BAM

Bundesanstalt für
Materialforschung
und -prüfung

Sicherheit in Technik und Chemie

FORSCHUNGSPROGRAMM

2022 – 2024

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

info@bam.de
+49 30 8104-0
www.bam.de

Die BAM ist eine wissenschaftlich-technische Bundesoberbehörde im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz.

Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

INHALTSVERZEICHNIS

1. Die BAM – für sichere und nachhaltige Technologien von Morgen 5

2. Auftrag der BAM 6

3. Forschung für Sicherheit in Technik und Chemie 9

3.1 Themenfeld Energie 10
Wasserstoff 10
Elektrische Energiespeicher und -umwandlung 11
Windenergie 11
Kerntechnische Entsorgung 12

3.2 Themenfeld Infrastruktur 14
Security 14
Fire Science 15
Sicherheit und Lebensdauer von Bauwerken 16
Sicherheit von Industrieanlagen und Verkehrswegen 17
Transport und Lagerung von Gefahrstoffen und -gütern 17

3.3 Themenfeld Umwelt 19
Umweltverhalten von Materialien und Produkten 19
Ressourcenrückgewinnung und Materialverwertung 20
Umweltschadstoffe 21

3.4 Themenfeld Material 22
Additive Fertigung 22
nano@BAM 23
Materialdesign 24
Charakterisierung neuer Materialien und Stoffe 25
Degradation und Life Cycle von Werkstoffen und Materialien 26

3.5 Themenfeld Analytical Sciences 30
Qualitätssicherung und Data Science 30
Sensorik 31
Zerstörungsfreie Prüfung und Spektroskopie 32
Spurenanalytik und chemische Zusammensetzung 33
Oberflächen- und Grenzflächenanalytik 34
Strukturanalytik und Materialographie 34

4. Forschungsinfrastruktur 36

4.1 Qualität der Forschung 36

4.2 Zentrale Forschungsförderungsprogramme 36

4.3 Doktorandenprogramm der BAM 37

4.4 Vernetzung & Internationalisierung 37

4.5 Ressourcen 38

1. DIE BAM – FÜR SICHERE UND NACHHALTIGE TECHNOLOGIEN VON MORGEN

Der Koalitionsvertrag der Bundesregierung betont in seiner Präambel zur Zukunft Deutschlands in Bezug auf die notwendige Modernisierung, dass „dieser Fortschritt auch mit einem Sicherheitsversprechen einhergehen muss“. Die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) stellt mit ihrem Auftrag „Sicherheit in Technik und Chemie“ und ihrer über 150-jährigen Kompetenz sicher, dass ein nachhaltiger technischer Fortschritt von einem Sicherheitsversprechen für die Bürger*innen begleitet ist.

Durch ihre Interdisziplinarität, die thematische Breite, die langjährige Erfahrung und die unabhängige Rolle als Ressortforschungseinrichtung ist die BAM in einer herausragenden Lage, als zentraler Akteur die Entwicklung unterschiedlichster Technologien unter Berücksichtigung sicherheitstechnischer Aspekte voranzubringen, das Vertrauen der Gesellschaft in diese Technologien sicherzustellen und dadurch die Basis für erfolgreiche Innovationen zu schaffen.

Der Fokus ihrer Arbeit liegt auf den fünf Themenfeldern Energie, Infrastruktur, Umwelt, Material und Analytical Sciences. Wichtige Themen betreffen dabei sowohl die Energiewende (Wasserstoff, elektrische Energiespeicher, Windenergie) als auch Bereiche der Technologiesouveränität wie die additive Fertigung, zuverlässige Materialdaten, Zustandsüberwachung und Kreislaufwirtschaft.

Die Digitalisierung und den digitalen Wandel unterstützt die BAM in Bezug auf technologieübergreifende Rahmenbedingungen besonders in der Initiative Qualitätsinfrastruktur-Digital (QI-Digital), in der gemeinsam mit weiteren zentralen Akteuren der deutschen QI Lösungen für die Qualitätssicherung in einer digitalisierten Welt entwickelt werden.

Grundvoraussetzung für sichere Technologien und Innovationen ist eine leistungsfähige Forschung und Entwicklung ebenso wie Wissens- und Technologietransfer zur Umsetzung von Forschungsergebnissen in marktfähige Produkte und Dienstleistungen. Dafür bildet die Arbeit der BAM eine wichtige Basis.

Ihre Forschung ist mit der Wahrnehmung öffentlicher Aufgaben verbunden. Das Forschungsprogramm zeigt Perspektiven im Bereich ihres Aufgabenfeldes sowie ihrer damit verbundenen Forschungsaktivitäten transparent und politisch nutzbar auf und dient darüber hinaus der Koordinierung der Ressortforschung.

Das Forschungsprogramm der BAM wird alle zwei Jahre aktualisiert. Es gibt einen Überblick über die aktuellen und zukünftigen Forschungsthemen und die hierfür erforderlichen Rahmenbedingungen.

2. AUFTRAG DER BAM

Als wissenschaftlich-technische Bundesoberbehörde im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz verfügt die BAM über einen klaren gesetzlichen Auftrag für die Sicherheit in Technik und Chemie. In den Spitzen- und Schlüsseltechnologien Materialwissenschaft, Werkstofftechnik und Chemie leistet sie einen entscheidenden Beitrag zur technischen Sicherheit von Produkten, Prozessen und der Lebens- und Arbeitswelt der Menschen. Dazu forscht, prüft und berät die BAM mit ihrer fachlichen Kompetenz und langjährigen Erfahrung an den Schnittstellen von Wissenschaft, Technik, Wirtschaft und Politik. Im Rahmen der gesetzlichen und gesellschaftspolitischen Aufgaben identifiziert die BAM Anforderungen an die Sicherheit in Technik und Chemie für die Gesellschaft von morgen. Die Leistungserbringung erfolgt in vier Geschäftsfeldern, die die Produkte der BAM bündeln.

GESCHÄFTSFELD
Forschung und Entwicklung

Voraussetzung für die wissenschaftliche und technische Leistungsfähigkeit der BAM ist eigene Forschung und Entwicklung in hoher Qualität und Kontinuität. Forschung und Entwicklung ist die Basis für die wissenschaftlich-technischen, hoheitlichen und öffentlichen Leistungen der BAM sowie für den Wissens- und Technologietransfer. Grundlagenforschung und angewandte Forschung fallen ebenso darunter wie die Entwicklung neuer Produkte und Prozesse.

GESCHÄFTSFELD
Hoheitliche und öffentliche Leistungen

Hoheitliche und öffentliche Leistungen sind durch Gesetz übertragene Aufgaben. Zulassungen und Genehmigungen gehören ebenso dazu wie die Politikberatung und die Mitarbeit in Gremien, insbesondere zur Normung, Regelsetzung und Standardisierung. Diese Leistungen erbringt die BAM zum Wohle der Allgemeinheit.

GESCHÄFTSFELD
Wissenschaftlich-technische Dienstleistungen

Wissenschaftlich-technische Dienstleistungen sind entgeltliche Leistungen, die die BAM auf der Grundlage von gesicherten Erkenntnissen und Methoden anbietet. Dadurch leistet die BAM einen entscheidenden Beitrag zur Entwicklung der deutschen Wirtschaft. Neben der Durchführung von Prüfungen und Analysen sowie der Erstellung von Gutachten trägt die BAM auch zur Qualitätssicherung durch Konformitätsbewertungen und die Bereitstellung von Referenzmaterialien, -verfahren und -daten bei.

GESCHÄFTSFELD
Wissens- und Technologietransfer

Durch Wissens- und Technologietransfer stellt die BAM ihre Erkenntnisse und Arbeitsergebnisse der deutschen Wirtschaft und der Allgemeinheit zur Verfügung. Der Transfer erfolgt über verschiedene Wege wie beispielsweise die Lizenzierung von Patenten und die Bereitstellung von Wissens- und Expert*innenplattformen.

Die BAM kommuniziert sicherheitstechnische Problemlösungen und bringt diese in die Regelsetzung und Normung ein. Beratung, Information und Mitarbeit in nationalen und internationalen Gremien gehören daher zu ihren wesentlichen Aufgaben. Seit mehr als 150 Jahren entwickelt und validiert die BAM Analyseverfahren, Prüfverfahren und Bewertungsmethoden sowie Modelle und erforderliche Standards. Darüber hinaus erforscht, überprüft und bewertet die BAM Substanzen, Werkstoffe, Bauteile, Komponenten und Anlagen sowie natürliche und technische Systeme auf sicheren Umgang und Betrieb. Die Kompetenzen der BAM entstehen aus interdisziplinärem Wissen und aus eigener Forschung in hoher Qualität und Kontinuität. Wissenschaftler*innen der BAM erforschen gemeinsam über unterschiedliche Größenordnungen hinweg Themen aus der Chemie, der Materialwissenschaft und der Werkstofftechnik.

