BAM

Bundesanstalt für
Materialforschung
und -prüfung

Sicherheit in Technik und Chemie

Kompetenzzentrum
H_2Safety@BAM

Unser Beitrag zur nationalen und europäischen Wasserstoffstrategie

Inhalt

Beiträge der BAM zu den Herausforderungen der nationalen und europäischen Wasserstoffstrategie **2**

Mission und Vision **4**

Unser Beitrag zur Sicherheit in der Wasserstoffgesellschaft **6**

Schwerpunkte und Expertise zu den verzahnten Kompetenzfeldern der BAM im Bereich Wasserstofftechnologien 8

Wasserstoffthemen an der BAM entlang der Wertschöpfungskette 9

Einsatzmöglichkeiten bestehender und zukünftiger Transport- und Speicher-infrastruktur für Wasserstoff 11

Selbstheilung von Rissen in Glas-Dichtungen für Hochtemperatur-Brennstoffzellen 12

Ermittlung der sicheren Lebensdauer von Druckgasspeichern für Wasserstoff 13

Zertifizierte Referenzmaterialien und Referenzmessungen 14

Mess- und Prüfverfahren für Wasserstoffsensorik 15

Elektrolyse 16

Digitale Qualitätsinfrastruktur (QI) für Wasserstofftankstellen 17

Methoden der Risikoanalyse und Konsequenzbetrachtung 18

Umsetzungsmaßnahmen mit Blick auf 2030 **19**

Beiträge der BAM zu den Herausforderungen der nationalen und europäischen Wasserstoffstrategie

Wasserstoff ist ein zentraler Bestandteil der Energiewende[1] und des Europäischen Grünen Deals[2] für ein klimaneutrales Europa. Um die bis 2050 definierten Zielstellungen realisieren zu können, haben die EU und die Bundesregierung einen Handlungsrahmen entworfen und investieren langfristig in Forschung, Entwicklung und in die rasche Umsetzung innovativer Wasserstofftechnologien. Die Wasserstoffstrategie soll, betrachtet über die gesamte Wertschöpfungskette, von der Erzeugung, über den Transport und die Speicherung von Wasserstoff bis zur Bereitstellung dazu beitragen, im Energiesektor Versorgungssicherheit, Bezahlbarkeit und Wirtschaftlichkeit der Technologien sowie Umwelt- und Klimaverträglichkeit zu realisieren.

Bedingung für eine erfolgreiche Energiewende und die wirtschaftliche Nutzung von Wasserstoff als sauberen grünen Energieträger sowie für H_2-Readiness sind ein zügiger Markthochlauf sowie die Etablierung der dafür notwendigen Wertschöpfungsketten im nationalen und europäischen Rahmen. Verlässliche Qualitäts- und Sicherheitsstandards für innovative Technologien sind die Voraussetzung für die Gewährleistung von Versorgungssicherheit, für Umweltverträglichkeit und nachhaltigen Klimaschutz, für den Aufbau von Vertrauen in diese Technologien und ermöglichen damit Produkt- und Prozessinnovationen.

Hier setzt die Wasserstoffstrategie der BAM an. Sie schafft wichtige Voraussetzungen dafür, dass der Markthochlauf gelingt und wie in der nationalen Wasserstoffstrategie der Bundesregierung und der EU gefordert, die technische Sicherheit inkl. Überwachung der Infrastrukturen und Anlagen von der Erzeugung, über den Transport bis zur Speicherung und Nutzung von Wasserstoff als Energieträger der Zukunft gewährleistet ist. Die BAM nutzt ihre langjährige Erfahrung im Umgang mit Wasserstofftechnologien, um über die gesamte Wertschöpfungskette die erforderlichen Qualitäts- und Sicherheitsstandards für neue Wasserstofftechnologien zu entwickeln und damit den sicheren Einsatz dieser Technologien im Markt zu fördern. Die dafür an der BAM vorhandene umfangreiche Expertise reicht von der sicherheitstechnischen Bewertung von Infrastrukturen für die Energieerzeugung mit Windkraftanlagen über Power-to-X-Technologien, die Sektorkopplung, die Beurteilung von Materialien und Umschließungssystemen für den Transport und die Speicherung von Wasserstoff bis zur sicherheitstechnischen Beurteilung von Wasserstoff und Wasserstoffgasgemischen und der Entwicklung neuer Messmethoden sowie der Erarbeitung entsprechender Regularien, Normen und Standards.

Gleichzeitig hat die BAM notwendige Querschnittbereiche im Blick, die für den Markthochlauf entscheidend sind. Dazu gehören die Berücksichtigung und Beantwortung regulatorischer Fragestellungen und Know-how im Risikomanagement genauso wie die Nutzung digitaler Werkzeuge im Qualitätsmanagement, um verlässliche, fallbezogene Voraussagen treffen zu können.

Die BAM sieht ihre Verantwortung darüber hinaus in der Aus- und Weiterbildung von Fach- und Führungskräften und des wissenschaftlichen Nachwuchses, auch weit über den eigenen Bedarf hinaus. Qualifizierte Arbeitskräfte sind erforderlich, um die Wasserstofftechnologien zukünftig nachhaltig und sicher zu beherrschen und den Strukturwandel insgesamt erfolgreich zu gestalten.

Die BAM ist in den relevanten nationalen und internationalen wissenschaftlichen Communities, Verbänden, Gremien und Netzwerken im Bereich der Wasserstofftechnologien integriert. Sie baut im Rahmen von nationalen und internationalen Forschungsverbünden und durch einen aktiven Wissens- und Technologietransfer ihre wissenschaftliche Expertise im Bereich der Wasserstofftechnologien und ihr Partnernetzwerk kontinuierlich weiter aus. Die BAM steht im regelmäßigen, engen Austausch mit Wirtschaft, Politik, Gesellschaft und Wissenschaft, um ihre Wasserstoffstrategie an den jeweils aktuellen Erfordernissen auszurichten.

[1]Die Nationale Wasserstoffstrategie
https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?__blob=publicationFile&v=16

[2]Der europäische Grüne Deal
https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:b828d165-1c22-11ea-8c1f-01aa75ed71a1.0021.02/DOC_1&format=PDF
A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe
https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/hydrogen_strategy.pdf

Mission und Vision

Sicherheit macht Märkte.

Im Rahmen ihrer gesetzlichen und gesellschaftspolitischen Aufgaben identifiziert die BAM Anforderungen an die Sicherheit in Technik und Chemie für die Gesellschaft von morgen. In diesem Zusammenhang ist die Gewährleistung der Sicherheit der Wasserstofftechnologien Grundvoraussetzung für H_2-Readiness und die erfolgreiche Markteinführung der Technologien. Sie leistet damit einen entscheidenden Beitrag für die Realisierung der Energiewende und Einhaltung der Klimaschutzziele. Verlässliche Qualitäts- und Sicherheitsstandards von Innovationen stellen bei Markteinführung einen Wettbewerbs- und Standortvorteil für Unternehmen dar und sichern die Akzeptanz der neuen Technologien ab.

