleistungen anbietet: Die BAM führt Zulassungsprüfungen durch

und ermittelt die Lebensdauer von Wasserstoffspeichern zur Vermeidung von Gasaustritt, sie bietet zerstörungsfreie Prüfverfahren zur Überwachung von Bauteilen an, hilft im Explosionsschutz mit H<sub>2</sub>-Sensoren unerwünschte Reaktionen zu vermeiden und überprüft das sichere Zusammenspiel der Komponenten für belastbare Sicherheitskonzepte.

In ihrer Arbeit setzt die BAM auf eine umfassende Digitalisierung. Dies gilt insbesondere für die Online-Überwachung der Anlagen, um deren Lebensdauer zu maximieren – oft als „Structural Health Monitoring“ bezeichnet.

Unter dem Aspekt der Digitalisierung muss auch die Qualitätsinfrastruktur (QI), die auf dem Zusammenspiel von Normung und Standardisierung, Metrologie, Akkreditierung, Konformitätsbewertung und Marktüberwachung basiert, neu gedacht werden. Durch den digitalen Wandel entstehen kontinuierlich neue Produkte und Prozesse, welche angepasste Maßnahmen zur Qualitätssicherung und somit die Entwicklung einer QI-Digital erfordern. So arbeitet die BAM auch im Zusammenhang mit der digitalen Wasserstofftankstelle an der Entwicklung einer digitalisierten QI.

The Federal Government supports the development of a filling station network for years as an important component of a hydrogen supply infrastructure to be created. This is because a dense, reliable network of filling stations is essential for broad acceptance of the use of hydrogen vehicles.

The hydrogen filling station is the central element of an overall system. In each station several technical components work together, from the electrolyser to the compressors and the high-pressure buffer storage tanks. Even a fuel cell for self-supply can be added. All these components must be safe – whether in transport, during receipt and storage in storage tanks or at the

interface to the vehicle. The disciplines combined in BAM cover almost all safety issues. It is clear to everyone that operators and customers have different priorities.

Operators of hydrogen filling stations want the filling station infrastructure to be economical, safe and reliable and hope that the energy turnaround will lead to economic success in the medium term. On the other hand, for customers filling up their vehicle, permanent availability in the currently very thin station network is of primary importance. The German hydrogen filling station network should provide capacity for 60,000 cars and 500 commercial vehicles by the end of 2021. Finally, the quality of the hydrogen should not be neglected in order to rule out damage to the fuel cell. In general, the question of safety is the central aspect for sustainable social acceptance of the technologies. And safety is the core competence of BAM, which both conducts research and offers numerous services in the field of hydrogen: BAM carries out approval tests and determines the service life of hydrogen storage tanks to prevent gas leakage, it offers non-destructive test methods for monitoring components, helps to avoid undesired reactions in explosion protection with H<sub>2</sub> sensors and checks the safe interaction of components for resilient safety concepts.

In its work, BAM relies on comprehensive digitalization. This applies in particular to the online monitoring of plants to maximize their service life – often referred to as „Structural Health Monitoring“.

From the point of view of digitalization, the quality infrastructure (QI) based on the interaction between standardisation, metrology, accreditation, conformity assessment and market surveillance must also be rethought. The digital change continuously creates new products and processes which require adapted measures for quality assurance and thus the development of a QI digital. Thus BAM is also working on the development of a digitalised QI in connection with the digital hydrogen filling station.

#### KONTAKT/CONTACT

Dr. rer. nat. Kai Holtappels  
Kai.Holtappels@bam.de

Konstruktiver Brand- und Explosionsschutz Gase  
Constructive Fire and Explosion Safety for Gases



© Michael Danner

#### KONTAKT/CONTACT

Dr.-Ing. Georg W. Mair  
Georg.Mair@bam.de

Sicherheit von Gasspeichern  
Safety of Gas Storage Systems



# WASSERSTOFFERZEUGUNG

## Trennung der Wassermoleküle durch Elektrolyse

### *HYDROGEN PRODUCTION*

#### *Splitting water molecules through electrolysis*

Eine Möglichkeit, in großem Maßstab Wasserstoff zu erzeugen, liegt in der Elektrolyse. Bei der Elektrolyse von Wasser werden durch elektrische Energie Wassermoleküle ( $\text{H}_2\text{O}$ ) zu molekularem Wasserstoff ( $\text{H}_2$ ) und Sauerstoff ( $\text{O}_2$ ) gespalten (POWER-to-GAS). Dabei wird ein großer Teil der benötigten elektrischen Energie in chemische Energie umgewandelt. Der erzeugte Wasserstoff lässt sich speichern oder bis zu einem gewissen Umfang in das bestehende Erdgasnetz einspeisen. Mit dieser Methode lässt sich Energie leicht (zwischen-)speichern und transportieren.

Über Brennstoffzellen ist dann eine Rückumwandlung der chemischen Energie in elektrische Energie jederzeit möglich.

Die BAM befasst sich bei der Entwicklung neuer Technologien zur Wasserelektrolyse vorrangig mit dem sicheren Betrieb der Elektrolyseure. Die Entwicklung zu energetisch günstigen Hochdrucksystemen erfordert die genaue Kenntnis der Druck- und Temperaturabhängigkeit von Explosionsgrenzen des Wasserstoff-Sauerstoff-Systems sowie Kenntnisse über Permeations- und Leckraten. Die Betriebsparameter der Elektrolyseure müssen sich stets im sicheren Bereich befinden, um z. B. gefährliche Verunreinigungen des Wasserstoffs durch Sauerstoff zu vermeiden.

One method for large-scale hydrogen production is electrolysis. During the electrolysis of water, electrical energy is used to split water molecules ( $\text{H}_2\text{O}$ ) into molecular hydrogen ( $\text{H}_2$ ) and oxygen ( $\text{O}_2$ ) (power-to-gas). A large portion of the electrical energy required is converted into chemical energy. The hydrogen produced can either be stored or fed into the existing natural gas network to a certain level. With this method, energy can be temporarily stored and transported with little effort. A reconversion of the chemical energy into electrical energy is possible at any time using fuel cells.

BAM primarily works on the safe operation of electrolyzers when developing new technologies for water electrolysis. The development of energy-efficient high-pressure systems requires precise knowledge of the pressure and temperature dependencies of the hydrogen-oxygen system explosion limits, as well as knowledge of permeation and leakage rates. The operational parameters of electrolyzers must always be within a safe range in order to avoid dangerous contamination of the hydrogen by oxygen.



#### KONTAKT/CONTACT

Dr.-Ing. Enis Askar  
Enis.Askar@bam.de

Explosionsschutz Gase, Stäube  
Explosion Protection Gases and Dusts

# Wie Energie aus regenerativen Quellen zwischengespeichert werden kann

*How energy from regenerative sources can be temporarily stored*

Ein besonderes Problem beim Einsatz der erneuerbaren Energien ist ihre Speicherung im großen Maßstab. Viele der bekannten Speicher, wie z.B. Batterien, können nur vergleichsweise wenig Energie speichern. Andere Anlagen, wie etwa Pumpspeicherwerke, stehen nur begrenzt zur Verfügung. Eine technisch realisierbare Lösung mit nahezu unbegrenzter Speicherkapazität ist das Power-to-Gas-Verfahren (P2G) mit anschließender Einspeisung von Wasserstoff ins Erdgasnetz. Bei P2G wird elektrische Energie aus Wind- oder Solarstrom zur Elektrolyse von Wasser genutzt und dadurch Wasserstoff gewonnen. Damit lässt sich Energie aus regenerativen Quellen immer dann speichern, wenn mehr produziert als aktuell benötigt wird. Der so gewonnene Wasserstoff kann bei Bedarf rückverstromt werden.

---

One particular problem for utilising renewable energies is the large-scale storage of the energy. Many of the known storage mediums, such as batteries, store relatively little energy. The availability of other

*Arbeiten an einer Rohrleitung für einen Gas-Explosionsversuch*

*BAM employees prepare a pipe for a gas explosion test*



systems, such as pumped storage plants, are very limited. A technically viable solution with virtually unlimited storage capacity is the power-to-gas process (P2G) whereby the hydrogen is subsequently fed into the natural gas grid. During the P2G process, electrical energy from wind or solar power is used to electrolyse water, thereby producing hydrogen. This allows energy from renewable sources to be stored when more is produced than is currently required. The hydrogen produced can be reconverted into electricity when needed.

## KONTAKT/CONTACT

Dr. rer. nat. Kai Holtappels  
Kai.Holtappels@bam.de

Konstruktiver Brand- und Explosionsschutz Gase  
Constructive Fire and Explosion Safety for Gases



© Michael Danner

# BAM-Standards schaffen die Grundlagen für marktreife Power-to-Gas-Technologien

## *BAM Standards create the Foundations for Marketable Power-To-Gas Technologies*

Um Wasserstoff zu speichern und über größere Distanzen zu transportieren, kann er in das Erdgasnetz eingespeist werden. Dabei entstehen wasserstoffhaltige Erdgasgemische mit Wasserstoffanteilen bis in den unteren zweistelligen Prozentbereich. Die BAM ist dafür zuständig, die sogenannten „nationale Normale“ der Gaszusammensetzung zu realisieren. Darunter versteht man einen festen Vergleichswert, der für Messungen als Ankerpunkt verwendet wird. Insbesondere ist die BAM für Kalibriergase bezüglich Brennwert- und Gasbeschaffenheit sowie für Automobilabgase verantwortlich.

Bei handelsüblichen Erdgasgemischen werden bis zu 17 Komponenten erfasst. Mit Erdgasgemischen, die diese Komponenten in bekannten Stoffmengenanteilen enthalten, werden Prozess-Gaschromatographen für jede der zu messenden Komponente kalibriert, um beispielsweise den Brennwert von Gasmischungen online zu messen. Die BAM hält die „Urmeter“ für diese Spezialgase. Für die wasserstoffhaltigen Erdgasgemische hat die BAM in den letzten Jahren einige Mischungen aufgelegt, die den Standard für künftige Power-to-Gas-Technologien setzen. So ist die BAM mit den Kolleg\*innen vom Nationalen Metrologischen Institut der Niederlande (VSL) gemeinsamer Ausrichter eines groß angelegten internationalen Ringversuchs für die Zusammensetzung von zwei solcher Erdgasgemische mit je ca. 20 Gaszylindern.

Industrielle Anwender und Zertifizierungsstellen entwickeln, eigene sogenannte Sekundärnormale, die sich an dem von der BAM vorgegebenen Standard orientieren. In der Regel liefern die Kund\*innen nach Vereinbarung ihre Gasstandards an. Die BAM zertifiziert diese Gase anhand der jeweils geforderten Vorschriften unter Anwendung geeigneter analytischer Methoden (in der Regel Gaschromatographie). Wenn die Zertifizierung durch die BAM die tolerierte Zusammensetzung in der geforderten Messunsicherheit bestätigt hat, wird ein amtliches Zertifikat ausgestellt.

Das Qualitätsmanagementsystem ermöglicht den Anwendern die Pflege eines eigenen technisch-wissenschaftlichen gasanalytischen Wissens zur Herstellung von hochwertigen Sondergasen mit genau bekannter Messunsicherheit. Die Messfähigkeit der Anwender steht dabei den metrologischen Staatsinstituten vielfach technisch kaum nach. Eine Reihe von Anwendern ist zur Herstellung von Gasnormalen akkreditiert. Diese Vorgehensweise gibt den deutschen und europäischen Anwendern langfristig die nötige Flexibilität für den Markt und sichert die Qualität der von den Endverbraucher\*innen benötigten Gase und damit den lokalen Wettbewerbsvorteil, da andere Nationen eher marktabschottende Vorgehensweisen pflegen.

Neben den wasserstoffhaltigen Erdgasgemischen spielt die tatsächliche Reinheit von ‚reinem‘ Wasserstoff eine Rolle. Insbesondere Polymerelektrolytbrennstoffzellen sind sehr empfindlich bezüglich Vergiftung durch im Wasserstoff vorkommende Verunreinigungen. Die BAM arbeitet und investiert in die Implementierung der Norm ISO 14687:2019, die für eine Vielzahl von Verunreinigungen Obergrenzen bei sehr kleinen Gehalten festlegt. Neben Know-how braucht es dafür insbesondere geeignete Geräte und verlässliche Kalibriergase.

---

To store and transport hydrogen over long distances, it can be fed into the natural gas grid. This produces hydrogen-containing natural gas mixtures with hydrogen contents in the lower double-digit percentage range. BAM is responsible for implementing the so-called „national standards“ for gas composition. This is a fixed reference value which is used as an anchor point for measurements. BAM is responsible for gas standards with regard to calorific value and gas composition as well as for automotive exhaust gases.

For commercially available natural gas mixtures, up to 17 components are covered. With natural gas mixtures containing these components in known amount fractions, process gas chromatographs are calibrated for each of the individual components of interest, for example to measure the calorific value of gas mixtures online. BAM holds the national primary standards for these special gases. In recent years, BAM has developed several mixtures for the hydrogen-containing natural gas mixtures which set the standard for future power-to-gas technologies. For example, BAM, together with its colleagues from the Dutch Metrology Institute (VSL), is the joint organizer of a large-scale international interlaboratory comparison for the composition of two such natural gas mixtures with about 20 gas cylinders each, which are currently being investigated worldwide.

Industrial customers and certification bodies develop their own so-called secondary standards which are based on the standard specified by BAM. Normally, customers supply their gas standards by agreement. BAM certifies these gases based on the respectively required regulations using suitable analytical methods (usually gas chromatography). When the certification has confirmed the tolerated composition in the required measurement uncertainty, an official certificate is issued.



The quality management system enables users to maintain their own technical and scientific gas analytical knowledge to produce high-quality special gases with precisely known measurement uncertainty. In many cases, the measuring capability of the users is technically in no way behind that of the national metrology institutes. Several users are accredited to produce gas standards. This approach gives German and European users the necessary flexibility for the market in the long term and ensures the quality of the gases required by the end user and thus the local competitive advantage, as some other nations tend to adopt market exclusionary approaches.

In addition to natural gas mixtures containing hydrogen, the actual purity of 'pure' hydrogen plays a role. Polymer electrolyte fuel cells are very sensitive to poisoning by impurities found in hydrogen. BAM is working and investing in the implementation of the ISO 14687:2019 standard, which sets upper limits for many impurities at very low contents. In addition to know-how, this requires a broad range of equipment and reliable calibration gases.

*Eines von mehreren explosionsgeschützten Gasflaschenlagern für Primärnormale der BAM in Berlin-Adlershof. Die Gasflaschen werden unter kontrollierten Bedingungen gelagert und nicht aus dem Haus gegeben.*

*One of the several explosion-proof gas cylinder storage systems for BAM's primary standards in Berlin Adlershof. The gas cylinders are stored under controlled conditions and are not removed from the premises.*

#### KONTAKT/CONTACT

Dr. rer. nat. Heinrich Kipphardt  
Heinrich.Kipphardt@bam.de

Prozessanalytik  
Process Analytical Technology



# EXPLOSIONSSCHUTZ – Die BAM macht die Nutzung von Gasgemischen sicher

*EXPLOSION PROTECTION – BAM makes the use of gas mixtures safe*



Der sichere Umgang mit Wasserstoff setzt geeignete Maßnahmen für den Explosionsschutz voraus. Dazu müssen sicherheitstechnische Kenngrößen, wie z. B. Explosionsgrenzen, Zündtemperaturen oder Explosionsdrücke bekannt sein. Deshalb untersucht die BAM sicherheitstechnische Eigenschaften von wasserstoffhaltigen Gasgemischen unter prozessnahen Bedingungen auch bei hohen Drücken und Temperaturen experimentell und entwickelt Prüfmethoden weiter. Für die Abschätzung von sicherheitstechnischen Kenngrößen setzt die BAM auch Berechnungsmethoden ein und entwickelt sie ebenfalls weiter. Die BAM unterstützt Anwender mit sicherheitstechnischen Beurteilungen der Gasgemische und bringt ihre Erfahrungen u. a. bei der Erarbeitung von Normen und technischen Regelwerken ein.



Bis zu zehn Prozent Wasserstoff können derzeit dem Erdgas im Erdgasnetz beigemischt werden. Durch die Einspeisung von Wasserstoff in das Erdgasnetz ändern sich die Stoffeigenschaften der Gasgemische (Brennwert, Dichte, Wobbe-Index, Diffusionskoeffizient) und ihre sicherheitstechnischen Kenngrößen (Explosionsgrenzen, Explosionsdrücke, Flammgeschwindigkeit etc.). Deren genaue Kenntnis ist jedoch für den Explosionsschutz unerlässlich.



*Auswahl wirksamer Zündquellen für Wasserstoffexplosionen: Hochspannungsfunke, Lichtbogen, Glühdraht*

*Selection of effective ignition sources for hydrogen explosions: High voltage spark, lightning arc, glowing wire*

Safe handling of hydrogen requires appropriate explosion protection measures. For this purpose, it is important that safety-related properties, such as explosion limits, ignition temperatures and explosion pressures, are known. BAM is therefore investigating the safety-related properties of hydrogenous gas mixtures experimentally under process conditions – even under high pressures and at high temperatures – and is further developing testing methods. BAM is also involved in the estimation of safety-related properties, establishing calculation methods and their further development. BAM supports users with safety assessments of gas mixtures and contributes its expertise in numerous ways, including to the processing of standards and technical regulations.

Up to ten percent hydrogen may be added to the natural gas in the natural gas network. This admixture changes the substance properties of natural gas (heating value, density, Wobbe Index, diffusion coefficient) and its safety-related properties (explosion limits, explosion pressures, flame speed, etc.). It is, however, crucial for explosion protection to possess precise knowledge of these properties.



## KONTAKT/CONTACT

Dr.-Ing. Enis Askar  
Enis.Askar@bam.de

Explosionsschutz Gase, Stäube  
Explosion Protection Gases and Dusts

# TRIBOLOGIE – Welche Schmierstoffe brauchen wir bei der Nutzung von Wasserstoff?

## *TRIBOLOGY – Which lubricants do we need when using hydrogen?*

Der Oberbegriff „Tribologie“ fasst das Gesamtgebiet von Reibung, Verschleiß und Schmierung zusammen. Beispiele für tribologisch beanspruchte Bauteile sind Lager, Kolbenringe, Dichtungen und Gelenke. Wasserstoffumgebung stellt besondere Anforderungen an derartige Bauteile, da z.B. bei metallischen Werkstoffen einmal abgeriebene, ursprünglich schützende Oxidschichten nicht mehr erneuert werden. Das kann zu erhöhtem Verschleiß führen. Derartige Frischflächen begünstigen zudem das Eindringen von Wasserstoff in Metalle, was deren mechanische Eigenschaften erheblich verschlechtern kann (s. Kapitel „Werkstoffe für Wasserstoff“, S. 29). Zudem wird, um Volumen zu sparen, Wasserstoff für den Langstreckentransport häufig verflüssigt und muss dafür auf -253 °C gekühlt werden. Für bewegliche Bauteile stellt dies eine besondere Herausforderung dar, da diese Temperatur weit unter den Erstarrungspunkten herkömmlicher Schmieröle und -fette liegt. Aber auch für den Einsatz als Gas, z.B. für den Betrieb von Brennstoffzellen, welches eine besonders hohe Reinheit erfordert, ist die Auswahl an möglichen Schmierstoffen stark einengt.

Die BAM verfügt über spezielle Versuchsapparaturen, um Reibungs- und Verschleißkenngrößen in flüssigem und gasförmigem Wasserstoff zu ermitteln.