Als Kompetenzzentrum „Sicherheit in Technik und Chemie“ leistet die BAM einen entscheidenden Beitrag zur Entwicklung der deutschen Wirtschaft. Als Bundesoberbehörde ist die BAM wirtschaftlich unabhängig und fungiert als neutrale Moderatorin externer Entscheidungsprozesse. Darüber hinaus ermöglicht die BAM den Transfer wissenschaftlicher Erkenntnisse in den öffentlichen Bereich für die Politikberatung und die Erfüllung öffentlicher Aufgaben. Die Arbeit der BAM trägt dazu bei, dass die Transaktionskosten für die Umsetzung politischer Entscheidungen verringert werden. In nationalen und internationalen Netzwerken betreibt die BAM Technologietransfer, indem eigene Erkenntnisse aus Forschung und Entwicklung weitergegeben werden. Gleichzeitig nutzt die BAM die Kompetenzen und wertvollen Impulse aus den Netzwerken für die aktuelle Arbeit und die zukünftige Ausrichtung der BAM. Die BAM arbeitet für eine ausgeprägte Sicherheitskultur in Deutschland und Sicherheitsstandards, die auch in Zukunft höchsten Anforderungen genügen.

Mit diesem Auftrag ist die BAM zuständig für die

- Weiterentwicklung der Sicherheit in Technik und Chemie,
- Erfüllung hoheitlicher Funktionen zur technischen Sicherheit, insbesondere im Gefahrstoff- und Gefahrgutbereich,
- Beratung der Bundesregierung, der Wirtschaft sowie der nationalen und internationalen Organisationen im Bereich Technik und Chemie,
- Mitarbeit bei der Entwicklung einschlägiger gesetzlicher Regelungen, z. B. bei der Festlegung von Sicherheitsstandards und Grenzwerten,
- Entwicklung und Bereitstellung von Referenzmaterialien, Referenzverfahren und Referenzdaten insbesondere der analytischen Chemie und der Prüftechnik,
- Unterstützung der Normung und anderer technischer Regelsetzungen für die Beurteilung von Substanzen, Werkstoffen, Bauteilen, Komponenten und Anlagen sowie natürlichen und technischen Systemen im Hinblick auf Sicherheit, Gesundheit, Umweltschutz und den nachhaltigen Erhalt volkswirtschaftlicher Werte,
- Berücksichtigung von Sicherheitsbelangen in gemeinsamen Projekten mit Hochschulen, Forschungseinrichtungen und der Wirtschaft,
- Förderung des Wissens- und Technologietransfers in ihren Arbeitsgebieten.

In den nachfolgend angeführten Gesetzen und Verordnungen wurden der BAM übertragene Aufgaben geregelt[1]:

- Gesetz über explosionsgefährliche Stoffe und Verordnungen zum Sprengstoffgesetz
- Beschussgesetz und -verordnung
- Gefahrgutbeförderungsgesetz
- Gefahrgutverordnung Straße, Eisenbahn und Binnenschifffahrt
- Gefahrgutverordnung See
- Luftverkehrs-Zulassungs-Ordnung
- Ortsbewegliche-Druckgeräte-Verordnung
- Strahlenschutzgesetz und -verordnung
- Chemikaliengesetz
- Gefahrstoffverordnung
- Deponieverordnung
- Gesetz über die Akkreditierungsstelle
- Energieverbrauchsrelevante-Produkte-Gesetz
- Energieverbrauchskennzeichnungsgesetz

Die Erkenntnisse der BAM dienen nicht nur dem Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), dem die BAM nachgeordnet ist. Die BAM erfüllt auch Aufgaben für andere Ressorts, insbesondere für das Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV), das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV), das Bundesministerium für Arbeit und Soziales (BMAS) und das Bundesministerium des Innern und für Heimat (BMI).

Diesem differenzierten Aufgabenspektrum kann die BAM auf hohem wissenschaftlich-technischen Niveau nur durch umfangreiche eigene Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten gerecht werden, die konsequent am Bedarf von Politik, Gesellschaft und Wirtschaft ausgerichtet sind und sich an dem gesetzlichen Auftrag der BAM orientieren.

In die Themenplanung sowie in die Erstellung des Forschungsprogramms sind die wissenschaftlichen Beiräte und das Kuratorium der BAM eingebunden. In einer Zielvereinbarung mit dem BMWK wird die strategische Ausrichtung der BAM festgeschrieben, die im Forschungsprogramm und im Rahmen des Strategiezyklus der BAM konkretisiert wird. Die Leitlinie „Sicherheit in Technik und Chemie“ macht die Aufga-

[1] *Rechtliche Grundlagen für die Aufgaben der BAM: https://tes.bam.de/TES/Content/DE/Downloads/bam_rechtliche_grundlagen.html*

ben der BAM in der Forschung und in allen anderen Tätigkeiten für Auftraggeber*innen und Partner*innen wie für die Mitarbeitenden der BAM anschaulich.

Die Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten der BAM können in einem einfachen Produktionsmodell unterschiedlichen Stufen zugeordnet werden. Das Produktionsmodell der BAM beschreibt die Verschränkung der vier Geschäftsfelder. Es illustriert die Erzeugung, Anwendung und Weitergabe des Wissens. Konsequent angewendet, gewährleistet das Produktionsmodell die Qualität der Arbeit der BAM. Die Erzeugung von neuem Wissen erfolgt im Rahmen der Grundlagenforschung, der angewandten Forschung und der Technologieentwicklung.

3. FORSCHUNG FÜR SICHERHEIT IN TECHNIK UND CHEMIE

Die BAM integriert Forschung, Bewertung und Beratung in Technik und Chemie unter einem Dach. Im Rahmen ihrer gesetzlichen und gesellschaftspolitischen Aufgaben identifiziert die BAM Anforderungen an die Sicherheit in Technik und Chemie für die Gesellschaft von morgen. Forschung bildet als Erzeugerin von Expertise die Grundlage für Bewertung und Beratung. Diese kann langfristig nur mit kontinuierlichen Qualitätsstandards gewährleistet werden. Der strategischen Ausrichtung dieser Vorlaufforschung wird daher ein besonders hoher Stellenwert beigemessen.

Der Fokus aller Forschung an der BAM liegt auf den fünf abteilungsübergreifenden Themenfeldern: Energie, Infrastruktur, Umwelt, Material und Analytical Sciences. Die Themenfelder Energie, Infrastruktur und Umwelt stellen dabei Bedarfsfelder mit Herausforderungen unserer Gesellschaft dar, für welche die Forschung der BAM entsprechend ihrem Auftrag von grundlegender Bedeutung ist. Die Themenfelder Material und Analytical Sciences sind Schlüsseltechnologien für die Sicherheit in Technik und Chemie. Sie haben übergreifende Bedeutung für die Forschung der BAM in den genannten Bedarfsfeldern, sind aber auch Treiber für Innovationen und die Grundlage für neue Produkte, Verfahren und Dienstleistungen in anderen Schwerpunkten der Hightech-Strategie der Bundesregierung. Das vorliegende Forschungsprogramm ist entlang dieser Themenfelder strukturiert.

Die Forschungsthemen der BAM werden in diesem Forschungsprogramm anhand der Aktivitätsfelder in den Themenfeldern der BAM dargestellt. Die Aktivitätsfelder konkretisieren die Aktivitäten der BAM in den Themenfeldern, bezeichnen längerfristige thematische Entwicklungslinien und umfassen neben der Forschung die weiteren Tätigkeitsbereiche. Innerhalb der Aktivitätsfelder sind die Tätigkeiten der Fachabteilungen sogenannten Fachaufgaben zugeordnet. Mit Hilfe des Strategiezyklus identifiziert die BAM regelmäßig wichtige Schwerpunktthemen, die sich aus dem Auftrag der BAM ergeben und bei denen die in der BAM vorhandenen Expertisen und Kompetenzen in besonderem Maße gefragt sind. Aktuelle Schwerpunktthemen der BAM sind:

- Wasserstoff
- Elektrische Energiespeicher
- Windenergie
- Fire Science
- Security
- Microbially influenced corrosion (MIC)
- Nanomaterialien
- Additive Fertigung
- Sensorik
- Referenzmaterialien

Schwerpunktthemen mit einer aus strategischen Gesichtspunkten besonderen externen Sichtbarkeit sind als Kompetenzzentren ausgebaut. In diesen werden abteilungsübergreifende Kompetenzen und Expertisen gebündelt und auf das Schwerpunktthema abgestimmte Dienstleistungen und Produkte entwickelt und angeboten. Kompetenzzentren sind wie Schwerpunktthemen einem Themenfeld zugeordnet. Aktuelle Kompetenzzentren der BAM sind:

- H_2Safety@BAM
- Wind@BAM
- nano@BAM
- AM@BAM

Die Forschung an der BAM in den einzelnen Aktivitätsfeldern und Kompetenzzentren wird in diesem Forschungsprogramm für jedes Themenfeld kurz beschrieben. Daneben liefert die Datenbank ReSearch BAM[2] einen Überblick über ausgewählte Forschungsprojekte sowie Forschungsthemen und Aktivitäten der BAM in bestimmten Förderprogrammen.