Wir schaffen Vertrauen in die Wasserstofftechnologie.

Mit dem Kompetenzzentrum „H_2Safety@BAM“ schafft die BAM die sicherheitstechnischen Voraussetzungen für einen erfolgreichen Einsatz von Wasserstofftechnologien auf nationaler sowie europäischer Ebene.

Dafür forscht, prüft und berät die BAM ganzheitlich und interdisziplinär unter einem Dach – im Kompetenzzentrum H_2Safety@BAM. Die Aktivitäten des Kompetenzzentrums konzentrieren sich insbesondere auf die Gewährleistung der Sicherheit von Infrastrukturen, Anlagen und Prozessen sowie von innovativen Transport- und Speicherungssystemen von Wasserstoff auf Basis einer digitalen Qualitätsprüfung und der experimentellen Erprobung von Bauteilen und Systemen. Sie schafft somit die Voraussetzungen für die Umsetzung und Anpassung rechtlicher Rahmenbedingungen sowie für die Standardisierung und die Normung. Damit eng verbunden sind Untersuchungen der Eigenschaften und Kompatibilität von metallischen Werkstoffen und Polymeren sowie von Reibsystemen für den sicheren Betrieb von Komponenten, Anlagen, Prozessen und Systemen. Dieser interdisziplinäre und ganzheitliche Ansatz wird über die gesamte Wasserstoffwertschöpfungskette durch die Entwicklung von Gasanalytik und geeigneter Sensoren, durch Online-Messungen von Gaseigenschaften in der Prozesskontrolle, Testszenarien unter Realbedingungen sowie durch Auswirkungsbetrachtungen von Unfällen und daraus abgeleiteter Risikobewertungen und Risikosteuerungssystemen ergänzt. Die BAM bildet mit ihrem Aufgaben- und Kompetenzportfolio Vertrauen in die Sicherheit und Zuverlässigkeit der technischen System-Lösungen für Wasserstoff.

Sichere Wasserstofftechnologien sind Innovationsmotor für Wohlstand.

Die Aktivitäten der BAM konzentrieren sich im Wesentlichen auf Projekte der höheren Technologiereifestufen (TRL 4-9). Die Projekte schließen die Überprüfung der Technologie in der Laborumgebung, die Demonstration von Prototypen sowie die Überprüfung von Gesamtsystemen unter Realbedingungen ein. Besonderes Augenmerk wird darauf gerichtet, an der BAM sicherheitstechnische Fragestellungen zukünftig noch intensiver mit der Grundlagenforschung zu verknüpfen (TRL 1-3). Inhaltliche Beispiele dafür sind Untersuchungen von Mechanismen der

Wasserstoffpermeation, -degradation und -rissbildung in Materialien und Werkstoffen oder die thermodynamische Charakterisierung von Wasserstoff und Wasserstoffgasgemischen. Sicherheitsrelevante Systemlösungen werden parallel zur Forschung frühzeitig mit Forschungs- und Industriepartnern erarbeitet. Die BAM entwickelt z. B. Messverfahren und Prüfmethoden als Werkzeuge zur sicherheitstechnischen Bewertung. Durch Patentierung von Erfindungen und einen zielgerichteten Wissens- und Technologietransfer über Lizenzierung, Verkauf oder Unternehmensgründungen stellt sie sicher, dass gemeinsam erarbeitete Forschungsergebnisse in eine breite Anwendung gelangen. Durch dieses Vorgehen kann die benötigte Zeit zur Erprobung und Demonstration technischer Sicherheitslösungen verkürzt werden, die Skalierung und Validierung von Prototypen schneller erfolgen und somit die Markteinführung beschleunigt werden (Innovationsmotor).

Das Restrisiko für Unfälle kann durch Maßnahmen zur Minimierung der Eintrittswahrscheinlichkeit und des Schadensausmaßes reduziert werden. Eine entscheidende Bedeutung für die Beurteilung bzw. Beherrschung von Risiken spielt die digitale Überwachung und Kontrolle über alle wichtigen Prozesse und Qualitätsmerkmale. Dies ermöglicht eine optimale Umsetzung der Sicherheitskonzepte und schafft damit einen Vertrauenszuwachs in der Bevölkerung. Der sichere Betrieb und die Vermeidung von Unfällen sowie die Beherrschung von Störfällen verhindert mit Einführung sicherer Wasserstofftechnologien auch Umweltschäden, minimiert Kosten und trägt somit zum Umweltschutz und zur Umsetzung der Klimaziele bei.

Durch die Gewährleistung der Sicherheit wächst das Vertrauen, in die Wasserstofftechnologien zu investieren und mit Markteinführung eine breite Anwendung der Wasserstofftechnologien in der Gesellschaft zu ermöglichen (Wohlstand). In diesem Segment sieht die BAM ihren wissenschaftlich-technischen Auftrag und wird sich entsprechend als erste Anlaufstelle für Fragen der Sicherheit von Wasserstofftechnologien positionieren und in dieser Funktion in den Dialog mit Wissenschaft, Wirtschaft, Politik und Gesellschaft treten. Eine Kernaufgabe der BAM ist dabei die transparente Kommunikation und Information über Qualitätsstandards, Restrisiken und den sicheren Umgang mit Wasserstofftechnologien. Der aus dem Auftrag der BAM resultierende Vertrauenszuwachs unterstützt den Technologietransfer und die zügige Einführung der Wasserstofftechnologien.