Aktuell werden hauptsächlich polymere Verbundwerkstoffe sowie reibungsmindernde, verschleißbeständige Beschichtungen untersucht. Für die praktische Anwendung lassen sich in denselben Apparaturen aber auch Bauteile wie z.B. Kugellager testen. Außerdem steht eine Pumpe für Flüssigwasserstoff zur Verfügung, in der u.a. Werkstoffe für Kolbendichtungen unter Realbedingungen getestet werden können.

Die bisherigen Ergebnisse zeigen, dass einige Materialien in Wasserstoff, sogar in tiefkalt verflüssigter Form, günstigere Eigenschaften aufweisen als an Luft. Dies

sind z.B. einige Hochleistungskunststoffe in reiner Form oder als Komponenten von Verbundwerkstoffen. Auch Festschmierstoffe wie etwa Graphit oder Molybdädisulfid – ob als dünne Beschichtung oder als Beimischung zu Kompositwerkstoffen – haben sich als gut geeignet erwiesen. Bei den Beschichtungen sind solche aus amorphem diamantartigem Kohlenstoff besonders interessant, da sie teilweise sogar Reibungszahlen und eine Lebensdauer im Bereich von fett- oder ölgeschmierten Systemen erreichen.

Aus dem Bereich der Metalle wurden austenitische Edelstähle untersucht, die standardmäßig für Behälter und Rohrleitungen eingesetzt werden, da sie als unkritisch gegen wasserstoffbedingte Degradation gelten. In Reibsystemen wurden jedoch Gefügeumwandlungen nachgewiesen, die dann wieder Rissbildung zur Folge hatten.

---

The generic term “tribology” comprises the entire field of friction, wear and lubrication. Examples for tribologically stressed components are bearings, piston rings, seals and joints. Hydrogen environment causes particular requirements for such components, because e.g. protective oxide layers on metallic materials are not renewed after wearing out which in turn gives rise to further increased wear. Such juvenile surfaces also enhance the penetration of hydrogen into metals what can be detrimental for their mechanical properties (see Chapter “Materials for Hydrogen”, p. 29). Furthermore, in order to save volume, hydrogen is often liquefied for long-distance transport which requires cooling to -253 °C. This is a challenge for moving components, as this temperature is far below the solidification points of conventional lubricating oils and greases. But also, in the utilization as a gas the

selection of applicable lubricants is limited. An example is the operation of fuel cells which demands very high gas purity.

BAM operates special test rigs for determining friction and wear data in liquid and gaseous hydrogen.

Currently, mainly polymer composite materials and wear-resistant, anti-friction coatings are investigated. For practical application, also components such as ball bearings can be tested in the same devices. Furthermore, a pump for liquid hydrogen is available, in which e.g. materials for piston seals can be investigated under real conditions.

The results have revealed that several materials in hydrogen – even in cryogenic liquefied form – exhibit

more favorable properties than in air. Examples of such materials are high performance polymers, in pure form or as components in composites. Solid lubricants, such as graphite or molybdenum disulphide, applied as thin coatings or admixture in composite materials, have also proven to be well-suited. Within the coatings amorphous diamondlike carbon is of particular interest, because some variants exhibit friction coefficients and lifetimes in the range of grease- or oil-lubricated systems.

From the field of metals, austenitic stainless steels have been investigated, because they are widely used for containers and tubes and usually assumed to be insensitive to hydrogen induced degradation. However, in friction systems structural changes were detected, which in turn resulted in crack formation.



*Probeneinbau und -justage für eine Reibungsmessung in flüssigem Wasserstoff*

*Sample mounting and adjustment to measure friction in liquid hydrogen*



#### **KONTAKT/CONTACT**

Dr. rer. nat. Thomas Gradt  
Thomas.Gradt@bam.de

Makro-Tribologie und Verschleisschutz  
Macrotribology and Wear Protection

# DRUCKGASSPEICHER – Behördliche Aufgabe und Forschungsschwerpunkt der BAM

## *COMPRESSED GAS STORAGE VESSELS – An official task and research focus at BAM*

Wasserstoff wird derzeit überwiegend gasförmig und aus Gewichtsgründen meist in Druckbehältern aus Faserverbundwerkstoffen gespeichert. Zur Erzielung möglichst hoher Speicherdichten, die für große Reichweiten von Wasserstofffahrzeugen notwendig sind, wird der Wasserstoff in der Regel unter sehr hohen Drücken gespeichert.

Druckbehälter müssen so ausgelegt werden, dass sie die vielfältigen Belastungen, die in ihrem Betriebsleben auftreten können, sicher überstehen. Zu diesem Zweck müssen Druckbehälter schon vor ihrem ersten Einsatz und später im Betrieb aufwendigen Prüfungen unterzogen werden.

Zu diesen Prüfungen zählen neben Innendruckbelastungen bei sehr hohen und tiefen Temperaturen auch Brand- oder Fallprüfungen, Säuretests oder auch Durchstoßprüfungen.

Ziel ist es, dass die Behälter selbst bei maximalen Betriebsbelastungen sicher bleiben und es nicht zu Gefahrensituationen kommt.

Die BAM erfüllt auf diesem Gebiet behördliche Aufgaben, zu denen neben der Zulassung dieser Druckgefäße für den See- und Luftverkehr auch die Erstellung von Rechtsnormen und technischen Regelwerken gehört.

Zusätzlich forscht die BAM schon seit Jahren zur Sicherheit von Druckbehältern, insbesondere an Druckbehältern aus Faserverbundwerkstoffen. Zu den Forschungsschwerpunkten gehören die Lebensdauerüberwachung und Untersuchung von Alterungsprozessen, die (Weiter-)Entwicklung bestehender und alternativer Zulassungs- und Prüfmethoden, aber auch die Untersuchung möglicher Unfallszenarien.

Auch in der Prüfung von Druckbehältern hat die BAM eine hohe Expertise. Sei es bei der Durchführung von hydraulischen Innendruckprüfungen wie Lastwechsel-, Berst- oder Zeitstandprüfungen, aber auch bei Brandversuchen gasgefüllter Druckspeicher oder bei Fall- oder Hochgeschwindigkeits-Impactversuchen. Je nach Bedarfsfall können die Prüfungen auch unter Zuhilfenahme zerstörungsfreier Messverfahren wie beispielsweise optischer Dehnungsmessung, Computertomographie, Thermografie, Ultraschall- und Wirbelstromprüfung oder Schallemissionsmessung begleitet werden.

Die von der BAM gewonnenen Forschungs- und Prüfungsergebnisse werden in die entsprechenden Gremien eingebracht, wo sie unmittelbar der Überarbeitung und Erstellung von Normen und Regelwerken dienen.

Die BAM spielt somit in Deutschland eine zentrale Rolle hinsichtlich der Sicherheit von Druckbehältern während des Transportes und der Speicherung.

---

Currently, hydrogen is predominantly stored in gaseous form and for weight reasons, mostly in pressure vessels made from fibre-reinforced composites. In order to achieve the highest possible storage densities necessary for hydrogen vehicles travelling great distances, the hydrogen is usually stored under very high pressure.

Pressure vessels must be designed in such a manner that they can safely endure the various loads that may occur during their operational life. For this purpose, pressure vessels must undergo intensive tests before placing on the market and later on when they are in service.

In addition to internal pressure loads at very high and low temperatures, these tests also include fire and drop

tests, acid tests and puncture tests. This aims to ensure that the vessels remain safe even under maximum operating loads, and that dangerous conditions do not arise.

BAM performs official tasks in this area, including the approval of these pressure receptacles for maritime and air transport as well as the contribution to legal standards and technical regulations.

BAM has also been researching the safety of pressure vessels for many years now, particularly focusing on pressure vessels made from fibre-reinforced composites. Research focuses include service-life monitoring and the investigation of ageing processes, the (further) development of existing and alternative approval and testing methods, and the investigation of possible accident scenarios.

BAM also has extensive expertise in testing pressure vessels, including the performance of hydraulic internal pressure tests such as load cycle tests, burst or creep tests, fire tests of gas-filled pressure vessels or drop or high-speed impact tests. Depending on the specific requirements, the tests can also be aided by non-destructive measurement methods such as optical strain measurement, computer tomography, thermography, ultrasonic and eddy current testing or acoustic emission measurement.

The research and test results obtained by BAM scientists are brought to the expert committees, where they are directly used for the revision and preparation of standards and regulations.

In Germany, thus BAM plays an important role in pressure vessel safety during transportation and storage.



Montage: Toyota



#### KONTAKT/CONTACT

Dr.-Ing. Georg W. Mair  
Georg.Mair@bam.de

Sicherheit von Gasspeichern  
Safety of Gas Storage Systems

# DRUCKGASSPEICHER

## Ressortberatung und Rechtsfortentwicklung

### *COMPRESSED GAS STORAGE VESSELS* *Departmental advice and legal development*

Die Aspekte der sicheren Speicherung von gasförmigen Energieträgern wie Propan/Butan, Erdgas/Biogas oder Wasserstoff berühren den Alltag und die öffentlich-technische Sicherheit häufiger als man es auf den ersten Blick wahrnimmt. Dies geht von der lokalen Genehmigung des Betriebes von störfallrelevanten Anlagen über die regionale Zulassung entsprechender Fahrzeuge bis hin zum weltweiten Gefahrguttransport.

Entsprechend vielfältig sind die zugehörigen Regeln und die Organisationen, unter deren Dach die Arbeit an diesen Rechts- und Techniknormen stattfindet.

Eine zentrale Rolle in Bezug auf die Sicherheit von Druckbehältern während des Transportes und der Speicherung spielen hier die Vereinten Nationen (UN). Unter ihrem Dach werden die weltweiten Modellvorschriften (UN Model Regulations: UN Recommendations for the Transport of Dangerous Goods) für die Verkehrsträger-übergreifend transportierten Druckgefäße (bekannt als „Gasflaschen“) wie auch die Zulassungsvorschriften für Fahrzeuge (UN-Working Party 29) erarbeitet.

Hinzu kommen spezifische Vorschriften wie das ADR (Europäisches Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße), das aufgrund des im weltweiten Maßstab regionalen Charakters in manchen Punkten Erleichterungen gegenüber den UN-Modellvorschriften erlaubt.

Dies alles wird begleitet und unterstützt durch die Normungsarbeit, die teilweise im Auftrag der Bundesregierung stattfindet und dann in nationalen Gremien zusätzlich gespiegelt wird. So bieten DIN, CEN und ISO den Rahmen, in dem die Regeln zur harmonisierten Anwendung der Rechtsvorgaben technisch ausgestaltet werden.

Issues concerning the safe storage of gaseous energy carrier such as propane/butane, natural gas/biogas and hydrogen affect everyday life and public safety more often than one might first perceive. This ranges from the local approval of the operation of systems relevant for hazardous incidents, the regional approval of corresponding vehicles, to the worldwide transport of dangerous goods.



*Der Sitz der UN-Gremien für den Gefahrguttransport: das Völkerbundgebäude in Genf*

*The head office of the UN bodies for the transport of dangerous goods: the Palace of Nations in Geneva*

The associated rules and the organisations managing the work on these legal and technical standards are equally as diverse.

The United Nations (UN) plays a central role in relation to the safety of pressure vessels during their transport and storage. Under its authority, the global model regulations (UN Model Regulations: UN Recommendations for the Transport of Dangerous Goods) for pressure receptacles (known as ‘gas cylinders’) transported by all modes of transport and the approval regulations for vehicles (UN-Working Party 29) were compiled.

Additionally, there are specific regulations such as the ADR (European Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road), which, due to its regional character on a worldwide scale, allows some simplifications compared to the UN model regulations.

This is all accompanied and supported by standardization work, some of which is undertaken on behalf of the German Government and is then also reflected in national bodies. In this way, DIN, CEN and ISO provide the framework within which the rules for the harmonized application of the legal requirements are technically developed.



#### **KONTAKT/CONTACT**

Dr.-Ing. Georg W. Mair  
Georg.Mair@bam.de

Sicherheit von Gasspeichern  
Safety of Gas Storage Systems

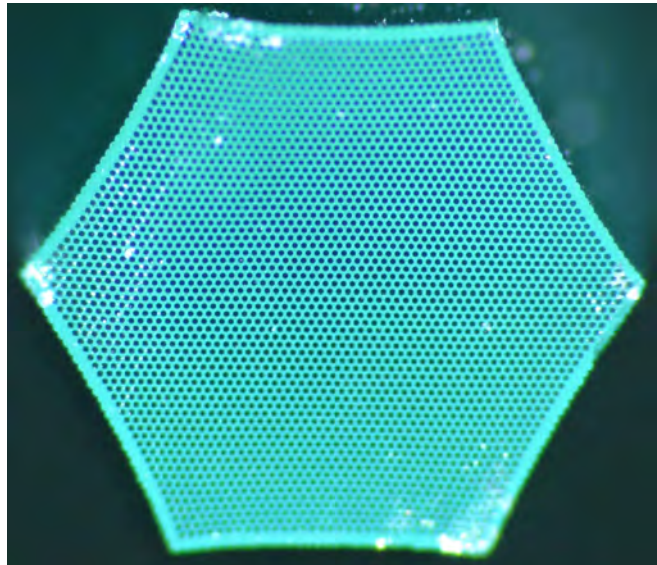
# GLASSPEICHER – ein ungewöhnliches Material für Hochdruckspeicher

## *GLASS STORAGE VESSELS – an unusual material for high pressure storage*

Damit Wasserstoff nutzbringend handhabbar wird, sucht man seit Jahren nach geeigneten Speichermaterialien. Es kommen auch ungewöhnliche Materialien wie Glas zum Einsatz. Glas besitzt herausragende Eigenschaften, darunter die vergleichsweise extreme Zugfestigkeit und die geringe Materialdichte. So sind potenziell leichte Wasserstoffspeicher möglich. Damit diese Eigenschaften zum Tragen kommen, müssen die Gläser jedoch in Kapillarform vorliegen und der Wasserstoff in den Hohlräumen gespeichert werden. Je nach Form und Größe der Kapillaren ist Glas in der Lage, Drücken über 1.500 bar auszuhalten, sodass Speicherdrücke von 700 bis 1.000 bar realistisch erscheinen.

Im Rahmen eines Forschungsprojekts mit den Partnern C.En (Schweiz) und INCOM (USA) haben die Wissenschaftler\*innen der BAM ein System entwickelt, dessen Speicherkapillaren – zu Einheiten aus Millionen von Einzelkapillaren gebündelt – in unterschiedlichen Größen konfektioniert werden können. Zur Darstellung der Machbarkeit wurden erste Prototypen in ein E-Bike und einen E-Scooter verbaut. Die wissenschaftlichen Fragestellungen rund um die Eignung von Glas als Hochdruckspeicher wurden umfassend in zwei Promotionen bearbeitet. Es wurden tausende von Berstdrücken bestimmt, Beladungs- und Entladungszyklen durchgeführt sowie Spannungsverteilungen in den Modulen simuliert.

In weiteren Projekten hat die BAM nach einem Schutz für die empfindlichen Glasoberflächen gesucht, um eine dauerhafte Wasserstoffspeicherung realisieren zu können. Im Rahmen einer weiteren Promotion wurden polymerbeschichtete Kapillaren und Module untersucht und Designprinzipien für den Bau von Glaskapillarspeichern abgeleitet. Im Fokus stand neben den Berstdrücken insbesondere die Wasserstoffdurchlässigkeit der Gläser und Polymere sowie Spannungsverteilung für Systeme aus Glas, Polymer und Metall. Es gelang der



*Glaskapillarspeicher (oben),  
Prototyp mit Glasspeicher  
(unten)*

*Glas storage capillary (above),  
Prototype with glass storage  
vessels (below)*

Nachweis, dass Beschichtungen die Berstdruckfestigkeit deutlich erhöhen und die beschichtungsbedingten Wasserstoffverluste gering sind. Derartige Speicher sind somit auch für die Langzeitspeicherung von Wasserstoff interessant.

---

In order for hydrogen to be effectively manageable, suitable storage materials for hydrogen were looked for since years. Unusual materials such as glass are also being used. Glass has out-standing properties, including three times higher tensile strength compared to steel with a significantly lower material density. This makes potentially lighter storage units possible compared to conventional storage. For these properties to be effective, however, the glasses must be in capillary form and the hydrogen must be stored in its cavities. Depending on the shape and size of the capillaries, glass is able to withstand pressures above 1,500 bar, so that storage pressures from 700 to 1,000 bar appear realistic.

Within the scope of an international research project with partners C.En (Switzerland) and INCOM (USA),

BAM scientists have developed a system whose storage capillaries – bundled into tubes made up of millions of individual capillaries – can be assembled in different sizes. In order to demonstrate the viability of this system, the first prototypes were integrated into an e-bike and an e-scooter. Many scientific issues regarding the suitability of glass as high-pressure storage system were comprehensively addressed in two doctorate theses. Thousands of burst pressures were determined, loading and unloading cycles were carried out, and stress distributions in modules were simulated.

In other projects, BAM was looking for protection for the sensitive glass surfaces in order to be able to implement permanent hydrogen storage. As part of another PhD thesis, polymer coated capillaries and modules were studied to derive appropriate design principles. In addition to the burst pressures, the focus was in particular on the hydrogen permeability of the glasses and polymers as well as stress distribution for systems made of a combination of glass, polymer and metal. It was proven that coatings significantly increase the burst pressure strength and the coating-related hydrogen losses are low. Such storage facilities are therefore also of interest for long-term storage of hydrogen.



© Michael Damer

#### KONTAKT/CONTACT

Dr. rer. nat. Kai Holtappels  
Kai.Holtappels@bam.de

Konstruktiver Brand- und Explosionsschutz Gase  
Constructive Fire and Explosion Safety for Gases

# PRÜF- UND MESSVERFAHREN FÜR WASSERSTOFFTECHNOLOGIEN

## TEST AND MEASUREMENT METHODS FOR HYDROGEN TECHNOLOGIES



*Unterschiedliche  
H<sub>2</sub>-Sensorentypen*

*Various types of  
H<sub>2</sub> sensors*

Wasserstoff ist brennbar und kann ab einem Volumenanteil von vier Prozent in Luft gezündet werden. Die Verwendung von Wasserstoff muss somit überwacht und kontrolliert werden. Der Einsatz von Wasserstoffsensoren kann entscheidend dazu beitragen, die Sicherheit zu gewährleisten und Gefahren zu minimieren.

Risiken in der Wasserstoffanwendung sind u. a. Leckagen, Feuer und Explosionen. Damit die Anwendung von Wasserstoff sicher ist, müssen zuverlässige Sensoren bzw. Sensormessgeräte zur Früherkennung mit Alarmindikation eingesetzt werden. Gegenwärtig gibt es elektrochemische, katalytische, Feldeffekt-, Wärmeleitfähigkeits- und Metalloxid-Halbleitersensoren. Diese müssen zur Erfassung von Wasserstoff in Luft beispielsweise unterhalb der Explosionsgrenze geeignet sein, um die Gefahr durch einen Anstieg der Wasserstoffkonzentration rechtzeitig zu detektieren.

Um die Leistungsdaten wie Lebenszeit, technischer Einsatzbereich, Ansprechverhalten und Richtigkeit von kommerziell erhältlichen bzw. eingesetzten Sensoren sowie Sensoren aus Forschung und Entwicklung zu ermitteln, ist eine Prüfung in einem akkreditierten Labor wie der BAM wichtig. Dank der metrologisch

rückgeführten Prüfungen können die Sensoren in Anwendungen eingesetzt werden.

Künftige Entwicklungen von Wasserstoffsensoren werden in zunehmendem Maße nicht nur vom aktuellen Entwicklungsstand, sondern auch von der Verfügbarkeit bedarfsgerechter Prüfeinrichtungen und -verfahren bestimmt.