[2] *https://fdb.bam.de/ForschungDB/ForschungDB/Recherche?0*

3.1 Themenfeld Energie

Das Thema Energie ist für den Wirtschaftsstandort Deutschland von übergeordneter Bedeutung. Durch die Forschungsaktivitäten auf den Gebieten Wasserstoff, elektrische Energiespeicher – und umwandlung, Windenergie sowie der kerntechnischen Entsorgung leistet die BAM an zahlreichen Stellen wichtige sicherheitstechnische Beiträge zur Energiewende.

Wasserstoff

Um der herausgehobenen Stellung des Wasserstoffs im Rahmen der Energiewende Rechnung zu tragen, hat die BAM ihre Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet zur Wasserstoffsicherheit im Kompetenzzentrum H_2Safety@BAM gebündelt. Südlich von Berlin entsteht auf zwölf Quadratkilometern eine der größten und modernsten Testinfrastrukturen für Wasserstoffsicherheit in Europa. Ihre Aktivitäten hat die BAM in die vier Kompetenzfelder Prozess- und Anlagensicherheit (ProSafe), Bauteilprüfung, -sicherheit und Zulassung (TestCert), Sensorik, Analytik und zertifizierte Referenzmaterialien (SensRef) und Materialeigenschaften und Kompatibilität (MatCom) strukturiert. Querschnittsthemen werden in einem fünften Kompetenzfeld (CrossCut) interdisziplinär zusammengefasst.

Im Kompetenzfeld ProSafe wird ganzheitlich der sichere Betrieb von Wasserstoffanlagen sowie die Sicherheit von Prozessen bei Technologien über die gesamte Wasserstoffwertschöpfungskette bewertet. 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 Systemmodellen 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.

Im Kompetenzfeld TestCert werden die sicherheitstechnischen Eigenschaften von Komponenten und Systemen für Wasserstofftechnologien betrachtet. Dabei spielt die Bauteilprüfung unter Berücksichtigung von Alterungsmechanismen hinsichtlich Bauteilintegrität und Lebensdauer auch unter dynamischen Lastprofilen eine wesentliche Rolle. Ein besonderer Schwerpunkt liegt im Bereich der Wasserstoffspeicherung, von der Charakterisierung von Mikrorissen über die Prüfung von Unfallbelastungen und der statistischen Bewertung der Ausfallwahrscheinlichkeit bis zum Structural Health Monitoring und den besonderen Anforderungen für die aktuelle Versorgung von Wasserstofftankstellen über die Straße. Auch zu Sicherheitsfragen von Composite-Gasspeichern für die Mobilität forscht die BAM.

Im Kompetenzfeld SensRef werden Fragen zur Gasanalyse, zu Gaseigenschaften und zur Gasreinheit beantwortet. 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. Durch die aktuell vorangetriebene Erweiterung der Kompetenz zur Qualitätsbeurtei-

lung von Reinstwasserstoff leistet die BAM einen Beitrag zu weltweit anerkannten und harmonisierten Methoden, die eine Exportgrundlage für lokale Technologieanbieter darstellen. Mit der Herstellung von hochgenauen Gasgemischen zur Verbesserung von Referenzzustandsgleichungen liefert die BAM wichtige Beiträge für die Wasserstoffwirtschaft, insbesondere für Transport und Speichertechnologien.

Im Kompetenzfeld MatCom steht die Charakterisierung und Modellierung der wasserstoffabhängigen Material- und Werkstoffeigenschaften über die gesamte Nutzungsdauer im Fokus. Die Eigenschaftscharakterisierung und die Beurteilung der Eignung ist für eine sichere und nachhaltige Nutzung der entsprechenden Komponenten, Anlagen und Systeme von sehr hoher Bedeutung. Dazu zählt die Untersuchung der wasserstoffunterstützten Rissbildung und Risskorrosion in metallischen Strukturwerkstoffen. Zudem werden Werkstoffveränderungen unter extremen Bedingungen untersucht und geeignete Prüfmethoden entwickelt, z. B. bei hohen und tiefen Temperaturen und Drücken in unterschiedlichen wasserstoffführenden Medien. Hierzu zählt auch die mikrobiell induzierte Korrosion (MIC), deren biologische Schädigungsmechanismen von extremophilen Mikroorganismen bei Salzkavernenspeichern eine Rolle spielt. Die Basis für die Eigenschaftscharakterisierung und Werkstoffveränderungen bilden wissenschaftliche Ansätze und Modellierungen von werkstofftechnischen Mechanismen bis hin zum Life Cycle Engineering von Komponenten, Anlagen und Systemen.

Im Kompetenzfeld CrossCut werden Forschungsergebnisse der BAM in Wissenschaft, Wirtschaft, Politik und Gesellschaft zusammen mit unseren nationalen sowie internationalen Partner*innen vermittelt (Wissens- und Technologietransfer). Wichtige Themen hierzu sind die Normung, Standardisierung und Regelsetzung sowie der Ausbau der Netzwerkaktivitäten auf nationaler und internationaler Ebene, z. B. durch das Forschungsnetzwerk Wasserstoff und durch Hydrogen Europe Research. Das Kompetenzzentrum H_2Safety@BAM leistet zudem einen wesentlichen Beitrag zur Nachwuchsförderung durch das BTU-BAM Graduiertenkolleg „Trustworthy Hydrogen", das von der BAM und der BTU Cottbus-Senftenberg für die Betreuung gemeinsamer Promotionen eingerichtet wurde.

Elektrische Energiespeicher und -umwandlung

Ausgehend von den Fragestellungen der Sicherheit beim Transport von Lithiumbatterien (insbesondere von Prototypen und beschädigten/defekten Lithiumbatterien) hat die BAM Prüfmöglichkeiten und Kompetenzen aufgebaut, um aus den Untersuchungs- und Forschungsergebnissen angemessene Konzepte abzuleiten. In diesem Zusammenhang geht es gleichzeitig um die Sicherheit, Nachhaltigkeit und Klimarelevanz von elektrochemischen Energiespeichern (Batterien und Akkus) sowie neuer Generationen (wie Natriumionenbatterien) und Technologien (Brennstoffzellen). Dabei forscht die BAM auch an den benötigten Energiespeichermaterialien und deren Untersuchungsmethoden.

Im Schwerpunktthema elektrische Energiespeicher wird neben den Themen der Alterung, der Zelldiagnostik und der Betrachtung von Vorgängen in der Zelle auch die Auswirkung des thermischen Durchgehens von Lithium-Ionen-Batterien und mögliche Schutzsysteme betrachtet. Im Fokus dieser Arbeiten steht die Bewertung des Sicherheitszustandes, des State of Safety (SoS), um Unfälle mit Lithium-Ionen-Batterien zu verhindern oder die Auswirkungen durch Ableitung von Maßnahmen auf ein unbedenkliches Maß zu reduzieren. Dies können Empfehlungen für konstruktive Änderungen am Aufbau für sichere Batterien oder aber Anforderungen an die Anlagensicherheit oder den baulichen Brandschutz bei stationären Speicheranlagen sein. Ergänzt werden können diese Maßnahmen z. B. mit Handlungsleitfäden für Einsatzkräfte bei Batteriebränden oder Unfällen mit Elektrofahrzeugen.

Windenergie

Im Fokus des Themas Windenergie stehen die technische Sicherheit und Lebensdaueranalysen von Windenergieanlagen vor dem Hintergrund des geplanten Ausbaus des Anteils an der Energieerzeugung. Um einen Beitrag für die Einführung innovativer und wirtschaftlicher Technologien im Bereich Windenergie zu leisten, hat die BAM ihre Arbeiten auf dem Gebiet in dem Kompetenzzentrum Wind@BAM gebündelt.