Unser Beitrag zur Sicherheit in der Wasserstoffgesellschaft

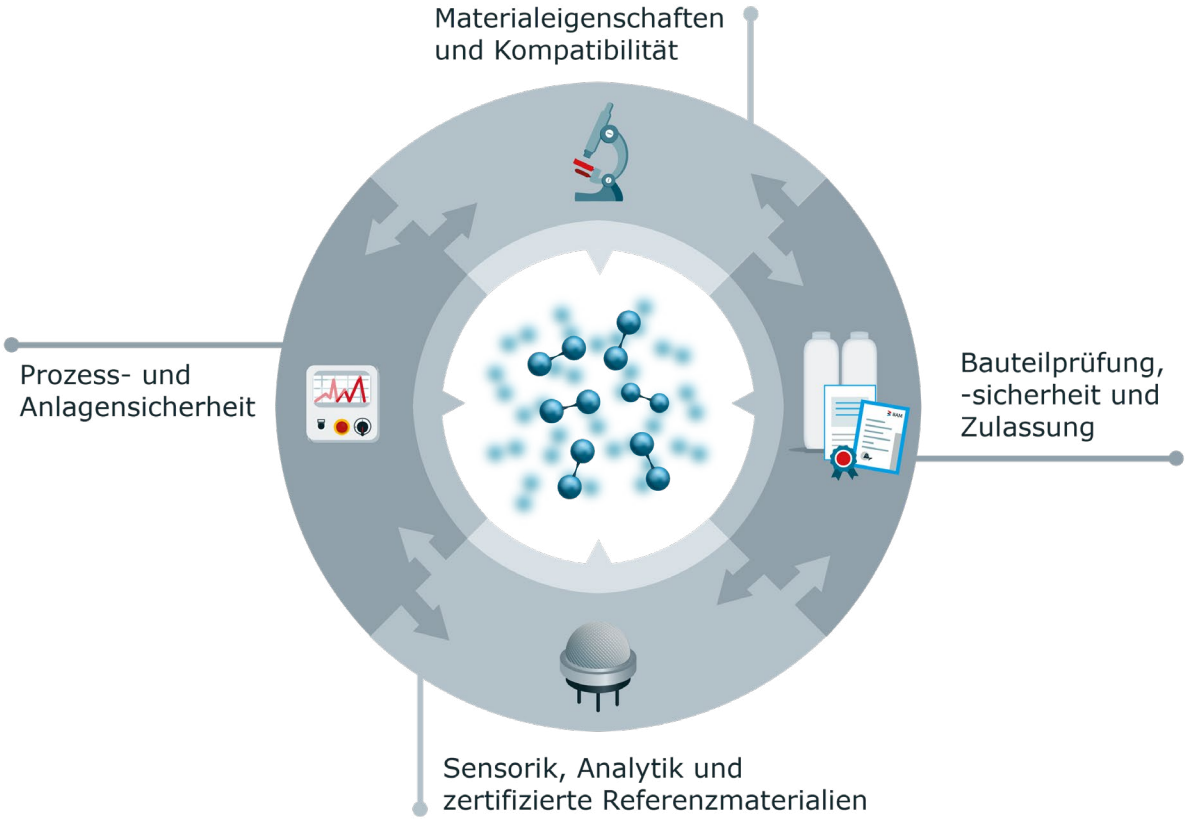


Abbildung 1
Kompetenzfelder der BAM im Bereich Wasserstofftechnologien

Das Thema Wasserstoff wird an der BAM seit über hundert Jahren[3] bearbeitet und steht auch gegenwärtig im Zentrum ihrer Forschungs- und Kooperationsaktivitäten. Die Verbindung von Ingenieur- und Naturwissenschaften erlaubt es der BAM, Themen aus der Chemie, den Werkstoffwissenschaften, der Komponenten- und Anlagensicherheit interdisziplinär zu erforschen und Prüfleistungen anzubieten – in hoher Qualität und Kontinuität. Im Kompetenzzentrum H_2Safety@BAM bündelt die BAM ihre Kompetenzen rund um die Sicherheit von Wasserstofftechnologien und -anwendungen in vier fachlichen Kompetenzfeldern (siehe Abbildung 1), so dass sie zeitnah und aus einer Hand Forschungs-, Beratungs- und Prüfleistungen für die Wasserstoffwirtschaft anbieten kann.

Die Kompetenzfelder der BAM sind miteinander verzahnt, d. h. spezifische sowie übergeordnete wissenschaftliche und sicherheitstechnische Fragestellungen werden durch Expert*innen verschiedener Disziplinen ganzheitlich betrachtet und bearbeitet, von der atomaren Skala bis zum Betrieb von Gesamtsystemen unter Realbedingungen.

[3]Die Explosion von 400 Wasserstoffgasspeicherflaschen am 25. Mai 1894 auf dem Flugplatz Berlin-Tempelhof hinterließ massive Unfallschäden. Adolf Martens war im Jahr 1894 an der Untersuchung des Unfallgeschehens beteiligt und veröffentlichte 1894 und 1896 die Ergebnisse aus seiner detaillierten Versagensanalyse der geborstenen Wasserstoffspeicherflaschen. Auf ihn geht die Gründung des Königlichen Materialprüfungsamtes in Berlin Dahlem am heutigen Standort der BAM, Unter den Eichen zurück, aus der die BAM hervorgegangen ist.

Tabelle 1
Schwerpunkte und Expertise zu den verzahnten Kompetenzfeldern der BAM im Bereich Wasserstofftechnologien

Materialeigenschaften und Kompatibilität:

Die BAM verfügt über umfassende Expertise im Bereich Materialien und Werkstoffe, besonders auf dem Gebiet der Eigenschaftscharakterisierung und der Beurteilung der Eignung für eine sichere und nachhaltige Nutzung der entsprechenden Komponenten, Anlagen und Systeme. Im Fokus steht die Charakterisierung und Modellierung der wasserstoffabhängigen Material- und Werkstoffeigenschaften über die gesamte Nutzungsdauer. Zudem werden Werkstoffveränderungen unter extremen Bedingungen untersucht, z. B. bei hohen und tiefen Temperaturen und Drücken in unterschiedlichen wasserstoffführenden Medien. Die Basis dafür bilden wissenschaftliche Ansätze und Modellierungen von werkstofftechnischen Mechanismen bis hin zum Life Cycle Engineering von Komponenten, Anlagen und Systemen (across scales and rates).

Bauteilprüfung, -sicherheit und Zulassung:

Dieses Kompetenzfeld betrachtet die sicherheitstechnischen Eigenschaften von Komponenten und Systemen für Wasserstofftechnologien. Dabei spielt die Bauteilprüfung unter Berücksichtigung von Alterungsmechanismen hinsichtlich Bauteilintegrität und Lebensdauer auch unter dynamischen Lastprofilen eine wesentliche Rolle. Über besondere Expertise verfügt die BAM im Bereich Wasserstoffspeicherung, von der Charakterisierung von Mikrorissen über die Prüfung von Unfallbelastungen und der statistischen Bewertung der Ausfallwahrscheinlichkeit bis zum Structural Health Monitoring. Darüber hinaus ist die BAM im Bereich Windenergie zu Themen der Festigkeitsanalyse, Fertigung und zerstörungsfreien Prüfung von Gründungsstrukturen und Rotorblättern aktiv.

Prozess- und Anlagensicherheit:

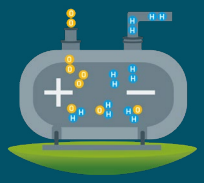
In diesem Kompetenzfeld bewertet die BAM ganzheitlich den sicheren Betrieb von Wasserstoffanlagen sowie die Sicherheit von Prozessen zur Herstellung und Umwandlung von Wasserstoff. Dies umfasst neben der sicherheitstechnischen Beurteilung von gasförmigem, flüssigem und "gebundenem" Wasserstoff sowie von Wasserstoffgemischen auch die Untersuchung ihrer sicherheitstechnischen Eigenschaften und ihre sichere Prozessführung. Aus der Kombination experimenteller Ergebnisse mit validierten System-Modellen werden Anlagensicherheitskonzepte entwickelt und zuverlässige Auswirkungsbetrachtungen bei verschiedenen und komplexen Szenarien in Anlagen und Systemen erzielt, so dass unerwünschte Ereignisse vermieden bzw. ihre Folgen begrenzt werden können.