Anforderungen an die Durchführung von Prüfungen sind:

- Durchführung nach hinreichend festgelegtem Prüfplan
- Messungen gehobener Präzision, Vermeidung systematischer Verfahrensfehler (Störgrößeneinfluss, Ankopplungsprobleme)
- Einhaltung festgelegter Umgebungsbedingungen
- Bestimmung der Unsicherheit der Prüfung und des geprüften Sensors

Im Bereich der Wasserstoff-Sensorik widmet sich die BAM der Entwicklung der Prüftechnik für Sensoren, prüft forschungsbegleitend Sensoren und erstellt Kennlinien in Abhängigkeit von der Gaskonzentration, der Gasfeuchte und -temperatur. Außerdem ermittelt sie

Querempfindlichkeiten und Langzeitstabilität und erarbeitet Richtlinien, Standards, Normen und Prüfverfahren.

Die BAM befasst sich mit der Entwicklung mobiler Gassensorsysteme. Wenn die Untersuchung von Gasen für den Menschen zu gefährlich ist, können unbemannte Luftfahrzeuge oder Bodenfahrzeuge („Unmanned Aerial Vehicle“, UAV oder „Unmanned Ground Vehicle“, UGV) zum Einsatz kommen. Die Integration geeigneter Gassensoren und Algorithmen zur Steuerung des Systems und Datenauswertung ermöglicht die flexible und (teil-)automatisierte Überwachung von Infrastrukturen und Szenarien, in denen gefährliche Gase wie Wasserstoff Verwendung finden.

---

Hydrogen is flammable and can be ignited in air above a volume fraction of 4%. Thus, the use of hydrogen must be monitored and controlled. The application of hydrogen sensors can significantly contribute to guaranteeing safety and minimizing hazards.

Risks associated with the use of hydrogen include but are not limited to leaks, fire and explosions. In order to use hydrogen in a safe manner, reliable sensors or sensor measuring devices for early detection by way of an alarm signal must be used. There are currently electro-chemical, catalytic, field effect, thermal conductivity and metal oxide semiconductor sensors.

In order to detect the danger of an increase in hydrogen concentration in good time, these sensors must be suitable for detecting hydrogen in the air, for example, below the explosion limit.

It is essential to test hydrogen sensors in an accredited laboratory such as BAM in order to determine

performance data such as service life, technical range of application, response behaviour and the accuracy of used or commercially available sensors and sensors from research and development. Users and researchers can install their sensors for their application with these metrologically traceable tests.

Current applications and future developments of hydrogen sensors are being increasingly determined not only by the current state of development, but also by the availability of needs-based test and calibration equipment and procedures.

The requirements for conducting the tests are:

- Implementation according to a sufficiently defined inspection plan
- Measurements with enhanced precision, avoidance of systematic process errors (interference influence, coupling problems, etc.)
- Compliance with specified environmental conditions
- Determination of the test uncertainty and the tested sensors

In terms of hydrogen sensors, BAM is also committed to the development of testing technology for sensors, the testing of sensors during research and the creating of characteristic curves depending on gas concentration, humidity and temperature. Furthermore, they investigate cross sensitivities and long-term stability and establish guidelines, standards, norms and test methods.

BAM is engaged in the development of mobile gas sensor systems. If the investigation of gases for humans is too dangerous, unmanned aircraft or ground vehicles („Unmanned Aerial Vehicle“, UAV or „Unmanned Ground Vehicle“, UGV) will be used. The integration of suitable gas sensors and algorithms for system control and data evaluation enables a flexible and (partially) automated monitoring of infrastructures and scenarios in which hazardous gases such as hydrogen are used.



#### KONTAKT/CONTACT

Dr. rer. nat. Carlo Tiebe  
Carlo.Tiebe@bam.de

Sensorik, mess- und prüftechnische Verfahren  
Sensors, Measurement and Testing Methods

# RISIKOANALYSE/ KONSEQUENZ-BETRACHTUNG

## RISK ANALYSIS / CONSEQUENT CONSIDERATION



*Umgestürzter LKW mit  
Gasflaschen beladen*

*Overturned LKW loaded  
with gas cylinders*

*Foto: Winfried Eß*

„Sicherheit“ ist ein im Alltag sehr vielseitig und entsprechend unscharf verwendeter Begriff. Für neue technische Anwendungen, die noch nicht auf umfassende Erfahrungen aufbauen können, ist die Gewährleistung von Sicherheit ein essenzieller Punkt zur Erhöhung der Akzeptanz einer Anwendung oder eines Produkts.

„Sicherheit“ ist im Sinne der technischen Bedeutung ein Ja-/Nein-Zustand, der die Abwesenheit von Gefahr beschreibt

Genau genommen bedeutet der Zustand der Sicherheit bzw. die Abwesenheit von Gefahr ein mit der Anwendung von Technik verbundenes Risiko, das geringer ist als der akzeptierte Risiko-Grenzwert. Den Zustand der „hundertprozentigen Sicherheit“ bzw. des „Nullrisikos“ gibt es nicht; er käme einem Technikverbot gleich.

Im Gegensatz zur „Sicherheit“ ist „Risiko“ quantifizierbar und kombiniert die Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses mit der Konsequenz des Ereignisses. Dem „Risiko“ einer technischen Anwendung steht die „Chance“ gegenüber, die z.B. für die Volkswirtschaft

entsteht. Entsprechend geht es in der Sicherheitsdefinition immer darum, die Chance eines Produkts gegen das zugehörige Risiko abzuwägen.

Mit der Kombination aus Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses und seiner Konsequenz lässt sich aus dem Risikogrenzwert und der Konsequenz eines Ereignisses eine maximal akzeptierte Eintrittswahrscheinlichkeit für dieses Ereignis ableiten. Die Betrachtung dieser Eintrittswahrscheinlichkeiten als Maßstab für Sicherheit erlaubt es, für die Sicherheitsbewertung von Wasserstoffspeichern neue Wege zu gehen, die auch neue Gestaltungsspielräume in der Auslegung und in den Prüfanforderungen eröffnen.

Diese Zusammenhänge macht sich die BAM unter Einbeziehung verschiedener Methoden zur Konsequenzbeschreibung zunutze, wenn es z.B. darum geht, den Alterungsprozess von Composite-Druckbehältern zu bewerten oder die Fristen für deren wiederkehrende Prüfung festzulegen. Außerdem besitzt die BAM die notwendige Infrastruktur, um sicherheitstechnische Konzepte von Anlagen und/oder Systemen im

Realmaßstab zu überprüfen und ggf. Schutzmaßnahmen abzuleiten und zu testen.

Nimmt man noch die Simulation der statistischen Festigkeitseigenschaften von Populationen aus Wasserstoffspeichern hinzu, lassen sich mithilfe des „Monte-Carlo-Experiments“ sogar die Wirkweise und Effizienz einer Mindestanforderung und damit Normen und Vorschriften bewerten und optimieren.

---

The term ‘safety’ is used diversely in everyday life, and thus also vaguely. For new technological applications which cannot yet build upon extensive experience, the guarantee of safety is an essential aspect for increasing the acceptance of an application or product.

In a technical sense, ‘safety’ is a yes/no state which describes the absence of danger.

Strictly speaking, the state of safety or the absence of danger means that a risk associated with the use of technology is lower than the accepted risk threshold. There is no such thing as a state of ‘100% safety’ or ‘zero risk’; that would be equivalent to a ban on technology.

In contrast to ‘safety’, ‘risk’ is quantifiable and combines the probability of an event with the consequence

of the event. The ‘risk’ of a technical application is the counterpart to ‘chance’ that arises, e.g. for the economy. In accordance with this, the definition of safety also involves weighing the opportunity of a product against the associated risk.

By combining the probability of an event and its consequences, the maximum accepted probability of this event occurring can be derived from the risk threshold and the consequence of such an event. The consideration of these probabilities of occurrence as a benchmark for safety makes it possible to break new ground for the safety assessment of hydrogen storage tanks, which also opens up new scope for design and testing requirements.

Using various methods to describe the consequences, BAM harnesses these interrelationships e.g. to evaluate the ageing process of composite pressure vessels or to determine the periodicity for their periodic inspection. In addition, BAM has the necessary infrastructure to verify safety concepts of plants and/or systems in real scale and to derive and test protective measures if necessary.

When the simulation of the statistical strength properties of hydrogen storage populations is additionally considered, the ‘Monte Carlo experiment’ can be used to evaluate and optimize the mechanism and efficiency of a minimum requirement and thus standards and regulations.



#### KONTAKT/CONTACT

Dr.-Ing. Georg W. Mair  
Georg.Mair@bam.de

Sicherheit von Gasspeichern  
Safety of Gas Storage Systems



# WERKSTOFFE FÜR WASSERSTOFF

## MATERIALS FOR HYDROGEN

Produktion, Speicherung und Transport von Wasserstoff als zukünftiger Energieträger stellen hohe Anforderungen an die eingesetzten Materialien und bedingen eine sorgfältige Verarbeitung. Wasserstoff kann bspw. bei der Speicherung unter hohem Druck oder über elektrochemische Korrosionsprozesse, bspw. in Löchern oder Spalten, in einen metallischen Werkstoff gelangen. Auch schon während der Herstellung kann Wasserstoff von metallischen Komponenten aufgenommen werden, bspw. bei der schweißtechnischen Fertigung. Abhängig vom Gefüge können schon geringste Wasserstoffkonzentrationen im Bereich weniger ppm die mechanischen Eigenschaften metallischer Werkstoffe erheblich herabsetzen. Wasserstoff kann an Fehlstellen akkumulieren, manche Metalle chemisch verändern und schließlich zu spröden Rissen und Brüchen führen.

Dem nützlichen Einsatz von Wasserstoff als Energieträger sollten solche negativen Wirkungen nicht entgegenstehen. Phänomenologisch sind sie abhängig von der auslösenden lokalen mechanischen Beanspruchung, der vorliegenden Mikrostruktur und der Höhe der Wasserstoffkonzentration. Die BAM beschäftigt sich wissenschaftsbasiert sowohl mit den Phänomenen als auch mit den Mechanismen von Wasserstoff in Metallen, um Möglichkeiten und Einsatzgrenzen für die jeweiligen Komponenten zu identifizieren, um insbesondere eine unerwartete und spröde wasserstoffunterstützte Rissbildung und damit verbundene Sicherheitsrisiken weitestgehend auszuschließen.

Production, storage and transport of hydrogen as a future energy carrier place high demands for suitable materials and require careful processing. Hydrogen can enter a metallic material during storage of hydrogen under high pressure or via electrochemical corrosion processes in holes or crevices. Hydrogen can also be absorbed during manufacturing of metallic components, e.g. during welding. Depending on the microstructure, even low hydrogen concentrations in the range of a few ppm can considerably reduce the mechanical properties of metallic materials. Hydrogen can accumulate at defects, alter metals chemically and finally cause brittle cracking and fracturing. The efficiency of using hydrogen as an energy carrier should not be compromised by such negative effects. From the phenomenology point of view, these effects depend on the local mechanical load that triggers them, the microstructure and the hydrogen concentration. BAM is investigating these phenomena as well as the hydrogen related mechanisms in metals in order to identify application chances and limits for the respective components. Such research activities are specifically targeted to exclude unexpected and brittle hydrogen-assisted cracking and associated safety risks.

### KONTAKT/CONTACT

Prof. Dr.-Ing. Thomas Böllinghaus  
Thomas.Boellinghaus@bam.de

Komponentensicherheit  
Component Safety



© Michael Danner

# WASSERSTOFFABSORPTION, -DIFFUSION UND -MESSUNG

## *HYDROGEN ABSORPTION, DIFFUSION AND MEASUREMENT*

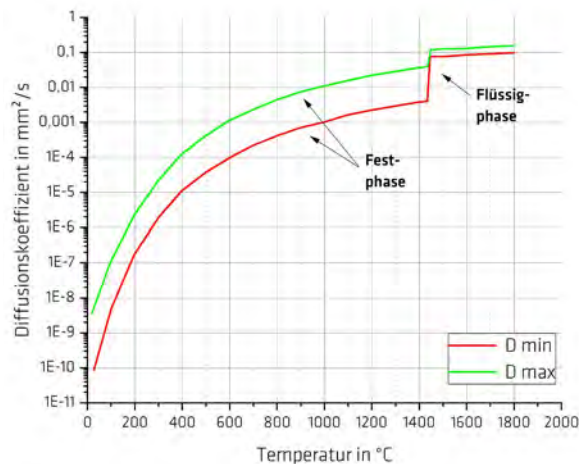
Die für ein bestimmtes Gefüge risskritische Wasserstoffkonzentration ist davon abhängig, wieviel unter den diversen Herstellungs- oder Betriebsbedingungen aufgenommen wird und wie der Wasserstoff sich in dem oft sehr heterogenen Gefüge verteilt. So beeinflussen der Oberflächenzustand und die Umgebungsbedingungen, ob er in wasserstoffhaltigen Atmosphären dissoziieren oder direkt vom Werkstoff aus einem Elektrolyten oder über einen Lichtbogen aufgenommen werden kann. Die Konzentrationsverteilung im Werkstoffgefüge wird erheblich vom Diffusionsvermögen, von lokalen Ansammlungen, etwa an Fehlstellen (Trapping), bis hin zum beschleunigten Wasserstofftransport beispielsweise mit Versetzungen (Enhancing) beeinflusst. Beides, die Absorption wie auch die Permeation, sind sehr temperatur- und teilweise auch druckabhängig. In mehreren Projekten werden in der BAM laufend Werte für den Wasserstofftransport in den verschiedensten metallischen Gefügen ermittelt, so auch für die Werkstoffe für Wasserstofftechnologien. Diese Werte finden unter anderem Eingang in numerische Simulationen der Wasserstoffverteilung und -rissbildung in heterogenen Mikrostrukturen.

Für solche Untersuchungen stehen Analysatoren auf der Basis der Trägergas-Heißextraktion (TGHE) zur Verfügung. Diese Technik stammt ursprünglich aus der Schweißtechnik und wurde im Rahmen der Normungsarbeit (ISO 3690) um eine Massenspektrometrie erweitert, die nun die präzise Bestimmung von Wasserstoffdiffusion und -konzentrationen im ppb- und ppm-Bereich im Temperaturintervall von 20 °C bis 950 °C ermöglicht. Zusammen mit der speziell darauf ausgerichteten experimentellen Mikrostruktursimulation kann das Wasserstofftransportverhalten in den unterschiedlichsten metallischen Werkstoffen untersucht werden. Eine thermische Desorptionsanalyse (TDA) ermöglicht dabei die Bestimmung der Bindungs- bzw. Aktivierungsenergien der mikrostrukturellen Defekte (sogenannte Fallen), an denen sich Wasserstoff

anlagert. Durch die Analyse des Desorptionsverhaltens können wichtige Wasserstoff-Transportparameter, insbesondere die gefüge- und temperaturabhängigen effektiven Diffusionskoeffizienten, ermittelt werden. Außerdem kann über einen Schmelzaufschluss der im Werkstoff verbleibende Rest-Wasserstoff bestimmt werden. Unterhalb von 100 °C wird der Wasserstofftransport in Metallen überwiegend elektrochemisch (nach ISO 17081) bestimmt. Diese Permeationstests ermöglichen es nicht nur, eine Wasserstoffaufnahme und -diffusion aus Elektrolyten und Kondensaten bei freier Korrosion oder unter kathodischem Schutz zu untersuchen. Vielmehr können damit auch Wasserstoffkonzentrationen und -stoffströme ermittelt werden, falls diese unter ungünstigen Voraussetzungen unter Druck absorbiert wurden. Diese auf vorliegenden Erfahrungen zur wasserstoffunterstützten Risskorrosion und Kaltrissbildung aufbauenden Untersuchungen gewinnen für die neuen Wasserstofftechnologien vor allem im Bereich von Hochdruckanwendungen und Power-to-Gas an Bedeutung.

---

The crack-critical hydrogen concentration for a specific microstructure depends on how much is absorbed under the various manufacturing or operating conditions and how it is distributed in the often very heterogeneous microstructure. Among other things, the surface condition and the ambient conditions influence whether it can dissociate in hydrogen-containing atmospheres, for example, or whether it can be absorbed directly by the material from an electrolyte or via arc absorption. The concentration distribution in the material structure is considerably influenced by the diffusivity, by local accumulations, e.g. at defects (trapping), and by accelerated hydrogen transport, e.g. with dislocations (enhancing). Both the absorption and the permeation are very temperature and partly also pressure dependent. In

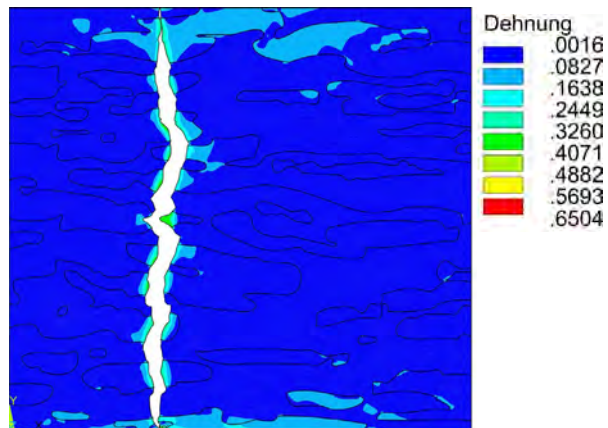


Wasserstoffdiffusionskoeffizienten in hochlegierten austenitischen Stählen (Streubreite der Literaturangaben)

Hydrogen diffusion coefficients in austenitic stainless steels austenitic high-alloyed steels (Scatter of literature data)

various projects at BAM, values for hydrogen transport in various metallic microstructures are continuously determined, also for the materials used for hydrogen technologies. These values are used, among other things, in numerical simulations of hydrogen distribution and cracking in heterogeneous microstructures.

Analyzers based on carrier gas hot extraction (TGHE) are available for such investigations. This welding technology originated technique has been extended by mass spectrometry within the scope of the standardization work (ISO 3690). It enables the precise determination of hydrogen diffusion and concentrations in the ppb and ppm range at temperatures between 20 °C and 950 °C. Together with the specially designed experimental microstructure simulation, the hydrogen transport behavior can be investigated in a wide range of metallic materials. Thermal desorption analysis (TDA) allows the determination of the binding and activation energies of microstructural defects (traps) where hydrogen might



Numerische Simulation der wasserstoffunterstützten Rissbildung in einem Duplexstahl

Numerical simulation of hydrogen-assisted cracking in a duplex stainless steel

accumulate. By such desorption analyses, the relevant parameters for hydrogen transport can be determined, in particular the microstructure and temperature dependent effective diffusion coefficients. In addition, the remaining hydrogen in the sample can be measured by melt-extraction. Hydrogen transport in metals below 100 °C is mainly analyzed electrochemically (according to ISO 17081). These permeation tests not only allow determination of the hydrogen absorption and diffusion in metals exposed to electrolytes and condensates at open circuit potentials or cathodic protection. They particularly allow to evaluate hydrogen concentrations and fluxes which might have been absorbed at high pressures under unfavorable conditions. These investigations based on previous studies of hydrogen assisted corrosion and cold cracking are gaining currently special interest with respect to the new hydrogen technologies, in especially in the field of high hydrogen pressure and power-to-gas-applications.

#### KONTAKT/CONTACT

Dr.-Ing. Tobias Mente  
Tobias.Mente@bam.de

Komponentensicherheit  
Component Safety



#### KONTAKT/CONTACT

Dr.-Ing. Oded Sobol  
Oded.Sobol@bam.de

Komponentensicherheit  
Component Safety



# WASSERSTOFFABHÄNGIGE MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN UND RISSBILDUNG

## HYDROGEN DEPENDENT MECHANICAL PROPERTIES AND CRACKING

Die Degradation der mechanischen Werkstoffeigenschaften durch Wasserstoff äußert sich überwiegend in einer reduzierten Duktilität, was manchmal unpräzise als Wasserstoffversprödung (Hydrogen Embrittlement) bezeichnet wird. Bei sehr hohen Konzentrationen kann auch die Festigkeit der Werkstoffe beeinträchtigt sein. Je nach Art und Richtung der mechanischen Beanspruchung kann es zu spröden Werkstofftrennungen kommen, die als wasserstoffunterstützte Rissbildung bezeichnet werden.