Windenergieanlagen sind offshore und an Land extremen Belastungen ausgesetzt. Die Forschungsarbeiten der BAM auf dem Gebiet der Offshore-Windener-

gieanlagen (OWEA) umfassen die Optimierung von Gründungskonstruktionen, die Verknüpfung von messtechnischen Überwachungsaufgaben mit Handlungskonzepten sowie Untersuchungen zur Installation von Gründungskörpern wie Pfählen. Parallel werden zugehörige numerische Simulationstools weiterentwickelt.

Um einen möglichst langen und sicheren Betrieb der Anlagen Offshore und an Land zu gewährleisten, hat die BAM ein Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung mittels Thermographie entwickelt. Die herkömmliche Thermografie mit möglichst gleichmäßiger Erwärmung als zerstörungsfreies Prüfverfahren entfaltet ihre Stärken vor allem auf ebenen oder nur schwach strukturierten Bauteiloberflächen. Die Möglichkeit einer räumlich strukturierten Erwärmung mit Lasern mittlerer bis hoher Leistung verbessert die Nachweisempfindlichkeit der Thermografie erheblich. Die Kombination mit einem Industrieroboter oder einer Drohne erlaubt die gezielte Erwärmung komplexer Geometrien und erweitert damit das Einsatzspektrum des Prüfverfahrens beträchtlich. So kann beispielsweise mit Hilfe der passiven thermografischen Ferninspektion von Rotorblättern, die sowohl vom Boden aus als auch von einer Drohne durchgeführt werden kann, die Zuverlässigkeit und Effizienz der Energieerzeugung durch Windkraft erhöht werden. Der hohe Automatisierungsrad und die komplette Digitalisierung ermöglichen eine effektive Kontrolle und Dokumentation sicherheitsrelevanter Bauteile während der gesamten Lebensdauer.

Beim Bau von Windenergieanlagen werden große Mengen an Stahl verschweißt. Gegenwärtig aber stellen insbesondere die komplexen Schweißnähte der Tragstrukturen eine Herausforderung für die automatisierte Fertigung dar. An der BAM erfolgen Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Analyse von Nichtgleichgewichtsprozessen und der Ausscheidungskinetik beim Schweißen, insbesondere Simulationen schweißähnlicher Gefüge, Gewinnung von Daten für die Modellierung des Werkstoffverhaltens und zur Erstellung von Zeit-Temperatur-Umwandlungs-Schaubildern.

Auch tribologische Fragestellungen sind wichtige Aspekte bei dem Betrieb von Windenergieanlagen. Durch die Verringerung von durch Reibung verursachtem Verschleiß können Wartungsintervalle verlängert und die Lebensdauer von Maschinen und Anlagen insgesamt erhöht werden. Dadurch können Materialien effizienter, z. B. in geringerer Menge eingesetzt werden, was zur Schonung der Rohstoffvorräte beiträgt. Die BAM trägt ihren Teil durch die Charakterisierung insbesondere von Werkstoffen, Beschichtungen und Schmierstoffen mit dieser Zielsetzung bei und forscht dafür auf dem Gebiet der Tribologie.

Im Bereich erneuerbarer Energien sind insbesondere moderne Hochleistungsgläser oft Kernkomponenten moderner Technologien, wie beispielsweise Solargläser, Glaslote für Brennstoffzellen, Pastengläser für Silberleitbahnen oder Wasserstoffbarrieren aus Glas. Die Bewertung von Funktionalität und Zuverlässigkeit der entsprechenden Systeme erfordert ein tiefes Verständnis der Struktur-Eigenschafts-Beziehungen solcher Spezialgläser. In enger Zusammenarbeit mit anderen Forschungsinstituten und der Industrie forscht die BAM daher an den diesbezüglichen grundlegenden Zusammenhängen.

Kerntechnische Entsorgung

Der Transport und die Zwischen- bzw. Endlagerung von radioaktiven Stoffen, wie z. B. bestrahlte Brennelemente, schwach-, mittel- und hochradioaktive Abfälle aus Kernkraftwerken, Forschung, Medizin und Industrie bleibt auch nach dem gesetzlich geregelten Ausstieg aus der Nutzung der Kernenergie zur Stromerzeugung ein langfristig wichtiges Thema in Deutschland. Die bislang genehmigte Zwischenlagerdauer von bis zu 40

Jahren für bestrahlte Brennelemente und hochradioaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung im Ausland wird mittelfristig um einige Jahrzehnte zu verlängern sein, da ein Endlager für hochradioaktive Abfälle in Deutschland frühestens ab ca. 2050 zur Verfügung stehen wird. Von daher ist die sicherheitstechnische Begleitung der Kerntechnischen Entsorgung eine langfristig unverändert wichtige Aufgabe der BAM.

Kernaufgaben der BAM sind Bauartprüfungen und sicherheitstechnische Gutachten zur umfassenden Sicherheitsbewertung im Rahmen verkehrsrechtlicher Zulassungs- und atomrechtlicher Genehmigungsverfahren von Behältern zum Transport und für die Zwischen- und Endlagerung radioaktiver Stoffe. Dabei ist die BAM sowohl hoheitlich zuständig als auch hoheitsnah von den zuständigen Genehmigungs- und Aufsichtsbehörden als Gutachter beauftragt. Maßgebliche Schutzziele sind der sichere Einschluss der radioaktiven Stoffe unter Betriebs- und Unfall- bzw. Störfallbedingungen, die hinreichende Abschirmung ionisierender Strahlung, Unterkritikalität und eine ausreichende Abfuhr der Zerfallswärme.

Im Rahmen von Baumusterprüfungen mit Prototypbehältern sind die Definition der Nachweis- bzw. Versuchsziele im Einklang mit sicherheitstechnischen Nachweiskonzepten und in Verbindung mit der benötigten Sensorik ebenso von Bedeutung wie die Auswertung komplexer mechanischer und thermischer Beanspruchungszustände an den Behältern. Dazu werden u.a. aufwändige Messwerterfassungssysteme und Highspeed-Videotechnik eingesetzt. Zum Nachweis des Dichtheitserhalts werden hochsensible Helium-Dichtheitsprüfungen durchgeführt und Behälter mittels modernster optischer Messtechnik vermessen. Die beständige Weiterentwicklung des Zusammenspiels von experimentellen Untersuchungen und rechnerischer Simulation zum Nachweis der Behältersicherheit stellt einen wichtigen Aspekt der Forschungsthemen dar.

Im Hinblick auf die zukünftige Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen forscht die BAM zu den konkreten Anforderungen an die zukünftigen Endlagerbehälter und den zugehörigen Eignungsnachweisen für unterschiedliche Wirtsgesteine (Steinsalz, Tonstein, Kristallingestein). Dazu zählen auch Untersuchungen zu den Schädigungsmechanismen von extremophilen Mikroorganismen mit dem Ziel der Prävention oder zuverlässigen Einschätzung von MIC.

Im Bereich der verlängerten Zwischenlagerung bestrahlter Brennelemente einschließlich nachfolgender Transporte forscht die BAM zum Langzeitverhalten von Metalldichtungen als primärer Sicherheitskomponente zum sicheren Einschluss der radioaktiven Stoffe in Transport- und Lagerbehältern, zum Langzeitverhalten von Polymer-Komponenten zur Erfassung und (analytischen und/oder numerischen) Beschreibung des Degradationsverhaltens hinsichtlich z. B. Elastizität, Struktur- und Eigenschaftsbeständigkeit (Prognosemodelle) und zum Alterungs- und Versagensverhalten von Brennelementen und Brennstabhüllrohrmaterialien.

Schließlich entwickelt die BAM innovative Mess- und Überwachungsmethoden für massive Betonbauwerke mittels Ultraschallsensorik, um u.a. Fragestellungen zur Strukturstabilität beim Rückbau von Kernkraftwerken, der Laufzeitverlängerung von Zwischenlagern, aber auch in Verschlussbauwerken von Endlagern zu bearbeiten. Derartige Methoden der zerstörungsfreien Prüfung sollen dabei zukünftig auch auf die Überwachung von einzementierten schwach- und mittel-radioaktiven Abfällen angewendet werden.

3.2 Themenfeld Infrastruktur

Eine moderne, jederzeit verfügbare und technisch-sichere Infrastruktur von Industrieanlagen, Bauwerken, Versorgungssystemen und -wegen ist ein zentraler wirtschaftlicher Standortfaktor für Deutschland. Im Themenfeld Infrastruktur arbeitet die BAM an der Entwicklung technisch-wissenschaftlicher Verfahren zur Gewährleistung einer sicheren und dauerhaften technischen Infrastruktur. Im Fokus der Arbeiten stehen dabei die Schwerpunkte Security, Fire Science, Sicherheit und Lebensdauer von Bauwerken, Sicherheit von Industrieanlagen und Verkehrswegen sowie Transport und Lagerung von Gefahrstoffen und -gütern.