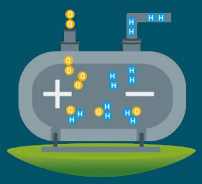
Sensorik, Analytik und zertifizierte Referenzmaterialien:

In diesem Kompetenzfeld liegt die Expertise der BAM in der Beantwortung von Fragen zur Gasanalyse, zu Gaseigenschaften und zur Gasreinheit. Ziel ist es, Wasserstoffgase bezüglich ihrer Qualität zu bewerten, Verunreinigungen, z. B. durch andere Gase oder Feuchte, zu erkennen und zu quantifizieren und die Detektion von Leckagen im Rahmen der Qualitätssicherung sowie der Sicherheitsüberwachung über die gesamte Wasserstoffwertschöpfungskette zu erreichen.
Die BAM entwickelt hierbei auch Prüfverfahren zur Ermittlung der Sensoreignung unter realitätsnahen Bedingungen – bei Umgebungsdruck und bei Betriebsdrücken – und stellt zertifizierte Referenzmaterialien für die sensorische und analytische Messtechnik her.

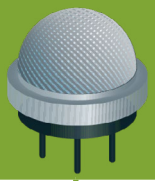
Im Kompetenzzentrum H_2Safety@BAM wird die Vielzahl der bearbeiteten Themen vier Kompetenzfeldern zugeordnet. Die Themen werden entweder, bezogen auf nur ein Segment im Wertschöpfungsprozess oder aber über verschiedene bzw. alle Segmente der Wertschöpfungskette interdisziplinär bearbeitet (siehe Tabelle 2). Die benannten Themen der Querschnittsfelder sind Bestandteil aller Kompetenzfelder der BAM und für alle Segmente der Wertschöpfungskette von Relevanz.

Tabelle 2 Wasserstoffthemen an der BAM entlang der Wertschöpfungskette.

Erzeugung	Transport	Speicherung	Nutzung
			
Materialeigenschaften und Kompatibilität			
– Hochtemperatur-elektrolyse – Reformierprozesse	– Pipelines – Schiffstransport – Straße – Schiene	– Druckgasspeicher – Kryospeicher – Kavernenspeicher – Liquid Organic Hydrogen Carriers	– Tankstellen – Power-to-X-Anlagen – industrielle Anwendungen – Stahlindustrie – Carbon Capture Storage and Utilisation – Brennstoffzellen *(s. Beispiel 2)*
	Kompatibilität bestehender und künftiger Infrastruktur *(s. Beispiel 1)*		
Bauteilprüfung, -sicherheit und Zulassung			
– Windkraftanlagen	– Einspeisung in Erdgasnetze – neue H_2-Netze – Transport-umschließungen im Schiff, auf Straße & Schiene für H_2 und für E-Fuels	– mobile und statio-näre Speicher *(s. Beispiel 3)*	– Gebäudetechnik – Mobilität – Rückverstromung – Tankstellen

Erzeugung	Transport	Speicherung	Nutzung
			

Sensorik, Analytik und zertifizierte Referenzmaterialien *(s. Beispiel 4)*



– H_2-Qualität	– Referenzgase	– Zustands-gleichungen	– Wasserstoffreinheit an Tankstellen – Power-to-X

Mess- und Prüfverfahren für Wasserstoff-Sensorik und Analytik *(s. Beispiel 5)*

Prozess- und Anlagensicherheit

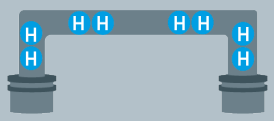
– Elektrolyse *(s. Beispiel 6)*	– Liquid Organic Hydrogen Carriers – Einspeisung in Erdgasnetze	– Eigenschaften von Prozessgasen – Sicherheits-konzepten – Schutzmaßnahmen (z. B. für Tankstellen, Power-to-x-Anlagen)

– Freisetzungs-/Ausbreitungsszenarien
– Auswirkungsbetrachtungen

Querschnittsfelder

– Verlässliche und moderne Qualitätsinfrastruktur (Normung, Standardisierung, Konformitätsbewertung, Structural Health Monitoring, Lösungen für digitale Qualitätsinfrastruktur) *(s. Beispiel 7)*
– Numerische Simulation und Digitalisierung, digitale Zwillinge
– Politikberatung und Rechtsfortentwicklung
– Nachwuchsförderung und Fachkräfteausbildung
– Transfer, Marketing, Kommunikation (Akzeptanz, Risikokommunikation), Begleitforschung *(s. Beispiel 8)*
– Strategische Ausrichtung und Netzwerkausbau

Die folgenden Beispiele (Beispiel 1-8) aus unterschiedlichen Kompetenzfeldern und Segmenten der Wasserstoffwertschöpfungskette geben einen ersten Einblick in aktuelle Forschungsvorhaben und Arbeitsschwerpunkte der BAM.



Beispiel 1:

Einsatzmöglichkeiten bestehender und zukünftiger Transport- und Speicherinfrastruktur für Wasserstoff

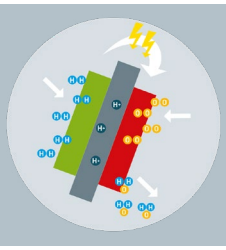
Problemstellung:

Für den Transport und die Speicherung von Wasserstoff sind die Eigenschaften der Umschließungsmaterialien in H_2-Transportbehältern, Speichern und Pipelines entscheidend, insbesondere unter dem Aspekt möglicher Wechselwirkungen zwischen dem zu transportierenden wasserstoffhaltigen Medium und den Einsatzwerkstoffen. Das betrifft u. a. die langfristige Einspeisung von Wasserstoff und zunehmend höheren Wasserstoffanteilen in das Erdgasnetz gleichermaßen, wie die Hochdruckanwendungen im Bereich von Wasserstofftankstellen. Insgesamt ist für eine nachhaltige und langfristige Speicherung und den Transport von Wasserstoff und Wasserstoffgemischen zu ermitteln, welche bisherige Infrastruktur genutzt werden kann und wo ggf. neue Komponenten, Anlagen und Systeme erforderlich werden.

Lösungsansatz

Ein Schlüssel zur Beantwortung dieser Fragen liegt in der exakten und detaillierten Erfassung der Betriebsdaten und des Zustandes von Komponenten, Anlagen und Systemen und der Erforschung des Werkstoff- und Materialverhaltens in den wasserstoffhaltigen Medien. Hierbei geht es beispielsweise darum, zu klären, wie schnell Wasserstoff aus ein- und mehrphasigen Umgebungsmedien aufgenommen wird, sich verteilt und permeiert. Diese Fragestellung ist nicht nur für Pipelines, sondern z. B. auch für Hochdruckanwendungen bei der Speicherung von Wasserstoff relevant. Ein weiterer Untersuchungsschwerpunkt besteht daher in der Erfassung der Wirkungen von Wasserstoff auf die Langzeitdegradation der Materialeigenschaften.