Um Kriterien zu ermitteln, unter denen keine Schädigungen einer metallischen Mikrostruktur zu erwarten sind, und umgekehrt für ein besseres Verständnis, wie Wasserstoff die mechanischen Werkstoffeigenschaften herabsetzt, werden in verschiedenen Projekten die wasserstoffabhängigen Materialeigenschaften für metallische Werkstoffe, insbesondere für Stähle, ermittelt. Unter Nutzung der experimentellen Gefüge-Simulation, ermöglicht dies, die gefügespezifische Empfindlichkeit in Form der abnehmenden Duktilität zu ermitteln. Damit können wasserstoffabhängige Risskriterien ermittelt werden, die in entsprechende Simulationen zur Rissinitiierung und zum Risswachstum Eingang finden. Solche Simulationstechniken wurden bisher zur Vermeidung wasserstoffunterstützter Risskorrosion oder Kaltrissbildung angewandt und sind nun in Richtung eines Life-Cycle-Engineering von Komponenten auf Wasserstofftechnologien zu übertragen.

Um die mechanischen Eigenschaften und das Rissverhalten von Werkstoffen in verschiedenen Umgebungsmedien, aus denen Wasserstoff absorbiert werden kann, in-situ zu untersuchen, werden Zugversuche unter entsprechend langsamer Dehnung durchgeführt. Solche Slow-Strain-Rate-Tests (SSRT) werden werkstoffabhängig bei mehreren unterschiedlichen Dehnraten durchgeführt und erlauben es zudem, das Absorptions- und Diffusionsdauer von Wasserstoff in risskritischen Gefügebereichen zu berücksichtigen. Damit lassen diese

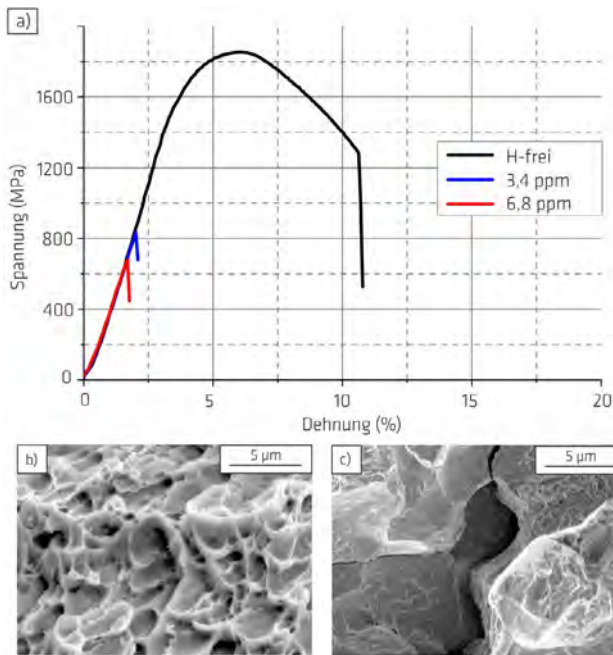
Tests Aussagen zur Wirkung adsorbierten Wasserstoffes auf die Rissinitiierung, das Risswachstum und auf eine mögliche Veränderung der Bruchtopografie zu. Zusätzlich ermöglichen langsame zyklische Versuche, auch das Wasserstoffverhalten im Gefüge unter einer wechselnden Zug-Druck-Beanspruchung zu berücksichtigen. Essenziell für solche Untersuchungen ist die begleitende Analyse der absorbierten Wasserstoffkonzentrationen mittels TGHE und der Bruchtopografien mittels REM. Nur so ergibt sich ein klares Bild, ob Wasserstoff eine Rissbildung verursacht hat oder nicht. So genannte Time-Strain-Fracture (TSF) Diagramme ermöglichen zudem einen direkten Vergleich der Resistenz der verschiedenen Gefüge gegen wasserstoffunterstützte Rissbildung. SSRT werden außerdem vielfach genutzt, um numerische Simulationen einer wasserstoffunterstützten Rissbildung zu validieren.

Im Zuge der zunehmenden Bedeutung von Wasserstoff als Energieträger und für dessen Transport und Speicherung wird die SSRT-Technologie als Hochdruckvariante ausgerüstet. Dieses dient dazu, die Wasserstoffaufnahme an druckwasserstoffbeaufschlagten, sicherheitsrelevanten metallischen Bauteilen wie Rohrleitungen, Ventilen unter realen Bedingungen zu simulieren.

---

The degradation of the mechanical material properties by hydrogen mainly manifests itself in reduced ductility, sometimes imprecisely called hydrogen embrittlement. A loss of strength is usually observed only at respectively high concentrations. Dependent on type and direction the mechanical load brittle material separations occur which are well-known as hydrogen-assisted cracking.

In order to determine criteria under which no damage to a metallic microstructure is to be expected, and vice versa for a better understanding of how hydrogen



Wirkung von Wasserstoff auf die mechanischen Eigenschaften eines hochfesten Stahles im Zugversuch: a) Spannungs-Dehnungs-Diagramm, b) Duktiler Bruch im H-freien Zustand, c) Spröder interkristalliner Bruch für 3.4 ppm Wasserstoff

Effects of hydrogen on the mechanical properties of a high-strength low-alloy steel during tensile test: a) Stress-strain-diagram, b) Ductile fracture in H-free condition, c) Intergranular brittle fracture at 3.4 ppm hydrogen

reduces the mechanical material properties, the hydrogen-dependent material properties for metallic materials, especially for steels, are being determined in various projects. The simulation of the tested microstructure allows the determination of the microstructure-specific sensitivity in the form of decreasing ductility. With this, hydrogen-dependent crack criteria can be determined, which are then used in corresponding numerical simulations for crack initiation and crack growth. Such simulation techniques have been used to avoid hydrogen-assisted stress corrosion cracking (HASCC) or cold cracking (HACC) and are now to be extended in the direction of life-cycle engineering of components for the new hydrogen technologies.

In order to investigate the mechanical properties and the cracking behavior of materials in-situ in various environments from which hydrogen can be absorbed, tensile tests are carried out at respectively slow straining. Such slow strain rate tests (SSRT) are typically performed at different strain rates depending on the material and account for the respective absorption and

diffusion times of hydrogen into crack-critical microstructure areas. Such investigations thus provide profound results regarding the effects of adsorbed hydrogen on crack initiation and propagation as well as on changes in the fracture topographies. In addition, slow-strain cyclic tests also allow the hydrogen behavior in the microstructure under alternating tensile-compressive stresses to be considered.

Essential for such investigations is the accompanying analysis of the absorbed hydrogen concentration by means of CGHE and the fracture topographies by means of SEM. This is the only way to obtain a clear picture of whether hydrogen has supported crack formation. So-called time-strain-fracture (TSF) diagrams also allow a direct comparison of the resistance of the different microstructures to hydrogen-assisted cracking. SSRT is also widely used to validate numerical simulations of hydrogen-assisted cracking.

In the course of the increasing importance of hydrogen as an energy carrier and for its transport and storage, the SSRT technology is equipped as a high-pressure variant. This will be applied to investigate the limits for safety-relevant components like tubulars and valves at realistic service conditions.

#### KONTAKT/CONTACT

Dr.-Ing. Tobias Mente  
Tobias.Mente@bam.de

Komponentensicherheit  
Component Safety



#### KONTAKT/CONTACT

Dr.-Ing. Oded Sobol  
Oded.Sobol@bam.de

Komponentensicherheit  
Component Safety



# LOKALISIERUNG VON WASSERSTOFF DURCH HOCHAUFLÖSENDE BILDGEBENDE VERFAHREN

## LOCALIZATION OF HYDROGEN BY HIGH-RESOLUTION IMAGING TECHNIQUES

Die BAM hält zurzeit die Technologieführerschaft in den bildgebenden Verfahren zur Visualisierung von Wasserstoffverteilungen und -rissbildung in metallischen Mikrostrukturen. In der Kombination mit konventionellen Prüfverfahren erlauben es solche Imaging-Techniken, die Verteilung und die Wirkung von Wasserstoff in metallischen Mikrostrukturen in-situ zu studieren und sie finden daher auch zunehmend industrielles Interesse in Hinblick auf eine sichere Auslegung von Komponenten für neue Wasserstofftechnologien.

Zurzeit werden zwei Arten von bildgebenden Verfahren weiter an der BAM vorangetrieben, um tiefergehende Aufklärungsarbeit zur Wasserstoffverteilung und Rissbildung in metallischen Werkstoffen sowie in additiv gefertigten und geschweißten Mikrostrukturen zu leisten. Hierbei handelt es sich um die Flugzeit-Sekundärionenmassenspektrometrie (ToF-SIMS) als 2D-Technik unter dem Einsatz von Deuterium mit einer relativ hohen Auflösung und die Neutronentomographie (NT) als 3D-Technik mit einer etwas geringeren Auflösung der Wasserstoffverteilung. Diese einzigartigen Verfahren ermöglichen die Integration innovativer Versuchsaufbauten und erlauben es, die Wasserstoffakkumulation mit einer ausgezeichneten lateralen Auflösung zu beobachten, die lokalen Konzentrationen zu bestimmen und die Auswirkungen auf die Mikrostruktur und die mechanischen Eigenschaften in-situ zu ermitteln und zu bewerten.

So konnte mittels der Kombination von ToF-SIMS, Rasterelektronenmikroskopie (REM) und Elektronenrückstreubeugung (EBSD) erstmalig nachgewiesen werden, dass in hochlegierten austenitischen Chrom-Nickel-Stählen eine Phasenumwandlung von der duktilen austenitischen Phase in eine spröde martensitische Phase durch absorbierten Wasserstoff verursacht wird und dieser Mechanismus tatsächlich existiert, ohne dass hierfür eine begleitende äußere mechanische Beanspruchung erforderlich wäre. Als weiteres wichti-

ges Ergebnis stellte sich mittels beider bildgebenden Verfahren heraus, dass die Wasserstoffaufnahme in der ferritischen Phase in hochlegierten austenitisch-ferritischen Duplexstählen und in ferritischen Stählen eine Blasenbildung (Blistering) hervorruft, an denen bevorzugt Risse initiiert werden können.

---

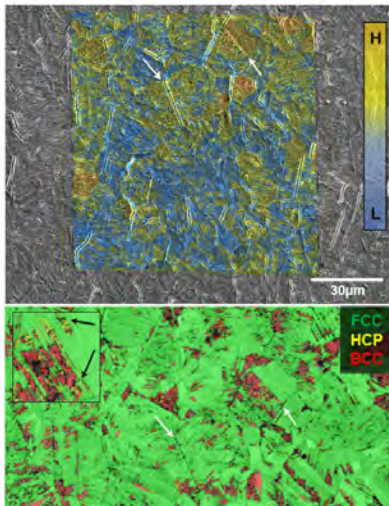
BAM currently holds technology leadership with respect to such advanced imaging of hydrogen distribution and cracking in metallic microstructures. In combination with conventional test procedures such imaging techniques allow in-situ studies of the distributions and the effects of hydrogen in metallic microstructures and thus, find increasing industrial interest with respect to safe engineering of components for novel hydrogen technologies.

BAM is currently promoting two types of imaging techniques to elucidate the hydrogen distribution and cracking in metallic materials as well as in additively manufactured and welded microstructures. These analyses go along with observations at the microscale and below using time-of-flight secondary ion mass spectrometry (ToF-SIMS) as a 2D technique utilizing deuterium at a considerably high resolution and neutron tomography (NT) as a 3D technique at a somewhat lower resolution of the respective hydrogen distributions. The unique techniques enable the integration of innovative experimental setups and allow to observe the hydrogen accumulation with a lateral resolution in the micron and sub-micron, extract the local concentrations and assess the impact on the microstructure and the mechanical properties.

Application of advanced imaging techniques in combination of ToF-SIMS, scanning electron microscopy (SEM) and electron backscatter diffraction (EBSD) at

BAM evidence that hydrogen absorbed in high alloyed austenitic stainless steels might cause a phase transformation from the ductile austenitic into a brittle martensitic microstructure without any external mechanical straining of the microstructure. As another result, it

turned out by application of both imaging techniques that through the absorption of hydrogen, ferrite might suffer initiation of cracks by the formation of blisters in the ferritic subsurface layers in duplex stainless steels and ferritic steels.

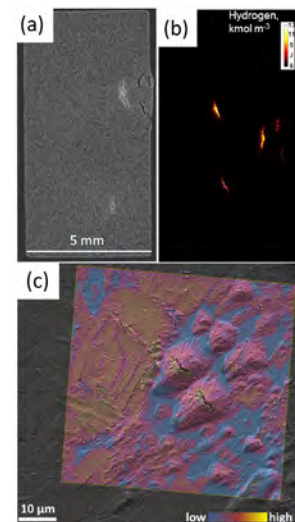


*Oben: ToF-SIMS-Visualisierung der 2H-Verteilung im Gefüge eines austenitischen Stahls AISI316L; Unten: Korrespondierende Kristallstruktur teilweise umgewandelt in Martensit (grün: Austenit (FCC), rot: Martensit (BCC)) entstanden aus vormalis Austenit).*

*Top: ToF-SIMS visualization of the 2H distribution within the microstructure of a AISI316L austenitic steel; Bottom: The corresponding crystalline structure partly transformed into martensite (green: Austenite (FCC), red: Martensite (BCC) emerging from former austenite)*

*Oben: a) NT-Bild einer wasserstoffbeladenen Eisen-Probe mit Blistern unterhalb der Probeoberfläche, b) aus dem NT-Bild berechnete Wasserstoffkonzentration, Unten: c) 2H-Verteilung und Rissbildung in der Mikrostruktur eines ferritisch-austenitischen Stahls DSS2205 visualisiert durch ToF-SIMS.*

*Top: a) NT image of a hydrogen-charged iron sample with subsurface blisters and b) Local hydrogen concentration calculated from the NT image, bottom: c) Distribution of 2H and cracking within the microstructure of a DSS2205 ferritic-austenitic steel visualized by ToF-SIMS.*



#### KONTAKT/CONTACT

Dr.-Ing. Oded Sobol  
Oded.Sobol@bam.de

Komponentensicherheit  
Component Safety



# SELBSTHEILUNG VON RISSEN IN DICHTUNGEN VON HOCHTEMPERATUR-BRENNSTOFFZELLEN

## *SELF-HEALING OF CRACKS IN SEALS OF HIGH TEMPERATURE FUEL CELLS*

Hochtemperatur-Brennstoffzellen erhitzen sich im Betrieb auf bis zu 900 °C. Daher stellen sie besonders hohe Anforderungen an die Dichtungen, die alle Bauteile miteinander verbinden. Diese müssen bei hohen Temperaturen beständig, mechanisch stabil, elektrisch isolierend und für Wasserstoffmoleküle undurchlässig sein.

Viele produzierende Unternehmen verwenden deshalb Glas zur Herstellung der Dichtungen. Dabei werden zwei Konzepte verfolgt. Glasige Lote behalten während des Zusammenfügens der Zellenbauteile ihre amorphe Struktur. Glasig-kristalline Lote kristallisieren während des Fügens und besitzen nur noch einen geringen glasigen Anteil.

In beiden Fällen können jedoch durch die thermischen Belastungen im zyklischen Betrieb feine Risse beim Abkühlen auftreten, da sich die einzelnen Bauteile unterschiedlich stark zusammenziehen. Das kann zum Leistungsverlust, zum Versagen der Zelle, oder sogar zum Austreten von Wasserstoff führen. Austauschen lässt sich eine defekte Dichtung nicht, da sie Teil von bis zu 150 Einzelzellen ist. Im Schadensfall ist es also unvermeidlich, alle Zellen zu wechseln – eine teure und wenig nachhaltige Methode. Aus diesem Grund ist es erstrebenswert, dass sich Risse während des Betriebs der Brennstoffzelle wieder eigenständig schließen.

Eine besonders gute Rissheilung zeigen Dichtungen aus Glas, das nicht kristallisiert. Glas beginnt oberhalb der Glasübergangstemperatur viskos zu fließen und verschließt dadurch feine Risse. Eine solche Dichtung besitzt allerdings den Nachteil, dass sie bei hohen Temperaturen geringe mechanische Festigkeiten aufweist. Zudem interagiert die Dichtung korrosiv mit den angrenzenden Bauteilen, wodurch Metallionen ins Glas gelangen können und unerwünschte, leitfähige Korrosionsprodukte bilden. Dies kann zu einem Kurzschluss führen.

Glasig-kristalline Lote, die während des Fügens kristallisieren oder kristalline Füllstoffe enthalten, sind auch bei hohen Temperaturen mechanisch stabil und erschweren den diffusiven Transport von Korrosionsprodukten. In diesen Dichtungen ist allerdings keine oder nur eine geringe Rissheilung möglich, da der kristalline Anteil das viskose Fließen behindert.

In der idealen Dichtung sollte folglich so viel Kristallphase enthalten sein, dass die Korrosion erschwert wird, aber nicht die erwünschte Rissheilung.

Um das richtige Verhältnis aus Glas und kristallinen Anteilen zu finden, wurden an der BAM im Rahmen einer Promotionsarbeit aus einem Natrium-Calcium-Silicatglas niedriger Kristallisationsneigung und Zirkoniumdioxid ( $\text{ZrO}_2$ ) als inertem, kristallinem Füllstoff Modellgefüge hergestellt. Dadurch war es möglich, den kristallinen Anteil gezielt einzustellen und während der Versuche konstant zu halten. Zur Risszeugung wurden Vickers-Eindrücke verwendet, um reproduzierbare Rissgeometrien zu ermöglichen. Der Verlauf der Rissheilung während isothermer Wärmebehandlungen wurde mikroskopisch untersucht.

Die Untersuchungen zeigen, dass ein gewisser kristalliner Anteil im Glas sogar förderlich für die Rissheilung ist. Risse schließen sich nicht einfach wie ein Reißverschluss von ihrer Spitze aus, sondern weiten sich im Verlauf ihrer Heilung auch auf. Für das Aufweiten ist ein großflächiges viskoses Fließen notwendig, für das Zuziehen der Risspitze dagegen nur ein lokal begrenztes. Durch den kristallinen Anteil wird zunächst das großflächige Fließen gehemmt; dadurch kann sich der Riss nicht mehr aufweiten. Das Erstaunliche: Lokal schließt sich der Riss nun sogar schneller! Erst wenn der kristalline Anteil zu hoch ist, wird auch das lokale Fließen gestoppt und damit die Selbstheilung. Für das Modellsystem erwies sich ein kristalliner Anteil von 17 Prozent als Optimum.

---

Solid oxide fuel cells heat up to 900 °C during operation. Therefore, high requirements are set on the seal that connects the cell components. The seal has to be mechanically stable, electrically insulating, impermeable to hydrogen molecules and resistant to high temperature. Many manufacturers use glass as their sealant, pursuing two different concepts. Whereas glassy sealants retain their amorphous structure during joining of cell components, glassy-crystalline sealants do crystallize leaving a very small glassy fraction.