Security

Um die Sicherheit der Gesellschaft zu garantieren, beschäftigt sich die BAM im Schwerpunktthema Security mit zahlreichen Szenarien, in denen Technik und Chemie mit Schädigungsabsicht gegen Mensch, Natur und Infrastruktur eingesetzt werden.

Dabei werden zwei Schwerpunkte gesetzt:

- Auswirkungsbetrachtung (Explosionen, Gefahrstoffe, Wirksamkeit von Schutzmaßnahmen)
- Analytik, Detektion, Messung, Identifikation (Explosivstoffe, IEDs, Gefahrstoffe).

Grundlage der Arbeiten in diesen Schwerpunkten ist eine starke Endanwendernähe, die die Forschungsaktivitäten primär an den Forschungsbedarfen und Fähigkeitslücken der Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BOS) wie etwa polizeilichen Ermittlungsbehörden, Feuerwehren, Technischem Hilfswerk und Rettungsdiensten ausrichtet, um innovative und einsatznahe Lösungen zu entwickeln. Daher stellt eine intensive Netzwerkarbeit mit den Partner*innen der polizeilichen wie auch nicht-polizeilichen Gefahrenabwehr die Basis der Aktivitäten dar.

Als technisch-wissenschaftliche Partnerin für die BOS sowie weiterer Stakeholder der Kritischen Infrastruktur erarbeitet die BAM anwendungsbezogene Kriterien für Schutzmaßnahmen zur Gewährleistung bzw. Erhöhung der Sicherheit bei Bedrohungslagen und ist Partnerin bei der Entwicklung und Systemintegration von Zukunftstechnologien zur Gefahrenabwehr und -erkennung (z. B. CBRNE-Sensorik und -Messsysteme).

Das Testgelände Technische Sicherheit (TTS) ist in Europa einzigartig und bietet die außergewöhnliche Möglichkeit, entsprechende Szenarien im Realmaßstab im Rahmen einer Auswirkungsbetrachtung experimentell umfassend zu untersuchen. Anhand der Ergebnisse werden gemeinsam mit Sicherheitsbehörden die Auswirkungen bewertet, Schutzkonzepte entwickelt oder diese an neue Anforderungen angepasst. Schwerpunkte bilden dabei die Bewertung des Verhaltens von Strukturen unter Explosionsbeanspruchung anhand von Experimenten und Simulationen sowie die Auswirkungen von Kurzzeitereignissen auf den Menschen. All dies geschieht mit einem systemischen Ansatz unter Berücksichtigung aller relevanten Messgrößen und Parameter.

Analytik, Detektion, Messung und Identifikation stellen den zweiten Schwerpunkt im Aktivitätsfeld dar. Die BAM arbeitet hier daran, durch Normung und Standardisierung im Bereich von CBRNE-Multisensorik für First Responder neue Maßstäbe bei der Interoperabilität zukünftiger Technologien zur Gefahrenabwehr zu setzen und somit die Arbeit der Endanwender*innen sicherer und effektiver zu machen sowie die Entscheidungsfindung vor Ort zu erleich-

tern. Darüber hinaus untersucht bzw. entwickelt die BAM beispielsweise wirksame aufspürende Werkzeuge und Methoden zur Verhütung von Terroranschlägen mit selbstgemachten Explosivstoffen, deren Ausgangsstoffe noch nicht näher untersucht wurden.

Fire Science

Das Verständnis über die Entstehung, die Ausbreitung und die direkten Folgen eines Brandes ist grundlegend für die Ergreifung zielführender Maßnahmen für den Brandschutz sowohl in Gebäuden, in Industrie- und Verkehrsanlagen als auch im Freien. In ihrem Schwerpunktthema Fire Science bündelt die BAM ihre zahlreichen Aktivitäten zu diesem Thema.

Wesentliche Größe bei der Bewertung des baulichen Brandschutzes ist der Feuerwiderstand der Bauteile und des daraus errichteten Bauwerks. Für die Bestimmung des Feuerwiderstands von neuen Bauweisen führt die BAM Brandversuche im Groß- und Realmaßstab durch. Damit werden Erkenntnisse zu Bauweisen mit neuen Materialien und neuen Konstruktionsarten gewonnen. Diese liefern ein Verständnis des komplexen Zusammenwirkens der einzelnen Baustoffe und Komponenten.

Sogenannte Reaktive Brandschutzsysteme, die auf Stahltragwerke aufgetragen werden, können helfen, den Feuerwiderstand zu erhöhen. Die Funktion basiert auf der Ausbildung einer wärmedämmenden Schaumschicht, angeregt durch einen vom Brand selbst verursachten Temperaturanstieg. Als einzige deutsche Forschungseinrichtung führt die BAM sowohl Untersuchungen zu den grundlegen Wirkmechanismen reaktiver Brandschutzsysteme als auch zu deren Verwendung durch. Die Forschung schließt Betrachtungen zur Dauerhaftigkeit und deren Funktionsüberprüfung nach jahrzehntelangem praktischem Einsatz ein.

Abplatzungen von Betonoberflächen sind neben der thermischen Degradation eine der Hauptschädigungsprozesse von brandbeanspruchten Beton- und Stahlbetonbauteilen. Die daraus resultierende Verringerung des tragfähigen Querschnitts und die damit einhergehende Freilegung der Bewehrung führen zur Verminderung der Tragfähigkeit und in einigen Fällen zum Bauteilversagen. Für den Bau und Erhalt sicherer Infrastruktur aus Beton wird an der Analyse der Auswirkungen von Abplatzungen und deren maßgeblichen

Einflussparametern sowie an Vermeidungsstrategien mittels Material- und Bauteilbrandversuchen geforscht.

Nachhaltige Materialien (nachwachsende Rohstoffe, Biopolymere), Leichtbau (Schäume und Composite), neue Materialien (Nanocomposite, Beschichtungen) sowie synergistische Multikomponent-Flammschutzsysteme stehen im Vordergrund bei den Untersuchungen des Brandverhaltens, dem Flammschutz und den Flammschutzmechanismen von zukünftigen Polymerwerkstoffen, aktuellen Werkstoffentwicklungen sowie neuen Flammschutzkonzepten.

Die Entwicklung neuartiger Materialien sowie Konstruktionen mit verbesserten Festigkeits- und Dauerhaftigkeitseigenschaften und deren Einsatz in der Praxis ermöglichen den Bau von nachhaltigeren, häufig auch leichteren und filigraneren Konstruktionen. Diese sind im Sinne der Ressourcenschonung und der Reduzierung der CO_2-Emissionen unumgänglich. Neben der Untersuchung des Brandverhaltens von Bauwerken aus Holzbaustoffen umfasst dies auch gänzlich neue Materialien, z. B. auf Carbonbasis. Die positiven Eigenschaften dieser innovativen Materialien und Konstruktionen sind in Einklang mit den Anforderungen des Brandschutzes zu bringen, da der positive Effekt der Bauteilmasse, die als Wärmesenke im Brandfall fungiert, bei Leichtbaukonstruktionen in der Regel geringer ausgeprägt ist. Die BAM liefert mit ihrer Forschung einen wichtigen Beitrag, damit innovative Konstruktionen in vollem Umfang den brandschutztechnischen Anforderungen gerecht werden.

Durch den Klimawandel nehmen Perioden längerer Trockenheit und Hitze weltweit zu, die auch Vegetationsbrände in Deutschland immer wahrscheinlicher machen. Für eine bessere Vorhersage, Prävention sowie für die Adaption von Löschtaktiken werden daher Ausbreitungsmechanismen von Bränden in Waldböden experimentell und numerisch untersucht. Weitere Schwerpunkte stellen die Brandfrüherkennung zum Schutz von historischen Gebäuden und das Brandverhalten von Materialien dar.

Sicherheit und Lebensdauer von Bauwerken

Die Instandhaltung der baulichen Infrastruktur ist eine der Voraussetzungen für eine effiziente und produktive Wirtschaft und das Wohlergehen der Bevölkerung. Hierfür werden ständig verbesserte Materialien und Technologien benötigt, da auch die Ansprüche an diese stetig steigen. Gleichzeitig müssen auch aktuelle Anforderungen in Bezug auf die Material- und Ressourceneffizienz, den Umweltschutz und die Kreislaufwirtschaft Berücksichtigung finden. Vor diesem Hintergrund werden an der BAM neue leistungsfähige Instandsetzungsmaterialien und -systeme entwickelt, untersucht und im Hinblick auf eine technisch sinnvolle Anwendung bewertet.