Spezifische Themen sind unter anderem:
- Einfache und aussagekräftige Anwendungskriterien für Werkstoffe und Materialien
- Grenzen der Wasserstoffabsorption unter verschiedenen Betriebsbedingungen und wasserstoffführenden Medien
- Wasserstoffverhalten in Mikrostrukturen und wasserstoffkonzentrationsabhängige Eigenschaften
- Sub-micro digital Imaging zur Visualisierung von Wasserstoffverhalten und -rissbildung
- Prüfkonzepte als Input für das Life Cycle Engineering von Komponenten, Anlagen und Systemen
- Modellierung und Simulation zur Vermeidung wasserstoffunterstützter Rissbildung



Beispiel 2:

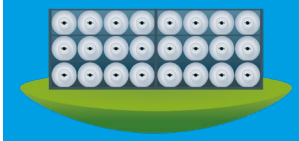
Selbstheilung von Rissen in Glas-Dichtungen für Hochtemperatur-Brennstoffzellen

Problemstellung:

Hochtemperatur-Brennstoffzellen produzieren besonders umweltfreundlich elektrische Energie. Allerdings erhitzen sie sich im Betrieb auf bis zu 900 °C. Daher stellen sie besonders hohe Anforderungen an die Dichtungen, die alle Zellkomponenten miteinander verbinden. Diese müssen bei hohen Temperaturen beständig, mechanisch stabil, elektrisch isolierend und für Wasserstoffmoleküle undurchlässig sein. Aus diesem Grund werden Glas-Dichtungen verwendet, die sich beim Fügen der Zellkomponenten zu einer teil-kristallinen, elektrisch isolierenden und gasdichten Barriere wandeln. Im Dauerbetrieb funktionieren diese Dichtungen zuverlässig. Wenn die Brennstoffzellen aber abgeschaltet werden, ziehen sich die Komponenten beim Abkühlen unterschiedlich stark zusammen. Dadurch können feine Risse entstehen. Das kann zum Versagen der gesamten Zelle führen oder zum Austreten von Wasserstoff, der leicht entzündlich ist.

Lösungsansatz:

Eine besonders gute Rissheilung würden Dichtungen aus Glas zeigen, das nicht kristallisiert. Wird es erwärmt, beginnt es zu fließen und verschließt die feinen Risse. Eine solche Dichtung besitzt allerdings den Nachteil, dass sie bei hohen Temperaturen zu weich wird. Mit der Zeit können zudem Metallionen aus der angrenzenden Schicht ins Glas wandern und unerwünschte elektrisch leitfähige Korrosionsprodukte bilden, die auch einen Kurzschluss bewirken können. Glasig-kristalline Dichtungen bleiben dagegen mechanisch stabil und erschweren den Transport von Korrosionsprodukten. Allerdings behindert der kristalline Anteil auch das Zufließen von Rissen.
Um das richtige Verhältnis von Glas und Kristallen zu finden, hat die BAM verschiedene Mischungen aus Glas, das selbst nicht kristallisiert und aus kristallinen Füllstoffen hergestellt und den Einfluss der Mikrostruktur auf die Rissheilung systematisch untersucht. Die Untersuchungen zeigten, dass ein gewisser kristalliner Anteil im Glas sogar förderlich für die Rissheilung ist. Durch einen erhöhten kristallinen Anteil wird das sonst auftretende Aufweiten der Risse sowie das Verrunden ihrer Kanten verhindert. Dadurch heilen die Risse leichter aus, vergleichbar einem Reißverschluss, der beim Schließen gestrafft wird. Als ideal erwies sich ein kristalliner Anteil von 17 Prozent. Erst wenn der kristalline Anteil etwa 30 Prozent überschreitet, wird auch das lokale Fließen und damit die Selbstheilung gestoppt.



Beispiel 3:

Ermittlung der sicheren Lebensdauer von Druckgasspeichern für Wasserstoff

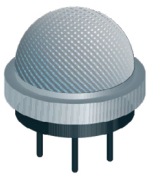
Problemstellung:

Für die zukünftig im Markt befindlichen Mengen an Wasserstoff wird eine Vielzahl von Speichern benötigt. Dies schließt neue Speicherarten und Speicheranwendungen für eine Vielzahl neuer Nutzer ein.
Leichte und robuste Wasserstoffspeicher für Fahrzeuge und Tankstellen werden heute in der Regel aus Faserverbundwerkstoffen hergestellt. Für die Sicherheit ist die Frage nach der Festlegung und Überwachung der Lebensdauer dieser Speicher essenziell.

Die bisher gängigen Prüfverfahren, wie z. B. die Ultraschallprüfung, bieten für diese Materialien kaum verwertbare Informationen zur Einschätzung der Lebensdauer.
Im Gefahrgutrecht hat die BAM zudem Verantwortung für die Lebensdauerbewertung. Hierbei und bei der Qualitätssicherung in der Fertigung kommt der zerstörungsfreien Prüfung (ZfP) eine zunehmende Bedeutung zu.

Lösungsansatz:

Die BAM entwickelt Prüf- und Messmethoden, die je nach Anwendungsbereich für sich oder in Kombination in der Lage sind, die sichere Lebensdauer einer Population oder von Individuen zu bestimmen. Dies bedeutet, zerstörende Stichprobenprüfung bzw. verschiedene zerstörungsfreie Prüfungen zu kombinieren und KI-basiert weiter zu entwickeln. Hierzu müssen auch entsprechende Sensorsysteme in die Speichersysteme aus Faserverbundwerkstoffen fertigungstechnisch integriert werden.
Auf diese Weise können kontinuierlich Messwerte generiert werden, die in ein KI-basiertes Datenmanagementsystem überführt und statistisch ausgewertet werden können. Schäden, die einen Austausch der Speicher erfordern, werden als Kennzahlen in der Datenbank systematisch erfasst. In einem solchen KI-basierten System können mögliche Schadensfälle schnell bewertet und identifiziert und sogar im Sinne von “Predictive Maintenance” vorausgesagt werden. Durch dieses intelligente Überwachungssystem müssen fest eingebaute Speicher zukünftig nicht mehr in festen Intervallen, sondern nur im Schadensfall ausgetauscht werden. Das spart Kosten durch den verminderten Arbeitsaufwand, schont Ressourcen und leistet damit einen Beitrag für ein nachhaltiges Wirtschaften.
Zur Entwicklung einer Technologie, die mit integrierter Sensorik zur Zustandsbeurteilung in Speichern eine KI-automatisierte Datenauswertung ermöglicht, arbeiten Sicherheitsexperten, Strukturmechaniker, Werkstoffwissenschaftler und Experten aus dem Bereich der zerstörungsfreien Prüfung und Qualitätssicherung interdisziplinär und zukunftsweisend an sicheren Prüf- und Monitoringkonzepten.