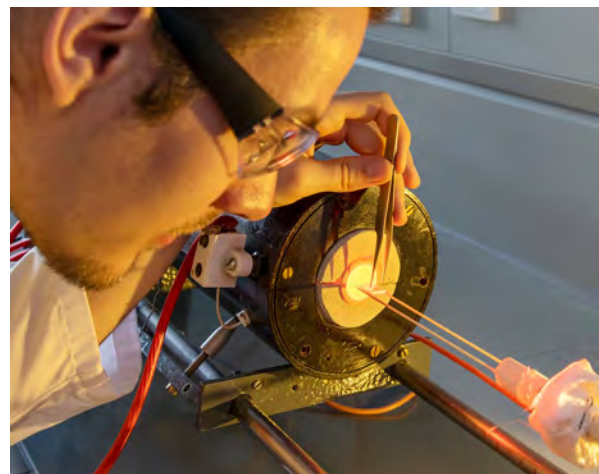
In both cases, cyclical operation can cause fine cracks during cooling as the individual cell components contract differently. This can result in reduced cell efficiency, failure, or even hydrogen leakage. A defective seal cannot be simply replaced as it is part of up to 150 individual cells. In the event of damage, it is therefore unavoidable to replace all cells at once – an expensive and unsustainable method. For this reason, it would be desirable if cracks could heal by themselves during fuel cell operation.

Seals made of non-crystallizing glasses naturally allow easy crack healing: above the glass transition temperature glass begins to flow and closes fine cracks. Such a seal, however, would not provide enough mechanical strength at high temperature. In addition, the glass interacts corrosively with sealed components, whereby metal ions can dissolve into the glass and form undesired conductive corrosion products. This can lead to a short circuit.

Glassy-crystalline sealants crystallized during joining or containing crystalline fillers are mechanically stable even at high temperature and impede the diffusive transport of corrosion products. However, only weak crack healing is possible, as the crystalline content hinders viscous flow.

*Probe mit definierten Rissen vor der isothermen Wärmebehandlung im Rohrofen*

*Sample with defined cracks before isothermal heat treatment in a tube furnace*



The ideal seal should therefore contain enough crystals to limit corrosion, but not the desired crack healing.

In order to find the optimum crystalline volume fraction, model microstructures were prepared as part of a PhD thesis at BAM, combining a sodium-calcium-silicate glass with a low crystallization tendency and ZrO<sub>2</sub> as an inert crystalline filler. This way, the crystalline volume fraction could be varied and kept constant during annealing. Vickers indentation was used for reproducible crack generation. The course of crack healing during isothermal heat treatment was monitored by means of microscopy.

Investigations reveal that a certain crystalline volume fraction is even beneficial for crack healing. Cracks do not simply close from their tip like a zipper, but also widen. For the widening, large-area viscous flow is necessary. For the closing of the crack tip, however, only local flow is necessary. The crystalline content inhibits the large-area flow; as a result, the crack can no longer widen. The astonishing thing: the crack tip closes even faster! Only when the crystalline amount is too high, the local flow is also stopped and thus crack-healing. For the model system, a crystalline amount of 17 percent proved to be the optimum.

#### KONTAKT/CONTACT

Dr. rer. nat. Ralf Müller  
Ralf.Mueller@bam.de

Glas  
Glass



# PROJEKT MefHySto – Metrologie für fortschrittliche Wasserstoffspeicherlösungen

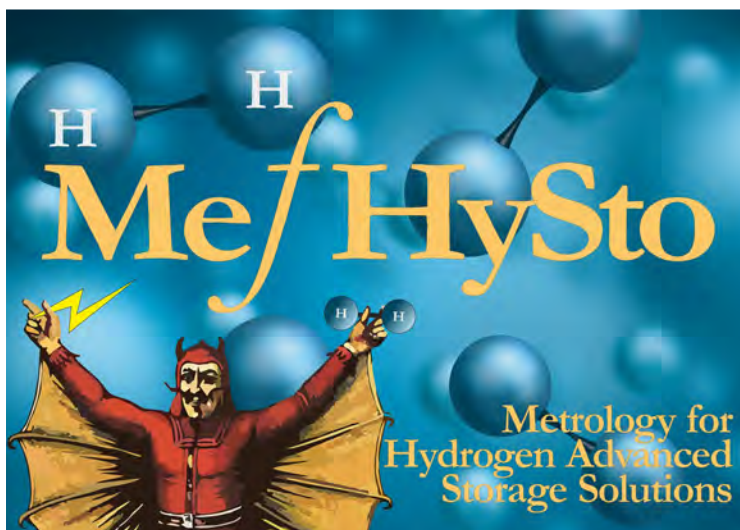
## *PROJECT MefHySto – Metrology for Advanced Hydrogen Storage Solutions*

Zu Spitzenzeiten der Versorgung ist eine großflächige Energiespeicherung erforderlich, da Energie aus erneuerbaren Quellen fluktuiert. Eine Lösung für diese Energiespeicherung ist der großtechnische Einsatz von Wasserstoff. Fortschrittliche Speicherlösungen für Wasserstoff wie Power-to-Hydrogen, Power-to-Gas oder Gas-to-Power sind eine Voraussetzung, um bis 2030 das EU-Ziel für eine Nutzung erneuerbarer Energien im Umfang von 32 Prozent zu erreichen. Um jedoch die neu erlassene europäische Richtlinie 2018/2001 über erneuerbare Energien umzusetzen, ist messtechnische Zuverlässigkeit in der Energieversorgungskette für die Wasserstoffspeicherung erforderlich. Darüber hinaus ist eine bessere Kenntnis der chemischen und physikalischen Eigenschaften von Wasserstoff erforderlich, einschließlich rückverfolgbarer Messungen und validierter Techniken.

werden. Darüber hinaus wird das Projekt die Nachhaltigkeit und Zuverlässigkeit von Brennstoffzellen untersuchen, deren Leistung durch Verunreinigungen in Wasserstoff und Luft beeinträchtigt wird, und eine harmonisierte Methode für gespeicherten Wasserstoff entwickeln. Schließlich wird sich das Projekt mit metrologischen und thermodynamischen Fragen bei der großtechnischen Speicherung von Wasserstoff in unterirdischen Gasspeichern (UGS) und der Umwandlung bestehender UGS von Erdgas in Wasserstoff befassen.

Abhängig von der Menge, der Verfügbarkeit zur Umwandlung in Energie und der erforderlichen Reinheit werden derzeit drei verschiedene Speichertypen für Wasserstoff eingesetzt: (a) mittelgroße, sichere, reversible Speicherung in Feststoffen durch Hydride oder Adsorption in porösen Medien, (b) Einlagerung in das Erdgasnetz und (c) unterirdische Speicherung in geologischen Hohlräumen. Für diese drei Speichertypen sind jedoch zuverlässige Standards, Referenzmethoden und Materialien erforderlich. Dazu fehlen heute spezifische thermodynamische Daten für Wasserstoff-Erdgas-Gemische. In reversiblen Speichersystemen müssen wichtige Schlüsselparameter (etwa Speicherkapazität oder Dynamik) vergleichbar gemacht werden. Die metrologischen Besonderheiten von UGS sind weitgehend unbekannt.

Mit einer EU-Finanzierung in Höhe von 2,3 Millionen Euro über drei Jahre werden 14 europäische Konsortialpartner langfristige wirtschaftliche, soziale und ökologische Wirkungen erzielen, wie z. B. die Stärkung des Vertrauens der Regulierungsbehörden, der Industrie und der Investoren in die großtechnische Wasserstoffspeicherung, die Unterstützung der größtmöglichen Integration intermittierender erneuerbarer Energiequellen wie Sonne oder Wind, die Ermöglichung saisonaler Energiespeicherung für Heizung,



Um dies anzugehen, wird das Projekt MefHySto die Qualität des erzeugten Wasserstoffs bewerten und die Referenzzustandsgleichungen verbessern, die für die Modellierung der Wasserstoffinjektion verwendet

Transport und Elektrizität und die Kultivierung der Messtechnik für Transienten, die intelligente elektrische Netze durch schnelle Wasserstoffübertragung zu/ von den Speichern unterstützt. Das Vorhaben läuft im Rahmen des EMPIR-Programms von EURAMET und wird von der BAM koordiniert.

The Large-scale energy storage is required at supply peak times as energy from renewable sources fluctuates. A solution for this energy storage is the large-scale use of hydrogen. Advanced storage solutions for hydrogen such as Power-to-Hydrogen, Power-to-Gas, or Gas-to-Power, are a prerequisite to achieve the ambitious new EU energy target of 32 % coming from renewable energy by 2030. However, in order to target the newly released Renewable Energy European Directive 2018/2001 metrological reliability in the energy supply chain for hydrogen storage is needed. Improved knowledge of the chemical and physical properties of hydrogen is also required including traceable measurements and validated techniques.

To address this, this project will assess the quality of hydrogen produced and improve the reference equations of state used for modelling hydrogen injection. In addition, the project will investigate the sustainability and reliability of fuel cells (FC), whose performance is affected by impurities in hydrogen and air and develop a harmonized method for stored hydrogen. Finally, the project will tackle metrological and thermodynamic

issues in the large-scale storage of hydrogen in underground gas storages (UGS) and the conversion of existing UGS from natural gas to hydrogen.

Depending on the quantity, the availability for conversion into energy and the required purity, three different types of hydrogen storage are currently used: (a) medium-sized, safe, reversible storage in solids by hydrides or adsorption in porous media, (b) storage in the natural gas grid and (c) underground storage in geological cavities. However, for these three types of storage reliable standards, reference methods and materials are required. Specific thermodynamic data for hydrogen-natural gas mixtures are currently unavailable. In reversible storage systems, important key parameters such as storage capacity or dynamics must be made comparable. The metrological characteristics of UGS are largely unknown.

With an EU Funding of 2.3 million € over three years, 14 European consortium partners will tackle long-term economic, social and environmental impacts such as increasing confidence for regulators, industry and investors in large scale hydrogen storage, supporting maximum integration of intermittent renewable energy sources like solar or wind, enabling seasonal energy storage for heating, transport and electricity and cultivating metrology for transients supports smart electrical grids through rapid hydrogen transfer to/from storage. The project is and funded under the EMPIR programme of EURAMET and coordinated by BAM.

#### KONTAKT/CONTACT

Dr. rer. nat. Michael Maiwald  
Michael.Maiwald@bam.de

Prozessanalytik  
Process Analytical Technology



© Michael Danner

# TIEFBOHRLÖCHER NOCH SICHERER DURCH FASEROPTISCHE SENSORIK

## *DEEP BOREHOLES SAFER THANKS TO FIBER OPTIC SENSORS*

In der Bohrlochverrohrung lassen sich sehr kleine Leckagen durch faseroptische Sensorik orten und quantifizieren. Die frühzeitige Erkennung solcher Leckagen hilft, den Lebenszyklus von Kavernenspeichern zu verlängern, welche für die Öl- und Gasspeicherung genutzt werden.

Seit November 2019 wird ein kombiniertes Messverfahren zur Zustandsbewertung von Tiefbohrlöchern entwickelt, das die Vorteile der faseroptischen Temperaturmessung mit denen der faseroptischen Akustikmessung vereint. Ein in das verrohrte Bohrloch eingeschleustes Glasfaserkabel soll mit Hilfe des neu zu entwickelnden Mess- und Auswerteverfahrens Leckageströme eindeutig identifizierbar und in ihrer Größenordnung quantifizierbar machen. Durch die Messdatenkopplung und den Wegfall der bewegungsbedingten Nachteile einer Messsonde werden wesentlich präzisere Ergebnisse zur Bewertung der Bohrlochintegrität erwartet.

Die sowohl einfache als auch robuste Technik wird quantitative Aussagen über die Zustände im verrohrten Bohrloch direkt am Messplatz ermöglichen. An diesem breit angelegten und vom BMWi geförderten ZIM-Kooperationsprojekt sind neben der BAM die IAB Weimar gGmbH, die GESO GmbH & Co. Projekt KG, die DEEP.KBB GmbH sowie die Rembe Consulting PartG mbB beteiligt.

Very small leaks in borehole casing can be located and quantified by fibre optic sensors. Early detection of such leaks helps to extend the life cycle of cavern storage facilities used for oil and gas storage.

Since November 2019, a combined measurement method for the condition assessment of deep boreholes has been developed, uniting the advantages of fiber optic temperature measurement with those of fiber optic acoustic measurement. With the help of this newly developed measuring and evaluation method, a fiber optic cable inserted into the cased borehole is intended to make leakages clearly identifiable and quantifiable in their order of magnitude. By combining the measurement data and eliminating the disadvantages caused by the movement of a measuring probe, more precise results for the evaluation of the borehole integrity are expected.

The simple and robust technique will allow quantitative statements about the conditions in the cased borehole directly at the measuring site. In addition to BAM, IAB Weimar gGmbH, GESO GmbH & Co Projekt KG, DEEP.KBB GmbH and Rembe Consulting PartG mbB are involved in this broadly based ZIM cooperation project which is funded by the BMWi.



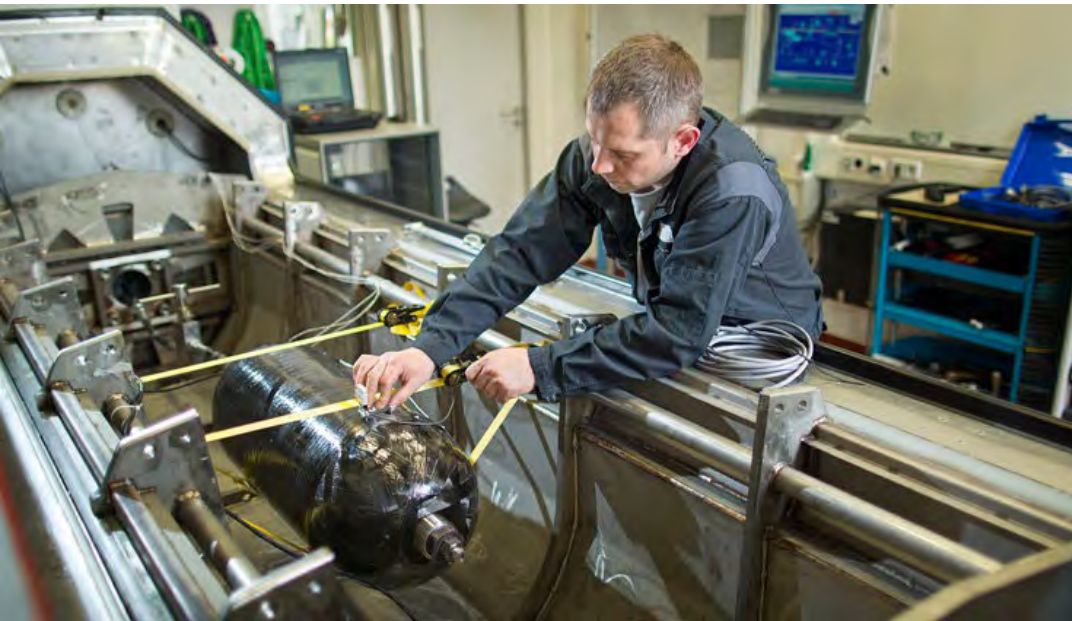
### KONTAKT/CONTACT

Dr.-Ing. Katerina Krebber  
Katerina.Krebber@bam.de

Faseroptische Sensorik  
Fibre Optic Sensors

# PROJEKT DELFIN – Wie man Wasserstoffspeicher leichter und sicherer macht

*PROJECT DELFIN – How to make the storage of hydrogen safer and easier*



*Vorbereitung einer Innendruckprüfung an einem Wasserstoff-Druckbehälter*

*Preparation of an internal pressure test on a hydrogen pressure vessel*

Wer heute abgasfrei Auto fahren will, nutzt meist ein mit Batterien betriebenes Elektrofahrzeug. Deren größte Schwachpunkte sind die lange Ladezeit, ihr hohes Gewicht, die begrenzte Lebensdauer und sehr hohe Kosten. Eine Alternative stellen mit Wasserstoff betriebene Elektrofahrzeuge dar. In deren Brennstoffzellen wird gasförmiger Wasserstoff in Strom umgewandelt, der dann einen Elektromotor antreibt. Die dafür erforderlichen Wasserstoffspeicher können genauso schnell befüllt werden wie die Tanks von Benzin- oder Dieselfahrzeugen. Momentan sind Wasserstoffspeicher aber noch recht schwer und damit in der Herstellung teuer. Mit dem Projekt DELFIN ist ein Forschungsvorhaben angetreten, im Zeitraum von 2018 bis 2021 einen besonders leichten, günstig produzierbaren und sicheren Wasserstofftank aus Kohlenstofffasern und einem Kunststoffliner zu entwickeln.

In dem Vorhaben arbeiten eine Reihe von Autoherstellern, Behälter-Entwicklern und die BAM als Experte für die Sicherheit von Druckgasbehältern zusammen.

Im Fokus der BAM steht die sogenannte Impactbelastung der Wasserstoffspeicher. Dazu zählen sowohl von der Fahrbahn hochgewirbelte Steine als auch die Kontaktkräfte bei Unfällen. Die BAM hat einen neuen speziellen Prüfstand entworfen, in dem sie die Belastungen der Speicher mit und ohne Gasfüllung nachstellen wird. Weil innere Schäden wie gebrochene Kohlenstofffasern nicht immer äußerlich sichtbar sind, werden die Tanks außerdem mit Hilfe der Schallemissionsanalyse, der Computertomographie und hydraulischer Restfestigkeitsprüfungen untersucht. Dafür arbeiten in der BAM Gruppen aus drei Fachbereichen zusammen.

Überstehen die neuen Druckbehälter die Impactprüfungen, werden sie noch auf ihre Berstfestigkeit getestet. Dann zeigt sich, wie die angestrebte Materialeinsparung die Robustheit der Tanks verändert und idealerweise sogar verbessert.

Neben der BAM sind die BMW AG, die ElkaMet Kunststofftechnik GmbH, die NPROXX B.V., die

Ford-Werke GmbH, das Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV), die ISATEC GmbH, die Mercedes-Benz Fuel Cell GmbH und die Teijin Carbon Europe GmbH beteiligt. Das Gesamtvorhaben hat ein Förder-volumen von rund 6 Millionen Euro, von denen rund 1,45 Millionen Euro auf die BAM entfallen.

---

Today, anyone who wants to drive an emissions-free car mostly does so in an electric one powered by batteries. The biggest weaknesses of these vehicles are the long charging times, their heavy weight, limited service life and the very high costs. An alternative: hydrogen-powered electric vehicles. In the fuel cells of these cars, gaseous hydrogen is converted into electricity, which then powers an electric motor. The hydrogen storage systems required for this purpose can be filled just as quickly as the tanks of petrol or diesel vehicles. At the moment, however, hydrogen storage systems remain very heavy and are therefore expensive to manufacture. With the launch of the DELFIN project, research has commenced for a particularly light, inexpensive and safe hydrogen tank made of carbon fibres and a plastic liner. This began in 2018 and will run until 2021.

BAM, as a safety expert for gas cylinders, is working with an array of car manufacturers and developers of

composite pressure vessels. The research at BAM focuses on the so-called impact loading of hydrogen storage vessels. This includes both, stones whirled kicked upward from the road surface as well as contact forces in the event of an accident. BAM has designed a special new test bench for adjusting the load of the storage units with and without gas load.

As internal damage such as broken carbon fibres are not always visible externally, the tanks are also examined with the help of acoustic emission analysis, computer-aided tomography and hydraulic residual strength testing. A group from three BAM divisions are working together for this purpose.

If the new pressure tanks withstand the impact tests, their burst strength is subsequently tested. This shows how the targeted material savings change and ideally even improve the robustness of the tanks. Partners working alongside BAM include BMW AG, Elkamet Kunststofftechnik GmbH, NPROXX B.V., Ford-Werke GmbH, Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV), ISATEC GmbH, Mercedes-Benz Fuel Cell GmbH and Teijin Carbon Europe GmbH. The funding of the overall project amounts to approx. 6 million euro, of which around 1.45 million has been allocated to BAM.