Das komplexe Zusammenwirken verschiedener Baustoffe in Baukonstruktionen erfordert beispielsweise eine besondere Betrachtung für eine gezielte Steuerung der Eigenschaften. Modernste zerstörende und zerstörungsfreie Analyseverfahren bilden die Basis für komplexe Bauwerksuntersuchungen. Aktuell stehen verschiedene Dauerhaftigkeitsaspekte von Bundesautobahnen in Betonbauweise im Fokus, für welche verschiedene Ansätze zur Schadensvermeidung und zur Erhöhung der Dauerhaftigkeit erprobt werden.

In der großmaßstäblichen Bauteilanalyse liegen die Schwerpunkte derzeit auf Untersuchungen zur Ermüdungsfestigkeit von Bauteilen, insbesondere von Schweißverbindungen und Betonbauteilen bzw. -fugen. Untersuchungen von Bauteilen unter stoßartiger Belastung, von alternativen Bauweisen wie Lehmmauerwerk oder von Lager- und Dämpfungselementen zeigen das breite Anwendungsspektrum in der modernen Bauteilprüfung.

Der Korrosionsschutz im Bauwesen stellt die Dauerhaftigkeit von Bauwerken sicher und gewährleistet damit die technische Sicherheit über sehr lange Nutzungszeiträume. Dabei müssen sowohl die technischen und konstruktiven Anforderungen unterschiedlicher Bauwerke berücksichtigt werden als auch die aus den Standorten resultierenden Anforderungen. Um die erhöhten Anforderungen bezüglich der Nutzungsdauer von bis zu 100 Jahren gewährleisten zu können, werden aktuell z. B. feuerverzinkte Betonstähle hinsichtlich ihrer expositionsabhängigen Dauerhaftigkeit umfassend untersucht und bewertet.

Im Bereich innovativer Baustofftechnologien bilden neue Applikationstechniken (z. B. 3-D-Druck), Anwendungsbereiche (Injektionstechniken) oder die Entwicklung neuer Messverfahren und -geräte Chancen, den neuen oder geänderten Anforderungen an Baustoffe, Bauteile oder Bauwerke gerecht zu werden. Auf stofflicher Ebene stehen bituminöse und andere organische Bau- und Dichtstoffe, die daraus hergestellten Bauprodukte sowie Konstruktionen der Abdichtungstechnik im Straßen- und Ingenieurbau im Vordergrund. Aktuell werden die technischen Möglichkeiten zum Nachweis der Funktionsfähigkeit und Dauerhaftigkeit sowohl der verwendeten Stoffe als auch kompletter Konstruktionselemente (Fugenfüllungen, Brückenbeläge, Fahrbahnübergangskonstruktionen) unter den jeweils relevanten Beanspruchungen stark erweitert.

Die Entwicklung von physikalischen Simulationsmodellen erlaubt es, experimentelle Untersuchungen zu verallgemeinern und mit Hilfe von Computermodellen die Eigenschaften einer noch nicht gebauten Struktur zu prognostizieren. Dies ist sowohl im Bereich des Designs, aber auch bei der Lebensdauerbewertung oder einer Zuverlässigkeitsanalyse besonders relevant. Im Bereich Mechanik der Baustoffe ist ein Ziel die Entwicklung von neuen Verfahren zur Simulation des Materialverhaltens, insbesondere bei der additiven Fertigung von Beton, unter Berücksichtigung des komplexen Herstellungsprozesses und für verschiedene Belastungsszenarien wie z. B. Explosion, Ermüdung oder statische Verkehrslasten. Für die Anwendung von Simulationsmodellen ist es wichtig, diese mit Hilfe von experimentellen Daten zu kalibrieren und zu validieren. Die BAM untersucht dabei neue stochastische Verfahren, um die Unsicherheit sowohl der Messdaten als auch der Modelle berücksichtigen zu können und die Prognosequalität der Modelle abzuschätzen. Dieser

Prozess muss weiterhin gut dokumentiert und komplett reproduzierbar sein. Dazu entwickelt die BAM Ontologien und automatisierte Datenpipelines. Für die Anwendung in Echtzeitanwendungen, wie einem Digitalen Zwilling, reduziert die BAM die Rechenzeit komplexer Simulationsmodelle durch Verfahren des Maschinellen Lernens und durch Modelle mit reduzierter Ordnung.

Sicherheit von Industrieanlagen und Verkehrswegen

Auf dem Gebiet der Sicherheit von Industrie- und Verkehrsanlagen befassen wir uns mit aktuellen interdisziplinären, gesellschaftlichen und sicherheitstechnisch relevanten Fragestellungen für entsprechende Bauwerke und Anlagen sowie der Sicherheit und dem Schutz von Personen. Dies betrifft vor allem Gefährdungen aus außergewöhnlichen Ereignissen wie Brand, Explosion oder Stoßbeanspruchung sowie Fragestellungen im Bezug zu Klimawandel oder der Nutzung neuer Energieträger. Dementsprechend werden auf dem BAM TTS sowohl Brandversuche in unterschiedlichsten Szenarien als auch Maßnahmen des konstruktiven Explosionsschutzes, welche die Auswirkungen von Explosionen auf ein unbedenkliches Maß vermindern oder die Explosionsausbreitung räumlich beschränken, untersucht.

Ein wesentlicher Schwerpunkt ist neben den experimentellen Untersuchungen die begleitende numerische Modellierung der Szenarien. Grundlegendes Ziel im Bereich Brandschutz ist die Erforschung mathematisch-physikalischer Modelle für Wärme- und Stoffübertragung, Brand- und Rauchausbreitung, Toxizität und Lichtschwächung sowie für die numerische Untersuchung von Schadensereignissen, insbesondere Großschadensfeuern in Industrieanlagen oder Verkehrsknotenpunkten. Die Forschungen sind Voraussetzung für zuverlässige Rechenmodelle, die Ermittlung von Einwirkungen (z. B. Brandkurven) auf Bauteile, die Untersuchung von Auswirkungen auf Personen und das Bauwerk, das Ableiten von Anforderungen an die Bauwerkskonstruktion sowie Normen- und Regelwerksarbeit und den Wissenstransfer. Derzeit erforscht werden Modelle zur Kopplung des Brandgeschehens mit dem thermomechanischen Bauteilverhalten, zur Verknüpfung von Explosionsszenarien mit Brandereignissen sowie zur Untersuchung von Brandbekämpfungsvorgängen.

Auf dem BAM TTS werden Maßnahmen des konstruktiven Explosionsschutzes, welche die Auswirkungen von Explosionen auf ein unbedenkliches Maß vermindern oder die Explosionsausbreitung räumlich beschränken, untersucht. In pränormativen Projekten werden Turbulenzeinflüsse auf Druckentlastungen in großen Volumen untersucht sowie eine standardisierte Prüfmethode für instabile Detonationssicherungen erarbeitet. Um den sicheren Transport von Gefahrgütern zu gewährleisten, ist auch die Berücksichtigung auslegungsüberschreitender Belastungen, z. B. aus Unfallszenarien, zu berücksichtigen. Derartige experimentelle Untersuchungen dienen zur Verifizierung numerischer Berechnungen und sind für die sicherheitstechnische Bewertung der Umschließungen unabdingbar.

Im Bereich des Störfallrechts müssen Aussagen zu möglichen Auswirkungen von Störfällen getroffen werden. Hierfür werden numerische Simulationen zur Ausbreitung von brennbaren oder toxischen Gasen und zur Berechnung der Auswirkungen von Bränden und Explosionen durchgeführt. Durch den vermehrten oder geplanten Einsatz von Wasserstoff stellt sich aktuell die Frage, inwieweit die bisherigen an Kohlenwasserstoffen ausgerichteten Modelle auch für dieses Gas geeignet sind.

Der Korrosionsschutz im Maschinen- und Anlagenbau gewährleistet die technische Sicherheit von Prozessketten und Produkten. Die Vermeidung korrosionsbedingter Ausfälle von Produktions- und Versorgungsanlagen ist von branchenübergreifender Bedeutung für die Sicherheit von Lebensmitteln, Trinkwasser, Medizinprodukten sowie für die technische Gebäudeausrüstung. Die technologische Entwicklung im Anlagenbau erfordert eine fortlaufende Entwicklung innovativer Korrosionsschutzkonzepte und Prüfmethoden zur Sicherstellung des Korrosionsschutzes sowie die laufende Anpassung technischer Regelwerke, an der die BAM aktiv arbeitet.