Beispiel 4:

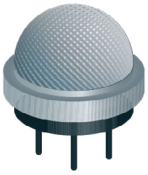
Zertifizierte Referenzmaterialien und Referenzmessungen

Problemstellung:

Für einen reibungslosen und sicheren Betrieb in der Wasserstoffwirtschaft muss über den gesamten Prozess an vielen Stellen die tatsächliche Gaszusammensetzung gemessen werden. Wichtige Messgrößen sind hier der Wasserstoffanteil in Gasmischungen, z.B. für die Bestimmung des Brennwerts, die Bestimmung von (störenden) Verunreinigungen in ‚reinem' Wasserstoff für die Anwendung in Brennstoffzellen sowie die Messung von Qualitätsänderungen, z.B. bei Lastwechseln oder Betankungsvorgängen. Für die genaue Messung vor Ort werden zuverlässige Referenzmaterialien für die Kalibrierung benötigt. Für deren Zertifizierung ist eine meist langsame und aufwändige, aber grundsolide Referenzanalytik erforderlich. Darüber hinaus wird für die Prozesssteuerung eine schnelle und einfache Online-Analytik benötigt.

Lösungsansatz:

Die BAM entwickelt Referenzmessverfahren und stellt insbesondere zertifizierte Referenzmaterialien bereit. Im Fall der Gase stellt sie mit hohem Aufwand primäre Referenzgase her, mit denen Gasproben von Anwendern zertifiziert werden, die dann beim Anwender als Kalibriergase eingesetzt werden können. Die primären Referenzgase der BAM stellen, designiert durch die PTB als nationales Metrologieinstitut, die „nationalen Messnormale" bezüglich Gasbeschaffenheit dar.
Die Entwicklung von Messverfahren und insbesondere die Bereitstellung von zertifizierten Referenzgasen wird auf wasserstoffhaltige Gasgemische ausgeweitet. Mit hoher Priorität werden Verfahren zur Charakterisierung von „reinem" Wasserstoff entwickelt. Zusätzlich werden hochgenaue Gase zur Entwicklung von Zustandsgleichungen und Sensoren bereitgestellt und Referenzzustandsgleichungen für den Transport und für Speichertechnologien verbessert, die für die Modellierung der Wasserstoffinjektion verwendet werden können. Darüber hinaus ist es ein Ziel, Anwendern hochgenaue, mobile Online-Messverfahren zur Verfügung zu stellen, um im Anwendungsbetrieb schnell Qualitätsänderungen zu erkennen und um entsprechend nachzusteuern zu können.



Beispiel 5:

Mess- und Prüfverfahren für Wasserstoffsensorik

Problemstellung:

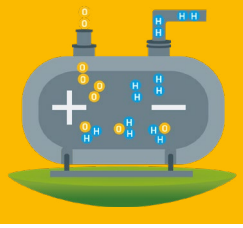
Zur Steuerung von Anlagen der Wasserstoffwirtschaft und zur Wasserstoffdetektion für die Sicherheitsüberwachung von Anlagen oder Gebäuden werden geeignete Sensoren benötigt. In Brennstoffzellen finden Sensoren Anwendung zum Monitoring der Gaszusammensetzung im Gasstrom. Dabei senden die Sensorsysteme Messdaten für die Prozesskontrolle. Des Weiteren werden Wasserstoffsensoren und Sensorsysteme zur Detektion von Leckagen eingesetzt, damit potentiell gefährliche Situationen rechtzeitig erkannt und vermieden werden können. Die Entwicklung und Qualifizierung neuer noch leistungsfähigerer Sensoren ist eine Schlüsselaufgabe zur Gewährleistung und weiteren Erhöhung der Anlagensicherheit und -zuverlässigkeit, z. B. von Brennstoffzellen, Wasserstofftankstellen und Power-to-X-Anwendungen.

Lösungsansatz:

Um neuentwickelte Sensoren validieren und für den kommerziellen Gebrauch qualifizieren zu können, widmet sich die BAM der Entwicklung bedarfsgerechter Mess- und Prüfverfahren und der damit einhergehenden Regelsetzung. Auch die Entwicklung neuer Wasserstoffsensoren und Sensorsysteme treibt die BAM voran.

Spezifische Themen sind unter anderem:

- Bestimmung von Leistungsparametern (u. a. Lebensdauer, messtechnischer Einsatzbereich, Ansprechverhalten und Genauigkeit) von Wasserstoffsensoren und Sensorsystemen durch Laborprüfungen unter realitätsnahen Bedingungen
- Weiterentwicklung und Etablierung von Prüfverfahren für die Feststellung der Leistungsparameter
- Entwicklung neuer Wasserstoffsensorprinzipien, z. B. basierend auf Änderung der Thermospannung bei Wasserstoffeinlagerung in Palladium bzw. in Stählen
- Entwicklung von spezifischen Sensoren für Power-to-X-Anwendungen, vor allem in Bezug auf die Minimierung der Querempfindlichkeit zu Methan



Beispiel 6:
Elektrolyse

Problemstellung:

Grüner Wasserstoff wird durch den Einsatz von Elektrolyseuren hergestellt, welche mit Ökostrom aus erneuerbaren Energien betrieben werden. Die neuen und großskaligen Technologien der Wasserstoffelektrolyse erfordern Sicherheitskonzepte, um eine unbeabsichtigte Wasserstofffreisetzung oder eine fehlerhafte Trennung von Wasserstoff und Sauerstoff im Prozess zu vermeiden. Die Grundvoraussetzung für eine sicherheitstechnische Beurteilung von Elektrolyseanlagen ist die Verfügbarkeit zuverlässiger sicherheitstechnischer Kenngrößen in Abhängigkeit von Druck, Temperatur, Strömungsverhältnissen, Geometrien etc. Für gesicherte Auswirkungsbetrachtungen und Modellierung ist die Kenntnis über die Phänomenologie bei der Freisetzung von Wasserstoff und Wasserstoff-Gemischen erforderlich.

Lösungsansatz:

Die BAM widmet sich der Bestimmung von Betriebsparametern für den sicheren Betrieb von Elektrolyseuren. Die Analyse von Explosionen soll dazu beitragen, bestehende Sicherheitskonzepte vor dem Hintergrund von Schadensfällen zu prüfen, anzupassen und damit die größtmögliche Sicherheit im Betrieb zu erzielen. Eine besondere Bedeutung haben diese Untersuchungen für die Entwicklung kostengünstiger Hochdrucksysteme.