#### KONTAKT/CONTACT

Dr.-Ing. Georg W. Mair  
Georg.Mair@bam.de

Sicherheit von Gasspeichern  
Safety of Gas Storage Systems

# PROJEKT TAHYA – Mit Carbonfasern zu besonders effizienten und sicheren Wasserstofftanks

*PROJECT TAHYA – Using carbon fibres to make particularly efficient and safe hydrogen tanks*



Grafik:  
Projekt Tahya

Ziel des Forschungsvorhabens TAHYA (TANK HYdrogen Automotive) ist es, einen besonders effizienten und sicheren Wasserstofftank aus Carbonfasern und einem Kunststoffliner für die Automobilindustrie zu entwickeln. Die Materialien sollen einfach zu wickeln, materialsparend und damit kostengünstig herzustellen sein; die Tanks sollen dünnwandig, platzsparend und leicht sein.

Ein weiteres wichtiges Themenfeld in TAHYA ist die Analyse bestehender Normen und Zulassungsvorschriften mithilfe des Monte-Carlo-Ansatzes der BAM sowie die Erarbeitung von Verbesserungsvorschlägen, um mit den aktuellen Erkenntnissen über Verbundwerkstoffe den Sicherheitsanforderungen zu entsprechen.

Im Fokus der BAM steht die Verifizierung des Behälterdesigns durch zerstörende Prüfungen wie Brandversuche, Berst- oder Lastwechselprüfungen.

In TAHYA sind neben der BAM eine Reihe von europäischen Partnern beteiligt: Volkswagen AG, Optimum CPV, Anleg GmbH, Raigi SAS, Technische Universität Chemnitz, Absiskey, Polarixpartner GmbH.

Das Vorhaben hat ein Fördervolumen von 4 Millionen Euro, von denen der Beitrag der BAM mit einer Summe von 640.000 Euro gefördert wird.

Das Projekt wird vom „Fuel Cells und Hydrogen 2 Joint Undertaking“ im Rahmen der Finanzhilfvereinbarung Nr. 779644 finanziert.

Das Unternehmen wird vom Forschungs- und Innovationsprogramm „Horizon 2020“ der Europäischen Union und von „Hydrogen Europe and Hydrogen Europe Research“ unterstützt.

---

The TAHYA research project (Tank Hydrogen Automotive) aims to develop a particularly efficient and safe hydrogen tank for the automobile industry using carbon fibres and a plastic liner. The materials should be easy to wrap, material-saving and therefore cost-effective to manufacture; the tanks must have thin walls, be space-saving and light.

A further important area TAHYA is focusing on is the analysis of existing standards and approval regulations with the help of BAM's Monte-Carlo Approach as well as the processing of improvement proposals in order to be able to meet the safety requirements suitably with the current knowledge about composite materials.

BAM is concentrating on the verification of the vessel design through destructive tests such as fire, burst and load cycle tests.

Alongside BAM, a number of other European partners are also taking part in TAHYA: Volkswagen AG, Optimum CPV, Anleg GmbH, Raigi SAS, Chemnitz University of Technology, Absiskey, Polarixpartner GmbH.

The funding of the project amounts to 4 million euro; BAM's contribution will be supported with a sum of 640,000 euro.

The project is financed by 'Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking' within the scope of grant agreement no. 779644.

The company is supported by the European Union's Horizon 2020 Research and Innovation programme and Hydrogen Europe and Hydrogen Europe Research.



#### KONTAKT/CONTACT

Dr.-Ing. Georg W. Mair  
Georg.Mair@bam.de

Sicherheit von Gasspeichern  
Safety of Gas Storage Systems



# PROJEKT GW4SHM – Strukturüberwachung für Wasserstoff-Drucktanks

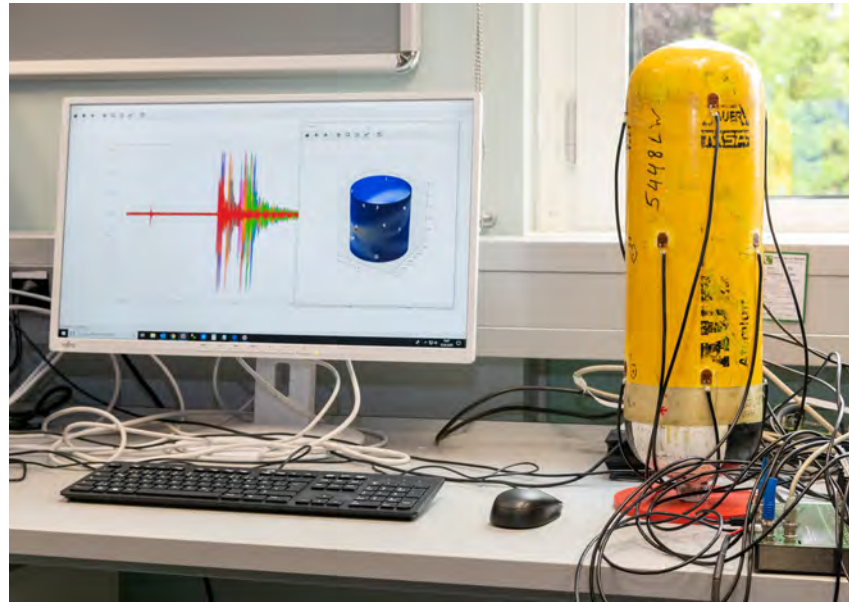
## *PROJECT GW4SHM – Structural Health Monitoring for Hydrogen pressure vessels*

Wie wäre es, wenn bereits während des Betriebs der hochbelasteten Wasserstofftanks der Zustand des Druckbehälters messtechnisch erfasst werden könnte? Eine Antwort auf diese Frage liefert die Strukturüberwachung, auch als Structural Health Monitoring (SHM) bekannt. Als Erweiterung der zerstörungsfreien Prüfung integriert dieser Ansatz angepasste Messtechnik permanent in das zu überwachende Bauteil. Mittels geeigneter Signalanalyseverfahren können so Aussagen über den aktuellen Alterungszustand des Bauteils oder über das Wachstum von kleinsten Rissen in der Behälterwand abgeleitet werden.

Die Verwendung geführter Ultraschallwellen ist für Strukturüberwachungssysteme ein vielversprechender Ansatz. Um dieses Verfahren weiterzuentwickeln, bringt das EU-Projekt GW4SHM (Guided Waves for Structural Health Monitoring) unter Leitung der BAM mehr als 20 europäische Partner aus Wissenschaft und Industrie zusammen, um neue Lösungsansätze in allen Aspekten des SHM zu erarbeiten. Die Projektergebnisse werden den Weg ebnen, Structural Health Monitoring in reale Strukturen und Anlagen integrieren zu können. Das Projekt kombiniert in einzigartiger Form Simulations- und Signalverarbeitungsaspekte der Strukturüberwachung mit geführten Wellen, um so die Zuverlässigkeit der Überwachungssysteme zu verbessern.

Die verschiedenen Projektpartner konzentrieren sich auf ausgewählte Anwendungsfälle aus der Luftfahrt, der Petrochemie und dem Automobilsektor, um Konzepte zur Evaluierung der Integrität dieser Strukturen auszuarbeiten und einsatzbereite Tools für die Industrie zu entwickeln. Die BAM fokussiert sich dabei auf der Entwicklung eines ultraschallbasierten SHM-Systems für das Monitoring von Wasserstoffdruckbehältern. Ausgehend von bereits abgeschlossenen grundlegenden Untersuchungen zur Schallausbreitung

in der mehrschichtigen Behälterwand werden nun geeignete Sensoren entwickelt und in die Druckbehälter integriert, sowie verschiedene Signalverarbeitungskonzepte unter anderem der Einsatz von KI-Ansätzen für die praktische Anwendung erprobt.



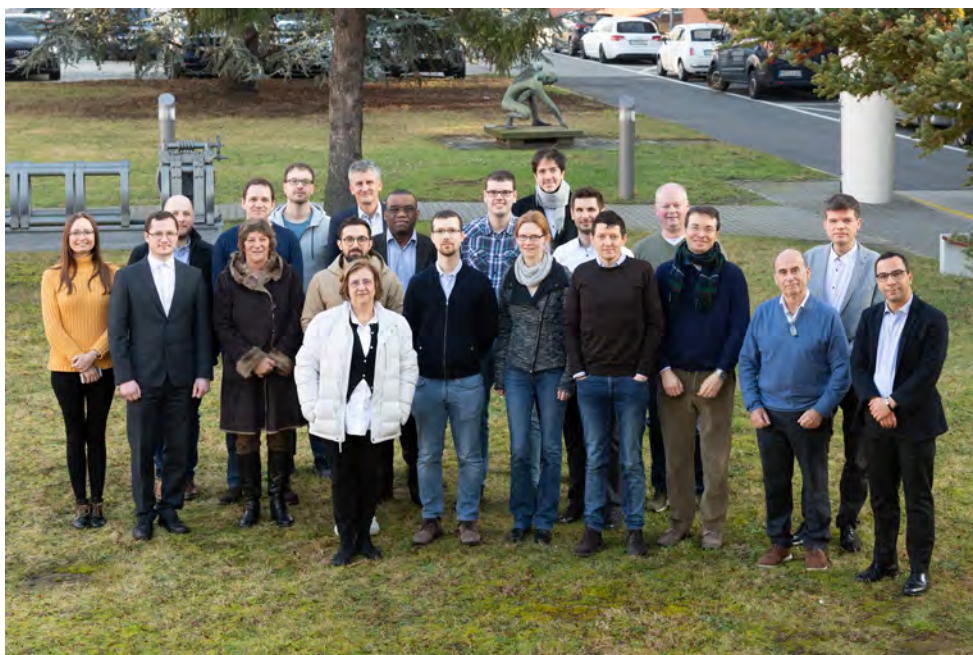
*Versuchsaufbau mit Demonstrator      Lab demonstrator*

Could the integrity of a highly loaded hydrogen pressure vessel be assessed during operation of the component so that a catastrophic failure can be avoided? The answer to this question is Structural Health Monitoring (SHM). This approach delivers up-to-date information about the degradation of the component. The SHM enhances non-destructive testing by applying adapted measurement equipment permanently to the structure under test. Appropriate signal

processing algorithms evaluate information about the current state of the component or the growing of small cracks in the wall of the pressure vessel.

The use of guided ultrasonic waves is one of the most promising methods for implementing an SHM system. To further develop this method, the EU project GW4SHM (Guided Waves for Structural Health Monitoring) coordinated by BAM brings together more than 20 European partners from academia, research and industry to develop new approaches in all aspects of SHM. The project results will pave the way towards a broad integration of Structural Health Monitoring systems into real structures and appliances. The project combines simulation and signal processing aspects of SHM using guided waves to improve the reliability of such monitoring systems.

The project partners concentrate on selected use cases from the aviation, petrochemical and automotive sector to elaborate concepts for evaluating the integrity of its structures and developing ready-to-use solutions for industry. BAM's focus within the projects is on the development of an ultrasonic based SHM system for monitoring hydrogen pressure vessels. Based on recent fundamental investigations on the ultrasound propagation in the multilayer wall of the pressure vessels, the group will develop suitable sensor concepts to be integrated into the structure. Different signal processing approaches using AI, among others, will be tested for their practical applicability.



*Projektmeeting*

*Project meeting*



#### **KONTAKT/CONTACT**

Dr.-Ing. Jens Prager  
Jens.Prager@bam.de

Akustische und elektromagnetische Verfahren  
Acoustic and electromagnetic Methods

# PROJEKT WASSERSTOFFSPEICHER

## Neuartige Speichermaterialien für Wasserstofftankstellen

### *PROJECT HYDROGEN STORAGE TANKS* *Novel storage materials for hydrogen filling stations*

Komprimiertes Gas bis 900 bar ist nach wie vor Stand der Technik für die H<sub>2</sub>-Speicherung in Tankstellen oder in Brennstoffzellenfahrzeugen (FCV). Mit Flüssigwasserstoff – als Alternative zu diesen massiven Systemen bezüglich Handhabung und Speicherung – ist es möglich, die Wasserstoffdichte zu erhöhen, allerdings sind Temperaturen unter -240 °C notwendig. Die Kryo-Adsorption in porösen Materialien ist eine attraktive Alternative zwischen den beiden oben genannten Techniken, da sie die Speicherdichten bei einer höheren Temperatur (nahe -196 °C, der Temperatur von siedendem Stickstoff) nahe an die von flüssigem Wasserstoff heranbringen kann. Der Grund dafür ist das Vorhandensein von Wechselwirkungskräften zwischen den Gasmolekülen und der Oberfläche der festen Adsorptionsmittel, die zu einer Erhöhung der Verdampfungsenergie führen. Weitere Vorteile dieses Mechanismus sind ein niedrigerer Druck als in komprimierten Behältern (80 bar gegenüber 900 bar), der die Sicherheit dieser Systeme erhöht, weniger Isolieranforderungen sowie geringere H<sub>2</sub>-Entlüftungsverluste. Ebenso ist die Physisorption schneller und reversibler als andere chemische Wege, die derzeit erforscht werden, wie Metallhydride oder flüssige organische Träger.

Die Implementierung dieser Technologie in mobilen FCV bei geringem Gewicht stellt eine Herausforderung dar. Für die Speicherung von Wasserstoff in größerem Maßstab könnte sie jedoch attraktiv sein, z.B. in Tankstellen für H<sub>2</sub>-Fahrzeuge. Die Temperatur von -196 °C für die Kryo-Adsorption könnte mit dem kostengünstigen flüssigen N<sub>2</sub> erreicht werden, wobei Wärmeaustauschschritte zur Rückgewinnung der investierten Energie bei der Verflüssigung während der Lieferung erforderlich sind, um das Gas unter Druck zu setzen und die Kosten der Endverdichtung zu senken.

Die BAM ist in Zusammenarbeit mit der H<sub>2</sub> MOBILITY GmbH an einem Projekt zur Entwicklung der nächsten Generation von FCV-Tankstellen auf der Basis der H<sub>2</sub>-Kryo-Adsorption auf modernen porösen Materialien beteiligt. Intensive wissenschaftliche Forschungsanstrengungen während des letzten Jahrzehnts lieferten eine Vielzahl von geeigneten Materialien. Die besten Kandidaten für die H<sub>2</sub>-Kryo-Adsorption sind die sogenannten MOF-Materialien (Metal-Organic Frameworks), deren bemerkenswerte spezifische Oberfläche (bis zu 10.000 m<sup>2</sup>/g) zu den höchsten gravimetrischen Speicherkapazitäten unter den porösen Materialien führt.

Bei H<sub>2</sub>-Tankstellen ist die volumetrische Speicherdichte entscheidender, daher können viele Materialien für diese stationäre Anwendung in Betracht gezogen werden, die die Ziele für die H<sub>2</sub>-Speicherung in FCV nicht erreicht haben. Leider wird über diesen Parameter nicht oft berichtet. Daher besteht das erste Ziel dieses Projekts darin, die MOF-Materialien mit der potenziell höchsten H<sub>2</sub>-Speicherdichte aus einer Datenbank von 4.000 bestehenden Strukturen auszuwählen und ihre volumetrischen Dichten abzuschätzen. Für dieses Vorhaben ist eine Kombination aus rationaler Auswahl, Großdaten-Screening und Simulationswerkzeugen sowie eine Bewertung der potenziellen Kosten für die industrielle Produktion erforderlich. Dann werden Synthese und Charakterisierung der ausgewählten Materialien durchgeführt, begleitet von der Bestimmung der H<sub>2</sub>-Adsorptionseigenschaften. Dazu wird an der BAM ein volumetrischer Hochdruckanalysator bei kryogenen Temperaturen und 100 bar eingesetzt. Die endgültige Auswahl der Materialien erfolgt auf der Grundlage ihrer optimalen Parameter, wie z.B. H<sub>2</sub>-Lagereigenschaften, Betriebsbedingungen für



Wasserstoff-Tankstelle in Wiesbaden

Hydrogen filling station in Wiesbaden

Foto: Felix Krumbholz/ H2 MOBILITY

Be- und Entladung, Betriebsstabilität, potenzielle Kosten und Synthesefreundlichkeit. Das Ziel ist die großtechnische Herstellung der interessantesten Kandidaten unter Anwendung der Prinzipien und Techniken der grünen Chemie. Mit Blick auf die Zukunft werden die in diesem Projekt gefundenen Materialien als Referenzmaterialien für die  $H_2$ -Adsorption im europäischen Projekt MeFHySto (s. S. 38) weiterentwickelt, insbesondere in Zusammenarbeit mit dem Max-Planck-Institut für Intelligente Systeme in Stuttgart.

Hydrogen gas compressed up to 900 bar is still the current state-of-the-art for  $H_2$  storage either in refueling stations or in Fuel-Cell Vehicles (FCV). Liquidifying hydrogen (the necessary temperature being  $-240^\circ\text{C}$ ) to a higher density poses an alternative, especially for systems including handling and storage of mass quantities. Cryo-adsorption in porous materials is an attractive compromise since it can raise storage densities close to liquid hydrogen at a higher temperature (near  $-196^\circ\text{C}$ , the temperature of boiling nitrogen). The reason is the presence of interaction forces appearing between the gas molecules and the surface of the solid adsorbents, like an increase in the evaporation energy. Other advantages of this mechanism are a lower pressure compared to compressed tanks (80 bar vs. 900 bar) that increases the safety of these systems, and

less isolating requisites along with H<sub>2</sub> venting losses. Likewise, physisorption is faster and more reversible than other chemical routes under research, like metal hydrides or liquid organic carriers.

This technology is challenging to implement in FCV but could be feasible for larger-scale storage of hydrogen in, for example, refueling gas stations for vehicles. In this scheme, the temperature of -196 °C could be achieved by the use of inexpensive N<sub>2</sub>(l), involving heat exchange steps to recover the invested energy in liquifying during delivery to pressurize the gas and reduce the final compression costs.

BAM, in collaboration with H2 MOBILITY GmbH, is involved in a project for the development of the next generation of refueling stations for FCV based on H<sub>2</sub> cryo-adsorption on advanced porous materials. Intensive scientific research efforts through the last decade provided a vast number of suitable materials for H<sub>2</sub> adsorption. The best candidates for H<sub>2</sub> cryo-adsorption are so-called Metal-Organic Frameworks (MOF) materials, whose remarkable specific surface areas (up to 10,000 m<sup>2</sup>/g) drives to the highest gravimetric storage capacities amongst porous materials.

For H<sub>2</sub> refilling stations, the volumetric storage density is more critical, therefore many materials that are not reaching the goals for H<sub>2</sub> storage in FCV can be

considered for this stationary application. Unfortunately, this parameter is not often reported. Therefore, the first goal of this project is to select the MOF materials with the potentially highest H<sub>2</sub> stored density from a database of 4,000 existing structures and estimate their volumetric densities. For this purpose, a combination of rational selection, big-data screening, and simulation tools are necessary, together with an evaluation of potential costs for industrial production. Then, synthesis and characterization of the selected materials will be performed accompanied with H<sub>2</sub> adsorption property determination. Therefore, in-house H<sub>2</sub> adsorption property determination by a High-Pressure Volumetric Analyzer at cryogenic temperatures and pressures up to 100 bar. The final selection of materials will be based on their optimal parameters such as, e.g., H<sub>2</sub> storage properties, operating conditions for charge/discharge, stability to operation, potential cost, and ease of synthesis. Final goal is large-scale production of the most interesting candidates by using green-chemistry principles and techniques. With a view to the future, the materials found in this project will be further developed as reference materials for H<sub>2</sub> adsorption in the European project MeH<sub>2</sub>Sto (see p. 39), notably in cooperation with the Max-Planck-Institut für Intelligente Systeme in Stuttgart.