Transport und Lagerung von Gefahrstoffen und -gütern

Das internationale Gefahrgutrecht sieht vor, dass Gefahrgüter und Gefahrstoffe nur in solchen Verpackungen transportiert werden dürfen, die über eine Bauartzulassung verfügen und deshalb die entsprechenden Kennzeichen tragen. Die BAM ist die hierfür zuständige Behörde in Deutschland. Darüber hinaus ist die BAM

Ansprechpartnerin für alle Fragen hinsichtlich des korrekten und sicheren Transports und der Verwendung der Gefahrgutverpackungen. Aus diesen rechtlichen Aufgaben ergeben sich Prüfaufgaben und Forschungsbedarfe zu sicherheitsrelevanten Fragestellungen, wie der Verträglichkeit von Füllgütern mit den vorgesehenen Verpackungsmaterialien oder zu den Prüfmethoden für Verpackungen. Ein wichtiger Aspekt im Zusammenhang mit Verpackungsfragen im Gefahrguttransportrecht ist deren Eignung für den jeweiligen Zweck. Dabei spielen insbesondere Umwelteinflüsse beim Transport sowie nach dem Gebrauch der Verpackung eine bedeutende Rolle. Beispielsweise werden Kunststoffe auf Beständigkeit gegen Temperaturen und Sonnenlicht und gegen das transportierte Füllgut, z. B. Chemikalien und Zusatzstoffe, untersucht. Im Fokus der Arbeiten stehen auch der Abbau in der Umwelt (beispielsweise von Mikroplastik), das Recycling und die Entsorgung.

Für den Transport und die Lagerung von industriell verwendeten Stoffen und Produkten ist die Wechselwirkung der Medien mit den relevanten technischen Werkstoffen eine wichtige sicherheitstechnische Fragestellung, um z. B. nachteilige Auswirkungen auf die Dichtigkeit von Behältern und Rohrleitungen zu verhindern. Umfassende Kenntnisse und Erfahrungen zur Korrosivität von unterschiedlichsten Medien sind essenziell um zu vermeiden, dass Gefahrstoffe in die Umwelt gelangen oder Menschen durch Kontakt mit den Medien zu Schaden kommen. Durch die Etablierung und Weiterentwicklung des entsprechenden Regelwerkes wird der Transport von Gütern auf Straßen, Schienen und in den Rohrleitungsnetzen sichergestellt.

3.3 Themenfeld Umwelt

Nachhaltiges Wirtschaften und effektiver Klima- und Ressourcenschutz sowie ökologische Schutzziele einhalten – das steht im Fokus der Aktivitäten im Themenfeld Umwelt. Materialien und Produkte stehen über ihren gesamten Lebenszyklus – von der Herstellung über die Nutzung bis zur Entsorgung – in Wechselwirkung mit der Umwelt (Wasser, Boden, Luft). Dabei sind sie Umwelteinflüssen ausgesetzt und beeinflussen durch Emissionen Umwelt, Mensch und Gesundheit. Schwerpunkte der Arbeiten in der BAM bilden die Untersuchung des Umweltverhaltens von Materialien und Produkten, die Ressourcenrückgewinnung und Materialverwertung sowie die Entwicklung von Nachweisverfahren und Prüfmethoden für Umweltschadstoffe.

Umweltverhalten von Materialien und Produkten

Um das Umweltverhalten und damit die Sicherheit von Materialien besser vorhersagen zu können, wird der Schadstoffaustrag aus Materialien und Produkten experimentell erfasst. Hierfür werden technische Versuchseinrichtungen zur Ermittlung des Schadstoffaustrags, wie beispielsweise Bewitterungskammern und Elutionssäulen verwendet. Auch die Emissionen aus neuen und recyclierten Materialien und Produkten, wie Bauprodukten, Bedarfsgegenständen, 2D- und 3D-Druckern und Nanomaterialien, wie auch deren Immission und Wirkung auf Material und Umwelt werden untersucht und charakterisiert. Hierfür werden leistungsfähige Verfahren, auch für neue, bisher nicht näher untersuchte Luftschadstoffe, erarbeitet. Um die Ausbreitung von Schadstoffen in Boden und Grundwasser zu beurteilen, werden Verfahren zur Ableitung des Gefährdungspotentials aus dem experimentell bestimmten Quellterm für mittelfristige Zeiträume weiterentwickelt. Ein Schwerpunkt sind Untersuchungen in Systemen mit neuartigen Schadstoffen (emerging pollutants, z. B. perfluorierte Verbindungen) und Biozide.

Die Bauindustrie verursacht immense Stoffströme. Einerseits entsteht hier die Hälfte des deutschen Abfallaufkommens und andererseits fließen mehr als 90 % der eingesetzten mineralischen Primärrohstoffe in den Bausektor. Durch den Einsatz von Sekundärrohstoffen aus mineralischen Bau- und Abbruchabfällen oder industriellen Reststoffen können natürliche Ressourcen und Deponieraum gespart, CO_2-Emissionen verringert und zur Nachhaltigkeit im Bauwesen beigetragen werden. Die BAM untersucht und beurteilt potenziell geeignete Reststoffe und ihr Verhalten im Beton. Mit dem Augenmerk auf die Leistungsfähigkeit, Dauerhaftigkeit und Umweltverträglichkeit der neuen Bauprodukte wird an ihrer Umwelt- und Produktsicherheit gearbeitet.

Das werkstoffspezifische Korrosionsverhalten von Konstruktionswerkstoffen wird direkt oder indirekt durch atmosphärische Einwirkungen beeinflusst. Durch geeignete Werkstoffauswahl und Korrosionsschutzmaßnahmen wird der Eintrag von Stoffen, wie z. B. Schwermetallionen, in die Umwelt beeinflusst. Zur Sicherstellung einer validen Datenbasis bzgl. der relevanten Einwirkungen dienen Auslagerungsversuche in natürlichen und künstlichen Klimaten. Der globale Technologiemarkt und die Verlagerung technologischer Prozesse vom Land auf das Meer erfordern eine ständige Erweiterung der Datenbasis und des Datenaustausches durch Vernetzung mit anderen Forschungseinrichtungen und zwischen den Themenfeldern der BAM.

Korrosion durch Mikroorganismen ist ein weltweites Problem. Betroffen sind Materialien jeglicher Art: Stahl,

Glas, Kunststoffe und sogar Beton. Die Mikroorganismen besiedeln Oberflächen, attackieren teils direkt oder produzieren durch ihren Stoffwechsel chemische Substanzen, die für die Materialien schädlich sind. An der BAM ist die Untersuchung der mikrobiell beeinflussten Korrosion oder kurz MIC ein Schwerpunktthema. Die BAM ist auf diesem Gebiet bereits länger aktiv und so breit aufgestellt wie kaum ein anderes Institut in Europa. Die Forschung der BAM dient der Entwicklung von interdisziplinären Lösungsansätzen für die frühzeitige Erkennung von MIC und von neuen Prüfmethoden zur Beurteilung von Materialbeständigkeit in Gegenwart von Mikroorganismen sowie der Erarbeitung von innovativen, prophylaktischen Maßnahmen.

Das Wissen um die genomische Beschaffenheit der materialbesiedelnden und -zerstörenden Organismen bildet eine Grundlage zur Weiterentwicklung der Forschung im Bereich biogene Materialschädigung. Es werden Genome verschiedener und teilweise bisher unbekannter Mikroorganismen und Insekten sequenziert, die Eigenschaften wie Kunststoffabbau, Holzabbau, Metallkorrosion oder Solaranlagenbesiedlung aufweisen.

Durch den kombinierten Einsatz molekularbiologischer, mikroskopischer und hochauflösender analytischer Methoden werden biogene (biofilmverursachte) Veränderungen auf Objekten in der Technosphäre wie Gebäudefassaden, Solaranlagen, Metallkonstruktionen in marinen Habitaten sowie in unterirdischen geologischen Wasserstoffspeichern oder Endlagerbehältern quantitativ nachgewiesen. In Laborexperimenten mit Modellbiofilmen (methanogene Archaea, sulfatreduzierende Bakterien und halophile Mikroorganismen) werden die Mechanismen der Verwitterungs- und Korrosionsprozesse aufgeklärt. Genetisch manipulierbare (genomeditierte) schwarze Modellpilze werden eingesetzt, um das Verständnis der Materialbesiedlungsprozesse zu verbessern und innovative Bekämpfungsmethoden zu entwickeln. Der Einfluss materialrelevanter Mikroben wird unter Einbeziehung der Analytik, Sensorik, zerstörungsfreien Prüfung, mikroskopischer und molekularbiologischer Verfahren untersucht. Zur Quantifizierung und Charakterisierung von Mikroorganismen und den mikrobiell verursachten Materialschäden an Oberflächen und technischen Flüssigkeiten werden Mess- und Prüfverfahren entwickelt. Ziel ist insbesondere die Entwicklung von Schnelltests und mobilen Testverfahren, die vor Ort zur Identifizierung einer Materialbesiedelung und -schädigung angewendet und ausgelesen werden.