Spezifische Themen sind unter anderem:
- Sicherheitstechnische Kenngrößen relevanter Wasserstoff-Sauerstoff-Gemische
- Auswirkungen von Wasserstoffexplosionen in Abhängigkeit von Betriebsdrücken und -temperaturen
- Freisetzung von Wasserstoff im Freien und in geschlossenen Räumen
- Entzündung von Freistrahlen und Gaswolken

Beispiel 7:

Digitale Qualitätsinfrastruktur (QI) für Wasserstofftankstellen

Problemstellung:

Der schnelle Ausbau eines Netzes aus verlässlichen und sicheren Wasserstofftankstellen ist Grundvoraussetzung für die Transformation der Mobilität hin zum Wasserstoff. Im Betrieb einer Wasserstofftankstelle spielt das Zusammenspiel der verschiedenen Komponenten eine große Rolle.

Mit umfangreicher Erweiterung der Sensorik zur Überwachung und auch Steuerung kann der Betrieb erheblich verbessert werden. Dafür muss auch eine Infrastruktur entwickelt werden, die eine umfassende Qualitätssicherung des digitalen Gesamtsystems abdecken kann.

Lösungsansatz:

Als Werkzeug für moderne Sicherheits- und Überwachungskonzepte bietet die Digitalisierung das Potenzial für eine neue, digital-gestützte und effiziente Qualitätsinfrastruktur.
Am Beispiel einer Wasserstofftankstelle erarbeitet die BAM Methoden für die Integration und Vernetzung von Sensorik, die Verarbeitung von Sensordaten, Entwicklung eines digitalen Zwillings zur Überwachung der Sicherheit und Lebensdauer (Predictive Maintenance) sowie für den Aufbau eines vollständigen Systems für QI-digital. Diese Lösungen schaffen Vertrauen und Akzeptanz bei Anwendern und Anbietern und leisten einen Beitrag zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit.
Für den Aufbau einer Wasserstofftankstelle als Reallabor verfügt die BAM über das Testgelände Technische Sicherheit (BAM TTS) in Horstwalde. Die BAM will sich national und international als Partnerin und erste Anlaufstelle für sicherheitstechnische Fragestellungen im Zusammenhang mit einer zuverlässigen Infrastruktur von Wasserstofftankstellen etablieren.

Beispiel 8:
Methoden der Risikoanalyse und Konsequenzbetrachtung

Problemstellung:

„Sicherheit“ ist ein im Alltag sehr vielseitig und umgangssprachlich nicht eindeutig definierter Begriff. Für den Hochlauf eines neuen Wasserstoffmarktes, d. h. für neue Wasserstofftechnologien, deren Nutzen noch nicht erfahrbar ist, ist die Gewährleistung der Sicherheit ein besonders wichtiger Punkt. Die zukünftig hohe Anzahl der angewandten Wasserstoff-Einzelsysteme zur Nutzung von oder zur Versorgung mit Wasserstoff erfordert eine aktive Risikobewertung und -steuerung zur Gewährleistung der Akzeptanz und damit des Vertrauens in diese Technologien.

Lösungsansatz:

Die BAM entwickelt die vorhandenen Methoden der Risikoanalyse und -steuerung sowie der Konsequenzbetrachtung zur Unterstützung des sich abzeichnenden Technologiewandels weiter und kommuniziert die Fortschritte standardisiert und adressatengerecht. Dabei werden die Werkzeuge der Versagensstatistik und Probabilistik (Prognose von Versagensfällen auf der Basis von Prüfdaten) herangezogen, um Komponenten und Systeme innerhalb der Wasserstoffwertschöpfungskette zu bewerten, Alterung zu begrenzen und die Eigenschaften von Populationen zu steuern.
Bei der BAM werden z. B. bereits in Regelwerken geforderte Akzeptanzkriterien für Wasserstoffspeicher probabilistisch analysiert und bewertet. Dies erfolgt durch die systematische Simulation der möglichen Eigenschaften mithilfe zahlreicher Wiederholungen eines Monte-Carlo-Experimentes. Hierbei werden das Ziehen einer zufälligen Stichprobe und das Bewerten nach dem jeweiligen Akzeptanzkriterium einer Prüfvorschrift simuliert. Vergleicht man dann das Ergebnis der Akzeptanzsimulation mit der Zuverlässigkeit der simulierten Population erhält man ein gutes Bild davon, wie wahrscheinlich es ist, dass ein Akzeptanzkriterium eine Produktion von Bauteilen mit ungenügenden Sicherheitseigenschaften als unkritisch bewertet.
Werden außerdem noch die zu den Restrisiken abgeleiteten Konsequenzen analysiert, können auch die Eintrittswahrscheinlichkeiten bewertet und eine Datenbasis für die weitere Regelwerksentwicklung geschaffen werden.

Umsetzungsmaßnahmen mit Blick auf 2030

Abbildung 2
Geschäftsfelder der BAM

Die Geschäftsfelder der BAM (siehe Abbildung 2) umfassen mit Forschung und Entwicklung, hoheitlichen und öffentlichen Leistungen, wissenschaftlich-technischen Dienstleistungen und Wissens- und Technologietransfer umfangreiche Leistungen für Kund*innen und Partner*innen aus Wirtschaft, Wissenschaft und Gesellschaft im Themenbereich Wasserstoff.

Mit dem Kompetenzzentrum H_2Safety@BAM wird die BAM ihren Kund*innen in den vier Geschäftsfeldern Lösungen für komplexe sicherheitstechnische Fragestellungen bei der Entwicklung und Umsetzung innovativer Wasserstofftechnologien anbieten. Strategische Zielstellung der BAM ist es, sich mit dem Kompetenzzentrum H_2Safety@BAM als kompetente und zuverlässige Partnerin für die Gewährleistung der Sicherheit von Wasserstofftechnologien und im Bereich der Sektorkopplung zu etablieren und diese Position zu festigen und auszubauen. Hierbei erfüllt sie eine wichtige Rolle bei der Umsetzung der Nationalen Wasserstoffstrategie der Bundesregierung und der EU. Die BAM wird ihre Vorreiterrolle als Ansprechpartnerin für die Implementierung sicherer Wasserstofftechnologien in den nächsten 10 Jahren systematisch ausbauen.

Im Geschäftsfeld „Forschung und Entwicklung“ konzentriert sich die BAM auf Projekte der Grundlagen- und angewandten Forschung, auf die Entwicklung neuer Produkte und Prozesse zu aktuellen Wasserstoffthemen und auf Schwerpunktbereiche, die durch die Nationale Wasserstoffstrategie definiert wurden (siehe Tabelle 2). Dabei berücksichtigt sie aktuelle Fragen, Bedarfe und Herausforderungen, die durch Wirtschaft, Politik und Gesellschaft adressiert werden, engagiert sich in Expert*innen-Netzwerken und arbeitet an technisch-wissenschaftlichen Fragestellungen, die den Markthochlauf der Wasserstofftechnologien fördern. Durch kontinuierliche Forschung und Entwicklung schafft die BAM die wissenschaftliche Grundlage für anwendungsnahe Lösungsmodelle, die sie an den Bedarfen ihrer Kund*innen ausrichtet und berücksichtigt dabei die Gewährleistung der Sicherheit von Systemen und Anlagen.