#### KONTAKT/CONTACT

Dr. José Antonio Villajos Collado  
Jose-Antonio.Villajos@bam.de

Prozessanalytik  
Process Analytical Technology



# LANGFRISTIGE UND KONTINUIERLICHE FORSCHUNG FÜR DIE SICHERHEIT

## Abgeschlossene Wasserstoff-Projekte

| Themengebiet     | „geförderte Forschungsprojekte“                                   | externe Partner                                                                                                                                                                       | Projekthinhalt                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Zeitraum    |
|------------------|-------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Explosionsschutz | SAFEKINEX                                                         | TU Delft, CNRS, VU Brussels, Warsaw UT, TU Wroclaw, U Leeds, INERIS, BASF, U Karlsruhe                                                                                                | Sicherheitstechnische Kenngrößen bei atmosphärischen und nicht-atmosphärischen Bedingungen                                                                                                                                                                                                            | 2002-2006   |
|                  | PHAEDRUS                                                          | HyET Hydrogen BV, Daimler, Shell Global Solutions Int. B.V., Mines ParisTech/Armines Persee, ITM Power (Trading) limited, Hexagon Raufoss AS, Hochschule Esslingen, Uni-research BV   | Entwicklung einer voll elektrochemischen Wasserstoff-Tankstelle. Die BAM untersuchte das Sicherheitskonzept in Bezug auf den Explosionsschutz.                                                                                                                                                        | 2012 - 2015 |
|                  | Sichere Wasserstofftechnologien bei Leichter-als-Luft-Anwendungen | CL Cargolifter GmbH                                                                                                                                                                   | Der Einsatz von Wasserstoff von Leichter-als-Luft-Anwendungen in verschiedenen Verwendungsstadien wurde untersucht. Besondere Fokus wurde auf die Auf- bzw. Abbauphase eines 8-m <sup>3</sup> -Ballons gelegt, aber auch der Betrieb bei großen Temperaturschwankungen (Tag-Nacht-Zyklen) betrachtet. | 2014-2016   |
|                  | HY-CNG                                                            | DBI-GUT, BG ETEM                                                                                                                                                                      | Untersuchung des Einflusses der Beimischung verschiedenster Mengen an Wasserstoff zum Erdgas auf die sicherheitstechnischen Kenngrößen sowie Ermittlung der Konsequenzen für Explosionsschutzmaßnahmen bei Einspeisung von Wasserstoff in das Erdgasnetz ermittelt.                                   | 2015        |
| Infrastruktur    | H2FC                                                              | KIT, CEA, U Ulster, Inst f Energietechnik, HSE, JRC, FZ Jülich, Paul-Scherrer-Inst, Demokritos, U Perugia, CR Fiat, Tecnalia, U Pisa, Pro Science, NPL, SINTEF, VTT EMPA              | H2FC-Integration der europäischen Infrastruktur zur Unterstützung der Wissenschaft und Entwicklung von Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien im Hinblick auf eine europäische Strategie für nachhaltige, wettbewerbsfähige und sichere Energie                                                | 2011 - 2015 |
| Networking       | HYSAFE                                                            | 25 Partner aus Deutschland (5), Frankreich (3), Norwegen (3), Großbritannien (3), Niederlande (2), Spanien (2), Dänemark, Griechenland, Italien, Polen, Schweden, Russland und Kanada | Das von der EG finanzierte Exzellenznetzwerk (NoE) HySafe trägt zum sicheren Übergang zu einer nachhaltigeren Entwicklung in Europa bei, indem es die sichere Einführung von Wasserstofftechnologien und -anwendungen erleichtert.                                                                    | 2004-2009   |
| Tribologie       | Tribologische Test in Wasserstoffumgebung                         | ILT slr                                                                                                                                                                               | Verschleißschutzschichten für Raketentriebwerke                                                                                                                                                                                                                                                       | 2011        |
|                  | Hochleistungs-Polymerkomposite für Tribosysteme                   |                                                                                                                                                                                       | Reibungs- und Verschleißigenschaften von polymeren Verbundwerkstoffen in flüssigem und gasförmigem Wasserstoff                                                                                                                                                                                        | 2012-2016   |
|                  | Martensitische Stähle für Reibsysteme                             |                                                                                                                                                                                       | Untersuchung der Einsatzgrenzen von härtbaren Stählen in gasförmigem Wasserstoff                                                                                                                                                                                                                      | 2014-2017   |
| Speicherung      | StorHy                                                            | 36 Partner aus 12 Europäischen Ländern, bspw. BMW, DaimlerChrysler, Ford, MSF, PSA, Volvo, Air Liquide, Linde, Messer Griesheim                                                       | Die drei Speicheroptionen Druckspeicherung bei 700bar, tiefkalte Speicherung und Festspeicherung wurden in StorHy berücksichtigt. Die BAM war an der Erprobung von Prototypentanks, Sicherheitsstudien und pre-normativen Untersuchungen beteiligt.                                                   | 2004-2008   |
|                  | Hochdruck-Wasserstoffspeicherung in Glaskapillaren                | C.En Ltd                                                                                                                                                                              | Entwicklung eines neuartigen Hochdruck-Gasspeichers aus Glaskapillaren                                                                                                                                                                                                                                | 2008-2015   |

| Themengebiet            | „geförderte Forschungsprojekte“                                                            | externe Partner                                                                                                                                                                                                                                                 | Projekthinhalt                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Zeitraum    |
|-------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Speicherung             | HyCube                                                                                     | CEA, MCPHY, Raigi, University of Corsica, BAM, Wrocław University of Technology (WRUT)                                                                                                                                                                          | „Untersuchung von Hydridspeicherung, Druckspeicherung und Kombinationen aus beiden möglichen Wasserstoffspeicherungen. Die BAM erarbeitete Vorschläge für Zulassungsvorschriften für Faserverbunddruckbehälter auf Grundlage statistischer Bewertung der Ergebnisse zerstörender Prüfungen von Faserverbund-Druckbehältern.“                                                                                                                | 2011-2013   |
|                         | HyComp                                                                                     | Air Liquide, CEA, Composite Aquitaine, Faber Cylinders, Hexagon, Armines, Wrocław University of Technology (WRUT), BAM                                                                                                                                          | Entwicklung optimierter kostengünstiger Faserverbund-Druckgasspeicher für automobiler Wasserstoffspeicherung. Die BAM erarbeitete Vorschläge für verbesserte Auslegungs- und Prüfvorschriften die den Anforderungen von Faserverbundbehältern besser Rechnung tragen.                                                                                                                                                                       | 2011-2014   |
|                         | CRYOCODE                                                                                   | BMW AG, Linde AG, ET Technologie GmbH                                                                                                                                                                                                                           | Realisierung der tiefkalten Speicherung von gasförmigen Wasserstoff unter hohem Druck und Qualifizierung von kryogenen Druckgasspeichern für diesen Zweck. Die BAM erarbeitete Zulassungsregeln und einen Normierungsvorschlag mit sicherheitstechnisch notwendigen Validierungstests für diese neuartigen Kryodruck-Tanksysteme.                                                                                                           | 2013 - 2015 |
| Speicherung, Simulation | FiBreMoD                                                                                   | Siemens Industry Software NV, Toyota Motor Europe, University of Southampton, Imperial College London, Mines ParisTech Universität, Kath. Universität Leuven, Weizmann Institute of Science, Chomarat, 4Realsim, ACRATS Training Services und Diastron Limited. | Hauptziele des FibreMoD-Projekts ist die Entwicklung und Anwendung möglichst präziser Modelle zur Alterungsvorhersage von carbonfaserbasierten Verbundwerkstoffen. Der Beitrag der BAM ist die Betrachtung der zeitabhängige Schadensentwicklung in Druckbehältern unter Betriebsbelastung und deren Abgleich durch zerstörende Versuche.                                                                                                   | 2016-2020   |
| Sensorik                | H2Sense                                                                                    | AppliedSensor GmbH, SENSITRON SRL, UST Umweltsensortechnik GmbH, Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoffforschung                                                                                                                                            | „Der Einsatz von Wasserstoffsensoren kann in drei Arten von Anwendungen kategorisiert werden: Sicherheitsüberwachung, Lecksuche und Prozesskontrolle. Wenn sie in einem dieser Bereiche eingesetzt werden, erfüllen Wasserstoffsensoren /-messsysteme folgende Aufgaben:<br>- Detektion eines gefährlichen Zustandes<br>- Warnungen oder Alarmanzeigen bei Grenzwertüberschreitungen<br>- Überwachung und Steuerung des Systembetriebs<br>“ | 2013 - 2014 |
|                         | HAWABRA                                                                                    | TLTS GmbH und alpha board GmbH                                                                                                                                                                                                                                  | Detektion von Wasserstoff als Rauchgasprodukt in der sehr frühen Brandphase durch neuartige Sensoren in Abhängigkeit vom Brandszenario. Die BAM hat verschiedene definierte Brandszenarien im Labor- und Realmaßstab nachgestellt und die neuen Wasserstoffsensoren im Vergleich zu bestehenden Branddetektionssystemen bewertet.                                                                                                           | 2013 - 2015 |
| Werkstoffe              | Entwicklung von HACC Kriterien                                                             | AREVA NP                                                                                                                                                                                                                                                        | Eigenschaftsdegradation von Druckbehälter-Schweißverbindungen unter Wasserstoffeinfluss                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 2011 - 2014 |
|                         | Wasserstoffbarrieren aus Glas                                                              | TU Clausthal                                                                                                                                                                                                                                                    | Methodenentwicklung zur Messung Wasserstoffpermeabilität, Untersuchung des Einflusses von Glaszusammensetzung und -struktur                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 2011-2018   |
|                         | Wasserstoffpermeation in pressgehärteten Stählen                                           | Volkswagen AG                                                                                                                                                                                                                                                   | Mikrostruktur- und Wärmebehandlungseinfluss auf das Wasserstoff-Diffusionsverhalten von warmumgeformten Stählen                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 2014        |
|                         | Vermeidung wasserstoffunterstützter Kaltrisse beim Schweißen höherfester Feinkornbaustähle | Uni Magdeburg                                                                                                                                                                                                                                                   | Beitrag zur sicheren Auslegung von Schweißkonstruktionen aus höherfestem Feinkornbaustahl unter Nutzung der technischen und wirtschaftlichen Vorteile des modifizierten Sprühlichtbogen-Prozesses. Berücksichtigung der Reduktion der kostenintensiven Nacharbeiten von wasserstoffunterstützten Kaltrissbildungen.                                                                                                                         | 2015-2018   |

# LONG-TERM AND CONTINUOUS RESEARCH FOR SAFETY

## Completed hydrogen projects

| Topic                | Funded research projects                                     | External partners                                                                                                                                                                   | Project scope                                                                                                                                                                                                                     | Period      |
|----------------------|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Explosion protection | SAFEKINEX                                                    | TU Delft, CNRS, VU Brussels, Warsaw UT, TU Wroclaw, U Leeds, INERIS, BASF, U Karlsruhe                                                                                              | Safety characteristics at ambient and non-ambient conditions                                                                                                                                                                      | 2002-2006   |
|                      | PHAEDRUS                                                     | HyET Hydrogen BV, Daimler, Shell Global Solutions Int. B.V., Mines ParisTech/Armines Persee, ITM Power (Traiding) limited, Hexagon Raufoss AS, Hochschule Esslingen, Uniresearch BV | Development of a fully electrochemical hydrogen filling station. BAM examined the safety concept with regard to explosion protection.                                                                                             | 2012 - 2015 |
|                      | Safe hydrogen technologies for lighter-than-air applications | CL Cargolifter GmbH                                                                                                                                                                 | Safe hydrogen technologies for lighter-than-air applications                                                                                                                                                                      | 2014-2016   |
|                      | HY-CNG                                                       | DBI-GUT, BG ETEM                                                                                                                                                                    | Study on the consequences of hydrogen admixture to the existing natural gas grid considering the safety characteristics of the gas mixtures and the measures of explosion protection.                                             | 2015        |
| Networking           | HYSAFE                                                       | 25 partners from Germany (5 partners), France (3), Norway (3), UK (3), Netherlands (2), Spain (2), Denmark, Greece, Italy, Poland, Sweden, Russia and Canada                        | The EC funded Network of Excellence (NoE) Hy-Safe contributes to the safe transition to a more sustainable development in Europe by facilitating the safe introduction of hydrogen technologies and applications.                 | 2004-2009   |
| Infrastructure       | H2FC                                                         | KIT, CEA, U Ulster, Inst f Energiteknikk, HSE, JRC, FZ Jülich, Paul-Scherrer-Inst, Demokritos, U Perugia, CR Fiat, Tecnalia, U Pisa, Pro Science, NPL, SINTEF, VTT EMPA             | H2FC-Integrating European Infrastructure to support science and development of Hydrogen- and Fuel Cell Technologies towards European Strategy for Sustainable, Competitive and Secure Energy                                      | 2011 - 2015 |
| Tribology            | Tribological tests in hydrogen environment                   | ILT slr                                                                                                                                                                             | Wear protection layers for rocket engines                                                                                                                                                                                         | 2011        |
|                      | High-performance polymer composites for tribological systems |                                                                                                                                                                                     | Friction and wear properties of polymeric composite materials in liquid and gaseous hydrogen                                                                                                                                      | 2012-2016   |
|                      | Martensitic steels for friction systems                      |                                                                                                                                                                                     | Examination of the application limits of hardenable steels in gaseous hydrogen                                                                                                                                                    | 2014-2017   |
| Storage              | StorHy                                                       | Total of 36 partners from 12 European countries, e.g. BMW, DaimlerChrysler, Ford, MSF, PSA, Volvo, Air Liquide, Linde, Messer Griesheim                                             | The three storage options pressure storage at 700bar, cryogenic storage and solid storage were taken into account in StorHy. BAM was involved in the testing of prototype tanks, safety studies and pre-normative investigations. |             |
|                      | High pressure hydrogen storage in glass capillaries          | C.En Ltd                                                                                                                                                                            | Development of glass capillaries/capillary systems for the safe use as hydrogen storage system                                                                                                                                    | 2008-2015   |

| Topic                   | Funded research projects                                                               | External partners                                                                                                                                                                                                                                               | Project scope                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Period      |
|-------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Storage                 | HyCube                                                                                 | CEA, MCPHY, Raigi, University of Corsica, BAM, Wrocław University of Technology (WRUT)                                                                                                                                                                          | Investigation of hydridstorage, pressure storage and combinations of these two storage forms for hydrogen applications. BAM prepared suggestions of type approval specifications based on statistical assessment for destructive composite pressure vessel tests.                                                                                                                             | 2011-2013   |
|                         | HyComp                                                                                 | Air Liquide, CEA, Composite Aquitaine, Faber Cylinders, Hexagon, Armines, Wrocław University of Technology (WRUT), BAM                                                                                                                                          | Development of economic optimised fibre reinforced composite pressure vessels for automotive hydrogen storage. BAM developed improved design and test specifications for a higher safety level of fibre reinforced pressure vessels.                                                                                                                                                          | 2011-2014   |
|                         | CRYOCODE                                                                               | BMW AG, Linde AG, ET Technologie GmbH                                                                                                                                                                                                                           | Realisation of cryogenic storage of gaseous hydrogen under high pressure and qualification of crygenic pressure storage systems for this kind of application. BAM prepared approval regulations and a standardization approach with necessary validation tests for these new cryogenic storage systems.                                                                                       | 2013 - 2015 |
| Speicherung, Simulation | FiBreMoD                                                                               | Siemens Industry Software NV, Toyota Motor Europe, University of Southampton, Imperial College London, Mines ParisTech Universität, Kath. Universität Leuven, Weizmann Institute of Science, Chomarat, 4RealSim, ACRATS Training Services und Diastron Limited. | The main goal of the FibreMoD project is the development and application of precise models for the prediction of ageing of carbon fiber-based composites. BAM's contribution is the consideration of the time-dependent development of damage in pressure vessels under operational load and their comparison by destructive tests.                                                           | 2016-2020   |
| Sensor system           | H2Sense                                                                                | AppliedSensor GmbH, SENSI-TRON SRL, UST Umweltsensortechnik GmbH, Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoffforschung                                                                                                                                           | The use of hydrogen sensors can be categorized into three types of application: Safety monitoring, Leak detection, process control. When applied in one of these areas hydrogen sensors fulfill the following tasks:<br>- Indicate a hazardous condition<br>- Provide warnings or alarms for out-of-limits conditions<br>- Monitor and control System Operation<br>- Provide performance data | 2013 - 2014 |
|                         | HAWABRA                                                                                | TLTS GmbH und alpha board GmbH                                                                                                                                                                                                                                  | Detection of hydrogen as a flue gas product in the very early fire phase using new sensors depending on the fire scenario. BAM has recreated various defined fire scenarios on laboratory and real scale and evaluated the new hydrogen sensors in comparison to existing fire detection systems.                                                                                             | 2013 - 2015 |
| Material                | Development of a HACC criterion                                                        | AREVA NP                                                                                                                                                                                                                                                        | Property degradation of pressure vessel welds under the influence of hydrogen                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 2011 - 2014 |
|                         | Hydrogen barriers made of glass                                                        | TU Clausthal                                                                                                                                                                                                                                                    | Development of methods for measuring hydrogen permeability, investigation of the influence of glass composition and structure                                                                                                                                                                                                                                                                 | 2011-2018   |
|                         | Hydrogen permeation in press hardened steels                                           | Volkswagen AG                                                                                                                                                                                                                                                   | Microstructure and heat treatment influence on the hydrogen diffusion behavior of hot-formed steels                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 2014        |
|                         | Avoidance of hydrogen-assisted cold cracks in welded high-strength fine-grained steels | Uni Magdeburg                                                                                                                                                                                                                                                   | Contribution to the safe design of welded structures made of high-strength fine-grained structural steel using the technical and economic advantages of the modified spray arc process. Consideration of the reduction of the cost-intensive reworking of hydrogen-assisted cold cracking.                                                                                                    | 2015-2018   |

# PRÜFEINRICHTUNGEN, PRÜFTECHNIK

## TESTING EQUIPMENT AND FACILITIES

Um die vielfältigen Themengebiete und Fragestellungen rund um das Aktivitätsfeld Wasserstoff geeignet bearbeiten zu können, gibt es in der BAM eine Vielzahl von z.T. unikalen Prüfeinrichtungen und Laboren. Neben den drei Standorten in Berlin unterhält die BAM ein Testgelände 60 km südlich von Berlin, auf dem u. a. Brandprüfungen, Fallprüfungen und auch Hochgeschwindigkeits-Durchstoßversuche durchgeführt werden können.

BAM has a large number of partly unique testing facilities and laboratories to address the various topics and questions relating to hydrogen as a field of activity in a suitable manner. In addition to three locations in Berlin, BAM maintains a test site 60 km south of Berlin, where test plots for fire tests, drop tests and even high velocity impact tests are located.

### Brandprüfstände

In den Brandprüfständen untersucht die BAM die thermische Belastbarkeit von Werkstoffen, Bauteilen oder -gruppen. Wärmeeinträge von bis zu  $110 \text{ kW/m}^2$  in sehr großem Maßstab sind genauso möglich wie punktuelle lokale Unterfeuerungen.



Wasserstoff-Druckbehälter  
während einer Teilunter-  
feuerung

Hydrogen pressure vessel  
during partial underfiring

### Fire Test Stands

In the fire test facilities BAM investigates the thermal load capacity of materials, components or assemblies. Heat input of up to  $110 \text{ kW/m}^2$  on a very large scale is just as possible as selective local underfiring.