Mit ihren „Wissenschaftlich-technischen Dienstleistungen“ leistet die BAM, insbesondere durch die Bearbeitung von Prüfungs- und Analyseaufträgen für industrielle Partner*innen, durch die Bereitstellung von Referenzmaterialien und -daten und die Entwicklung von geeigneten Mess- und Prüfverfahren, einen entscheidenden Beitrag zur Entwicklung der deutschen und europäischen Wasserstoffwirtschaft. Sie trägt zur Qualitätssicherung der Systeme und Anlagen im gesamten Wasserstoffwertschöpfungssystem bei.

Zu ihren „hoheitlichen und öffentlichen Leistungen“ zählen ihr übertragene Aufgaben, wie z. B. Zulassungen und Genehmigungen sowie Politikberatung und die Mitarbeit in Gremien, insbesondere zur Normung, Regelsetzung und Standardisierung. Die BAM nutzt ihre umfangreiche Praxiserfahrung für die Weiterentwicklung des rechtlichen Rahmens von Wasserstofftechnologien.

Im Geschäftsfeld „Wissens- und Technologietransfer“ stellt die BAM ihre Erkenntnisse und Arbeitsergebnisse der Wissenschaft, Wirtschaft und der Allgemeinheit zur Verfügung, berät nationale sowie internationale Expert*innen-Netzwerke zum Thema Wasserstofftechnologien und konzentriert dabei ihre Aktivitäten auf Schwerpunktfelder der Nationalen Wasserstoffstrategie.

Auf Basis ihrer Wasserstoffstrategie hat die BAM folgende Maßnahmen zur fachlich-organisatorischen Umsetzung ihrer Ziele geplant:

i. Die BAM bündelt ihre auf den Seiten 7 und 8 dargestellten Kompetenzfelder abteilungsübergreifend und interdisziplinär im Themenfeld Energie und im Kompetenzzentrum H_2Safety@BAM.

ii. Die bereits verfügbare Prüfinfrastruktur wird entsprechend der Anforderungen des Technologie- und Forschungsbedarfs ausgebaut. Dafür sind substantielle Investitionen eingeplant.

iii. Die regelmäßige Anpassung ihrer Leistungs- und Serviceangebote in den vier Geschäftsfeldern an aktuelle Erfordernisse der Politik, Wirtschaft und Gesellschaft ermöglicht die BAM durch eine kontinuierliche Technologie- und Marktbeobachtung sowie Analyse der Bedarfe von Politik, Wirtschaft und Gesellschaft.

iv. Durch eine Beteiligung an nationalen und europäischen Drittmittelprojekten zur Grundlagen- und angewandten Forschung sowie zum Technologietransfer erweitert die BAM ihre Ressourcen und Forschungskapazitäten.

v. Der Ausbau ihrer bestehenden Netzwerke erhöht die Sichtbarkeit der BAM in der deutschland- und europaweiten Wasserstoff-Community und unterstützt ihre aktive Mitwirkung an der Umsetzung der nationalen und europaweiten Wasserstoffstrategie.

vi. Die BAM baut die bedarfsgerechten Angebote ihrer wissenschaftlich-technischen Dienstleistungen durch die Entwicklung neuer Mess- und Prüfverfahren sowie Referenzmaterialien, die Mitwirkung in Normungs- und Standardisierungsgremien und den Ausbau von industriellen Kooperationen weiter aus.

vii. Die BAM wird an der Entwicklung von Regelwerken und der Erarbeitung von Richtlinien und Normen zur Einsetzbarkeit von Materialien, Werk- und Schmierstoffen, zur sicherheitstechnischen Bewertung von Bauteilen und Anlagen, zur Online-Analytik und Sensorentwicklung, zu Themen wie der Digitalisierung der Qualitätsinfrastruktur, Structural Health Monitoring und Risiko- und Akzeptanzbewertung weiter aktiv mitwirken.

viii. Die BAM wird durch die Weiterentwicklung von Lösungsmodellen im Bereich der digitalen Qualitätssicherung, von Methoden zur Risikoanalyse und -steuerung und durch die gezielte Risikokommunikation zur Erhöhung der Sicherheit der Wasserstofftechnologien beitragen.

ix. Ihre Maßnahmen sind darauf ausgerichtet, Akzeptanz und Vertrauen in der Sektorkopplung und in Wasserstoff- und Power-to-X-Technologien aufzubauen.

x. Über ihren eigenen Bedarf hinaus bildet die BAM wissenschaftlichen und technischen Nachwuchse aus und qualifiziert Fach- und Führungskräfte für neue Aufgaben.

Das detaillierte Arbeitsprogramm der o.g. Maßnahmen ist Bestandteil eines Umsetzungsplans der BAM, der die Zielsetzungen der nationalen Wasserstoffstrategie berücksichtigt und sicherheitsrelevante Fragen der Qualitätsinfrastruktur für Wasserstofferzeugung, -transport, -speicherung und -verwendung beantwortet.

Kontakt

Sie erreichen uns zentral unter
Tel.: +49 30 8104-8080
H_2Safety@bam.de
www.bam.de/h2safety

Ansprechpartner Wasserstoff

Materialeigenschaften und Kompatibilität
Dr. rer. nat. Oded Sobol
Tel.: +49 30 8104-4573
Oded.Sobol@bam.de

Sensorik, Analytik und zertifizierte Referenzmaterialien
Dr. rer. nat. habil. Michael Maiwald
Tel.: +49 30 8104-1140
Michael.Maiwald@bam.de

Bauteilprüfung, -sicherheit und Zulassung
Dr.-Ing. Georg Mair
Tel.: +49 30 8104-1324
Georg.Mair@bam.de

Prozess- und Anlagensicherheit
Dr. rer. nat. Kai Holtappels
Tel.: +49 30 8104-1240
Kai.Holtappels@bam.de

Themenfeld Energie

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

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

tf-energie@bam.de
www.bam.de/energie

Forschungskoordination und Redaktion

Dr. rer. nat. Teresa Orellana Pérez
Tel.: +49 30 8104-4753
Teresa.Orellana-Perez@bam.de

Dr. rer. nat. Kerstin Rötzler
Tel.: +49 30 8104-1012
Kerstin.Roetzler@bam.de

Impressum

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

Postanschrift: 12200 Berlin

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

Bildnachweis: Alle Fotos und Grafiken,
wenn nicht anders vermerkt: BAM
09/2020

202000879- BAM Medienteam

BAM

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

Info@bam.de
www.bam.de