### Fallprüfstände

Unterschiedlich große Fallprüfstände erlauben der BAM Prüfungen aus bis zu 9 Metern Höhe und bis zu 200 Tonnen Gesamtgewicht.



Fallprüfstand

Drop test facility

### Drop impact test facilities

Drop test stands of different sizes allow BAM to perform tests from a height of up to 9 metres and a total weight of up to 200 tonnes.

## Fernsteuerbare gravimetrische Gasfülleinrichtung

Die voll fernsteuerbare gravimetrische Gasfülleinrichtung für das Füllen (nach Druck oder Masse) aus sicherer Entfernung ermöglicht sicherheitskritische Prüfungen an Druckgasbehältern unter Extremlasten (z.B. Brand- und Impactprüfungen). Der zu prüfende Druckbehälter kann mit bis zu 700 bar Wasserstoff aus einer max. fernsteuerbaren Entfernung von 300 Metern gefüllt werden. Eine Notentlastung des Prüfmusters, d.h. Abbruch der Prüfung bei ungewollten Versuchssituationen, ist zu jeder Zeit möglich.

## Remote-controlled gravimetric gas filling equipment

Fully remote-controlled gravimetric gas filling equipment for filling (by pressure or mass) from a safe distance when performing safety-critical tests on gas cylinders under extreme loads (e.g. fire and impact tests). The pressure vessel being tested can be filled with up to 700 bar hydrogen from a max. remotely controllable distance of 300 m. Emergency relief of the test sample, i.e. termination of the test in case of unintended test situations, is possible at any time.

## Gasanalytik

Die BAM betreibt ein gut ausgestattetes Laboratorium für Vergleichsanalytik mit Schwerpunkt Energiegase und Automobil-Abgase. Es bestehen Verfahren zur Spurenanalytik von Reinstgasen, die derzeit massiv auf Wasserstoff ausgebaut werden, sowie für die Zertifizierungsanalytik von synthetischen Spezialgasen mit Prozess-Gaschromatographie. Daneben werden diverse Füllstände und Wägevorrichtungen für die Herstellung primärer Gasnormale eingesetzt und weiterentwickelt.

## Gas analysis

BAM operates a well-equipped laboratory for comparing gas composition with a focus on energy gases and automobile exhaust gases. There are procedures for trace analysis of high purity gases, which are currently massively expanded for hydrogen, as well as for certification analysis of special gases with process gas chromatography. In addition, various filling devices and weighing equipment are used and further developed to produce primary gas standards.

## Hochgeschwindigkeits-Durchschlagversuche

Der Prüfstand ermöglicht Durchschlagprüfungen an gasgefüllten Druckbehältern aus Distanzen von 5 bis 50 Metern.

## High velocity impact tests

The test stand enables puncture testing of gas-filled pressure vessels from distances of 5 to 50 m.

*Prüfstand für  
Durchschlagprüfung*

*Test facility for a  
puncture test*



## Hydraulische Berst- und Zeitstandprüfstände

Hydraulische Prüfstände für Berst- und Zeitstandsprüfungen erlauben Tests an Druckbehältern bis zu einem maximalen Druck von 3500 bar. In den bis über 85 °C beheizbaren Prüfkammern können Druckanstiegsraten von weniger als einem bar pro Tag bis über 600 bar/min realisiert werden. Auch Zeitstandsprüfungen unter hohen Temperaturen und konstantem Druck über einen Zeitraum von mehreren Monaten lassen sich in diesen Prüfständen mit sehr hoher Regelgenauigkeit realisieren.

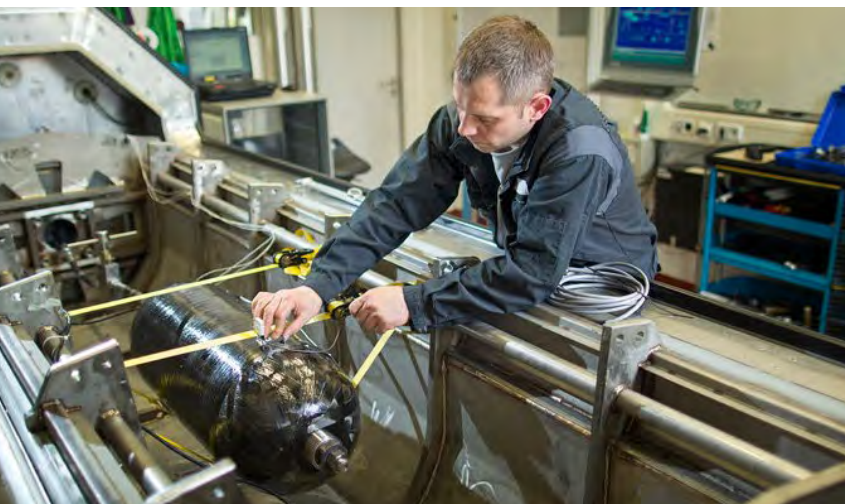
## Hydraulic bursting and creep test facilities

Hydraulic test benches for burst and creep tests on pressure vessels up to a maximum pressure of 3500 bar. In the test chambers, which can be heated to over +85 °C, rates of pressure increasing by less than one bar per day to over 600 bar/min can be achieved. Even creep tests under high temperatures and constant pressure over a period of several months can be carried out in these test facilities with very high control accuracy.



Vorbereitung einer Berstprüfung an Druckbehältern

Preparing for a burst test on pressure vessels



Vorbereitung einer Innendruckprüfung an Druckbehältern

Preparing a load cycle test on pressure vessels

## Hydraulischer Lastwechselpfstand

Hydraulischer Prüfstand zur zyklischen Innendruckbelastung von Druckbehältern bis zu einem maximalen Druckbereich von 1200 bar erlaubt Versuche in einem Temperaturbereich von -50 bis +90 °C. Zyklargeschwindigkeiten bis zu 30 Zyklen/min mit sehr hoher Regelgenauigkeit und vielfältigen Belastungsprofilen sind möglich.

## Hydraulic load cycle test facility

Hydraulic test bench for cyclic internal pressure loading of pressure vessels up to a maximum pressure range of 1200 bar in a temperature range from -50 to +90 °C. Cycle speeds of up to 30 cycles/min with very high control accuracy and various load profiles are possible.

## Prüffeld zur Untersuchung von Brand- und Explosionsgefahren

Im größeren Maßstab bzw. Realmaßstab können Untersuchungen mit Anlagen bzw. Anlagenteilen durchgeführt werden, welche mit Wasserstoff arbeiten. Dabei können z. B. an verschiedenen Stellen Konzentrationen gemessen werden, um Fragen hinsichtlich der Auswirkungen von Leckagen zu klären. Im Weiteren können auch Zündversuche mit freigesetztem Wasserstoff durchgeführt werden, um die Auswirkungen auf die Anlage und die Umgebung zu quantifizieren.

## Test field for the investigation of fire and explosion hazards

Investigations can be carried out on a larger and realistic scale with systems or system components that work with hydrogen. For example, concentrations can be measured at different points to clarify questions about the impacts of leaks. Furthermore, ignition tests with released hydrogen can be carried out to quantify the impacts on the system and the environment



*Prüffeld Brand- und Explosionsgefahren*

*Fire and explosion hazard test field*

## Prüfstände für den Explosionsschutz

In den Prüfständen werden die sicherheitstechnischen Eigenschaften von Gasgemischen bei Prozessbedingungen (Explosionsgrenzen, Zündtemperaturen, Explosionsdrücke etc.) untersucht.

## Test stands for explosion protection

The test stands are used to investigate the safety-related properties of gas mixtures under process conditions (explosion limits, ignition temperatures, explosion pressures, etc.).

*Druckfester Fensterautoklav für die visuelle Untersuchung von Explosionsvorgängen bei Erhöhung von Druck und Temperatur*

*Pressure-resistant windowed autoclave for the visual investigation of explosion processes at increased pressure and temperature*



## Sprengplatz

Auf dem BAM Testgelände Technische Sicherheit (TTS) steht ein Sprengplatz mit einem Durchmesser von 400 Metern zu Verfügung. Für Versuche größeren Ausmaßes kann auch ein Sperrradius von bis zu 1000 Metern eingerichtet werden. Dies erlaubt unter anderem Unterfeuerungsversuche mit Wasserstofftanks, sowohl mit als auch ohne Sicherheitseinrichtung. Zur Quantifizierung der Auswirkungen bei einem solchen Behälterversagen steht umfangreiche, freifeldtaugliche Messtechnik zur Verfügung.



*Sprengplatz auf dem BAM TTS*

*Explosion ground at the BAM TTS*

## Explosion ground

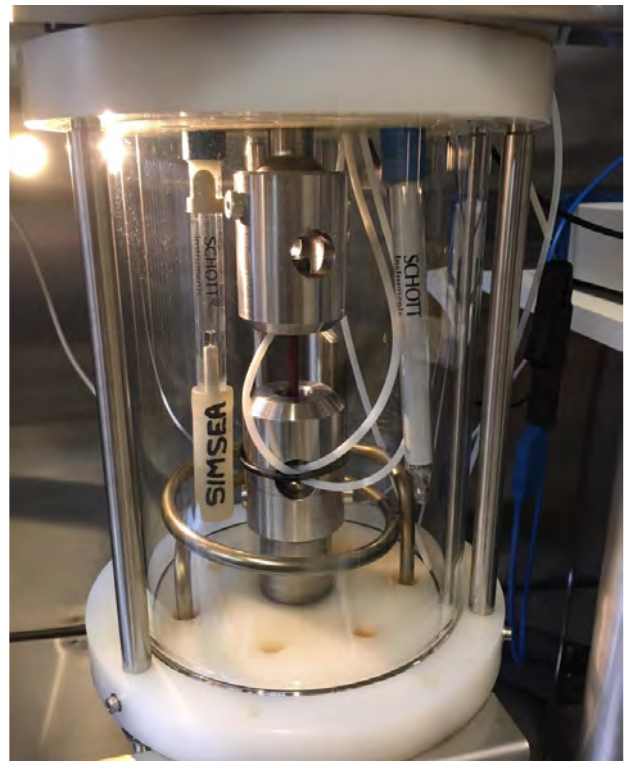
There is an explosion ground with a diameter of 400m at the BAM Test Site for Technical Safety (TTS). For larger scale experiments, a cordoned-off radius of up to 1000m can also be arranged. This allows underfiring tests with hydrogen tanks, both with and without safety equipment to be carried out, among other aspects. To quantify the effects of such a vessel failure, extensive, free-field measurement technology is available.

## SSRT - Slow strain-rate tests

Um möglichst für alle genannten Randbedingungen zuverlässige Werkstoffkennwerte zu ermitteln, steht Prüftechnik zur Messung der mechanischen Festigkeit bei langsamer (SSRT) oder zyklischer Belastung zur Verfügung. Die Werkstoffe werden dabei elektrochemisch mit Wasserstoff beladen, wodurch hohe H-Konzentrationen im Werkstoff erreicht werden können. In naher Zukunft werden solche Messungen auch mit Beladung durch gasförmigen Wasserstoff bei Drücken bis 1000 bar möglich sein, was den realen Bedingungen in Komponenten z.B. in Tankstellen oder Brennstoffzellen-Fahrzeugen eher entspricht.

### Zugprüfung mit wasserstoffbeladenen Proben

Die gezielte Einstellung unterschiedlicher Wasserstoffkonzentrationen in metallischen Mikrostrukturen und die Zugprüfung solch beladener Proben bei nicht zu großen Dehnraten ermöglicht die Bestimmung kritischer Konzentrationen, die zu einer Degradation der mechanischen Eigenschaften, insbesondere der Duktilität der Werkstoffe, führen.



*SSRT*

---

## SSRT - Slow strain-rate tests

In order to determine reliable material characteristics for all mentioned boundary conditions, testing technology is available for measuring the mechanical strength under slow (SSRT) or cyclic load. The materials are electrochemically hydrogen charged, which allows high H concentrations to be achieved in the materials. In the near future, such measurements will also be possible with H-charging from gaseous hydrogen at pressures

up to 1000 bar, which is more in line with the real conditions in components e.g. in filling stations or fuel cell vehicles.

## Tensile test with hydrogen charged samples

The specific adjustment of different hydrogen concentrations in metallic microstructures and the tensile testing of such charged specimens at strain rates that are not too high allows the determination of critical concentrations leading to a degradation of the mechanical properties, especially the ductility of the materials.

---

## Teststand für Hochdruck-Adsorption

Das Gerät kann volumetrische isotherme Gasadsorptionsexperimente mit festen Materialien bei verschiedenen Druckwerten (bis zu 200 bar) und jeder kontrollierten Temperatur durchführen. Das Gerät wurde speziell für den Betrieb mit Wasserstoff bei hohem Druck und kryogenen Temperaturen entwickelt. Die Kalibration erfolgt regelmäßig mit einem SiO<sub>2</sub>-BAM-Referenzmaterial (CRM BAM-PM-101).

## High-Pressure Volume Analyzer

The device can perform volumetric isothermal gas-adsorption experiments with solid materials at different pressure values (up to 200 bar) and any controlled temperature. The device has been specially designed to operate with hydrogen at high-pressure and cryogenic temperatures. It is regularly calibrated against a SiO<sub>2</sub> BAM reference material (CRM BAM-PM-101) material.

---

*Teststand für Hochdruck-  
Adsorption von Wasserstoff*

*High-Pressure Volume  
Analyzer for Hydrogen*



## TGHE - Trägergasheißextraktion (CGHE)

Der Bruker G4 PHOENIX und G8 GALILEO ermöglichen mit dem TGHE-Verfahren eine schnelle Bestimmung des Wasserstoffs in Metallen mit Stickstoff als Trägergas. Der beim Aufheizen der Probe freigesetzte Wasserstoff wird mit Wärmeleitfähigkeitsdetektor (WLD) oder über ein gekoppeltes Massenspektrometer (G8 GALILEO) erfasst. Die Analysatoren sind dazu mit einem schnell aufheizenden (und abkühlenden) infrarotbeheizten Klappofen (bis 950 °C) ausgestattet. Der große Durchmesser des Quarz-Auslagerungsrohres von 30 mm ermöglicht die Analyse von größeren oder geschweißten Proben (u.a. nach ISO 3690 und AWS A4.3). Der Ofen ermöglicht die Anwendung von Temperatur-Programmen (Rampen und Stufen), mit denen Informationen über unterschiedlich gebundenen Wasserstoff erhalten werden. Der G8 verfügt zudem über die Möglichkeit zur Schmelzextraktion und Sauerstoff- und Stickstoffbestimmung (hier dann Helium als Trägergas).

## The Carrier gas hot extraction (CGHE)

The Bruker G4 PHOENIX and G8 GALILEO use the CGHE technique for rapid determination of hydrogen in metals with nitrogen as carrier gas. The hydrogen released when the sample is heated is detected by a thermal conductivity detector (WLD) or a coupled mass spectrometer (G8 GALILEO). For this purpose, the analyzers are equipped with a rapid heating (and cooling) infrared-heated hinged furnace (up to 900 °C). The large diameter of the quartz aging tube of 30 mm allows the analysis of larger or welded samples (e.g. according to ISO 3690 and AWS A4.3). The furnace allows the use of temperature programs (ramps and steps) to obtain information about differently trapped hydrogen. The G8 also has the possibility of melt extraction and oxygen and nitrogen determination (here helium as carrier gas).



ToF-SIMS

## ToF-SIMS - Flugzeit-Sekundärionen-massenspektrometrie

Diese Methode ermöglicht die Verteilung von Wasserstoff (bzw. Deuterium) im Gefüge metallischer Werkstoffe mit hoher lateraler Auflösung ex-situ und in-situ abzubilden. Die Integration mit Rasterelektronenmikroskopie (REM) und Elektronenrückstreubeugung (EBSD) erlaubt es, die lokalen Wasserstoffkonzentrationen zu bestimmen und die Auswirkungen auf die Mikrostruktur zu ermitteln.

## Time-of-Flight Secondary Ion Mass Spectrometer

This method enables to depict ex-situ and in-situ the distribution of hydrogen (deuterium) in metallic materials with high lateral resolution. The integration of scanning electron microscopy and electron back-scatter diffraction allows to observe the local hydrogen concentrations and to investigate the impact on the microstructure.

## Wasserstofflabor

Für Reibungs- und Verschleißmessungen in gasförmigem und flüssigem Wasserstoff ( $T = -253\text{ °C}$ ), verfügt die BAM über ein mit der entsprechenden Sicherheitsausstattung ausgerüstetes, europaweit einzigartiges Labor. Es besteht aus zwei Versuchskammern und einem Überwachungsraum in denen insgesamt sechs Versuchsanlagen betrieben werden. Neben Tests in Flüssigwasserstoff sind auch Messungen in Flüssigmethan (Siedetemperatur:  $-162\text{ °C}$ ), dem Hauptbestandteil von Erdgas möglich. Mit inerten Kältemitteln können Temperaturen bis  $-269\text{ °C}$  (Siedetemperatur von Helium) erreicht werden. Für Messungen in gasförmigem Wasserstoff stehen Apparaturen für Drücke bis 100 bar zur Verfügung. Die Prüftechnik wird gegenwärtig für Zugversuche und Ermüdungstests bis 1000 bar ausgebaut.

## Hydrogen laboratory

For friction and wear tests in gaseous and liquid hydrogen ( $T = -253\text{ °C}$ ), BAM operates a laboratory with 6 test rigs which is unique in Europe. It consists of two test chambers with the required safety installations and a control room. Beside tests in liquid hydrogen, also measurements in liquid methane (boiling temperature:  $-162\text{ °C}$ ), the main component of natural gas, are possible. With inert coolants temperatures as low as  $-269\text{ °C}$  (boiling temperature of helium) can be reached. For tests in gaseous hydrogen test devices for pressures up to 100 bar are available. Currently, the equipment is extended to tensile and fatigue tests with pressures up to 1000 bar.



**ANSPRECHPARTNER**  
*CONTACT PERSONS*

Sie erreichen uns zentral unter  
*You can reach us under*

Tel.: +49 30 8104-8080  
H2Safety@bam.de  
www.bam.de/h2safety

Themenfeld Energie  
*Energy focus areas*

Dr.-Ing. Thomas Goedecke  
Tel.: +49 30 8104-1300  
Fax: +49 30 8104-71300  
Thomas.Goedecke@bam.de

Prof. Dr.-Ing. Thomas Böllinghaus  
Tel.: +49 30 8104-1020  
Fax: +49 30 8104-71020  
Thomas.Boellinghaus@bam.de

Ansprechpartner Wasserstoff  
*Contact Persons Hydrogen*

Dr.-Ing. Georg Mair  
Tel.: +49 30 8104-1324  
Fax: +49 30 8104-71324  
Georg.Mair@bam.de

Dr. rer. nat. Kai Holtappels  
Tel.: +49 30 8104-1240  
Fax: +49 30 8104-71240  
Kai.Holtappels@bam.de

**Impressum**

Herausgeber/*Publisher*:  
Bundesanstalt für Materialforschung  
und -prüfung (BAM)  
Unter den Eichen 87,  
12205 Berlin

Postanschrift/*Address*: 12200 Berlin

Telefon/*Fon*: +49 30 8104-0  
Telefax/*Fax*: +49 30 8112029  
E-Mail: presse@bam.de  
Internet: www.bam.de

Redaktion/*Editor*:  
Eric Duffner u. Stefan Jacobasch (BAM)  
Bildnachweis/*Images*: Alle Fotos und Grafiken,  
wenn nicht anders vermerkt: BAM  
06/2020





---

Bundesanstalt für Materialforschung  
und -prüfung (BAM)  
Unter den Eichen 87  
12205 Berlin, Germany

✉ [Info@bam.de](mailto:Info@bam.de)  
🌐 [www.bam.de](http://www.bam.de)