Die Bekämpfung von Materialschädlingen mit für die Umwelt minimalinvasiven oder biologischen Methoden wird untersucht, wobei die Selektivität und Auswirkung der Biozide von der Single-Cell-Ebene bis zur Populationsebene betrachtet wird. Besonders intensiv wird die Rolle von Bioziden bei der Entstehung und Verbreitung von antimikrobiellen Resistenzen in der Umwelt erforscht. Dabei wird auch die Veränderung der Mikrobengenome im Anfangs- und Endzustand betrachtet. Bei der Entwicklung von neuartigen Substanzen, z. B. antimikrobielle Stoffe, insbesondere mit Hilfe von Termiten, engagiert sich die BAM in der gelben Biotechnologie (Insektenbiotechnologie).

Ressourcenrückgewinnung und Materialverwertung

Durch eine konsequente Weiterentwicklung der Kreislaufwirtschaft unter Einbeziehung von Massenreststoffen ist die Erhöhung der Rohstoffproduktivität erreichbar. Ziel ist es, geschlossene und effiziente Energie- und Stoffkreisläufe für Produktionsprozesse zu schaffen. Dabei anfallende (Abfall-)Stoffströme sollen wieder nutzbar gemacht werden, um so die Kosten für Energie und Reststoffentsorgung nachhaltig zu senken. Die Stoffströme gilt es den spezifischen Gegebenheiten anzupassen, um diese für die weitere Verwertung optimal in den Produktionsprozess zu integrieren. Hierfür entwickelt die BAM maßgeschneiderte Anlagen- und Prozesslösungen für die jeweilige Fragestellung. Die Aufgaben spannen einen Bogen von der Geräteintegration und Methodenentwicklung elementanalytischer Online-Verfahren (Röntgenfluoreszenz- und LIBS- Spektroskopie (laser-induced breakdown spectroscopy)), über die Herstellung von innovativen Referenzmaterialien bis zur Bewertung und Validierung von neuen Technologien mittels etablierter Analytik. In dieser Betrachtung spielen große Reststoffströme der industriellen Produktion, Baurestmassen sowie Aschen und Schlacken eine Rolle. Für die Verwertung solcher Reststoffe werden Verfahren der Stofftrennung entwickelt und bewertet. Die Rückgewinnung von Sekundärrohstoffen aus Abfällen wird mit nassmechanischen Verfahren in einer halbtechnischen Aufbereitungsanlage untersucht. Schwerpunkt der aktuellen Arbeiten bilden Aschen aus der thermischen Abfallbehandlung und Baurestmassen.

Es werden thermochemische Verfahren mit dem Ziel entwickelt, anorganische industrielle Reststoffe und

Abfälle umweltfreundlich und ressourcenschonend zu behandeln. In vielen Fällen steht die Rückgewinnung ökonomisch und technologisch bedeutender Wertstoffe im Fokus. Es werden unter anderem pyrometallurgische Prozesse im kleintechnischen Lichtbogenofen bei Temperaturen oberhalb von 1.500°C untersucht.

Umweltschadstoffe

Die BAM entwickelt spurenanalytische Verfahren zur Quantifizierung organischer Umwelt- und Lebensmittelschadstoffe, insbesondere für neuartige Schadstoffe (contaminants of emerging concern). Hierzu zählt auch die Entwicklung von Referenzmaterialien und Referenzverfahren. Einen instrumentellen Schwerpunkt bilden gas- und flüssigchromatographische Methoden insbesondere in Kopplung mit massenspektrometrischer Detektion, unterstützt durch die Entwicklung und Implementierung neuer stabiler Isotopenstandards für die Isotopenverdünnungsanalyse. Für die Schadstoffklasse der poly- und perfluorierten Verbindungen (PFAS) steht wegen der Vielzahl der möglichen Substanzen die Entwicklung von Summenparametern im Vordergrund.

Die Entwicklung und Bereitstellung von Referenzatmosphären und Emissionsreferenzmaterialien ermöglicht eine praxisnahe Überprüfung und Kalibrierung und idealerweise Rückführung bestehender Referenzverfahren auch in Multikomponenten-Zusammensetzungen. Hiermit lassen sich auch neue, möglicherweise sehr einfache Messverfahren (z. B. Citizen Science, Passivsammler, Sensoren) vergleichen, kalibrieren und bewerten.

Die Einbringung von Bioziden in Kulturgut ermöglicht den Schutz vor Insekten- und Schimmelbefall. Die eingebrachten Substanzen stellen jedoch auch eine Gefahr für Mensch und Umwelt dar und können zudem Kunstwerke schädigen. Für die Erhaltung des Kulturgutes befasst sich die BAM daher mit der qualitativen und quantitativen Bestimmung der Biozide für die Bewertung des Gefahrenpotentials und die Erstellung von Konzepten zur Detoxifizierung.

Ersatzwerk- und -schmierstoffe für reibbeanspruchte und verschleißbehaftete Komponenten müssen aufgrund von Ressourcenverknappung und sich verschärfender Umweltgesetzgebung identifiziert werden. In der BAM werden die Schmierstoffe in Modellsystemen nach etablierten Standards tribologisch charakterisiert, um werkstoff- und schmierstofftechnische Lösungswege zur Umsetzung der Umweltgesetzgebung bereitzustellen.

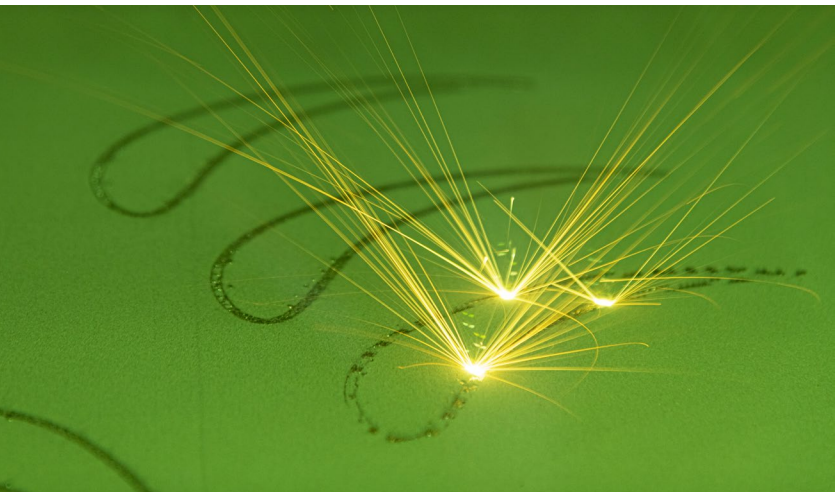
3.4 Themenfeld Material

Materialwissenschaft und Werkstofftechnik bilden als klassische Kernkompetenzen der BAM essenzielle Schlüsseltechnologien einer modernen, wirtschaftlich starken Gesellschaft. Im Themenfeld Material werden materialwissenschaftliche und werkstofftechnische Erkenntnisse in den Aktivitätsfeldern Additive Fertigung, nano@BAM, Materialdesign, Charakterisierung neuer Materialien und Stoffe sowie Degradation und Life Cycle von Werkstoffen gebündelt. Weiterhin beteiligt sich die BAM an verschiedenen Daten bzw. Digitalisierungsinitiativen, z. B. bei Material Digital, NFDI und Mat-o-Lab (s. auch 3.5).

Additive Fertigung

Die BAM forscht für die sichere Anwendung von Verfahren für die Additive Fertigung (Additive Manufacturing, AM) sowie die Qualifizierung von Werkstoffen und daraus additiv gefertigten Produkten für verschiedene Anwendungsfelder. Um den Einsatz additiv gefertigter Komponenten in sicherheitstechnischen Anwendungen industrietauglich zu machen, bündelt die BAM ihre interdisziplinäre Expertise in der additiven Fertigungstechnik, der Werkstoffanalytik und der zerstörungsfreien Materialprüfung im neu gegründeten Kompetenzzentrum AM@BAM.

Die BAM verfügt über hochmoderne Anlagen für die derzeit wichtigsten industriellen additiven Fertigungsverfahren: Laserstrahlschmelzen (Laser Powder Bed Fusion), Laser-Pulver-Auftragsschweißen (Laser Metal Deposition) und Lichtbogengenerieren (Wire Arc Manufacturing). Weiterhin fördert sie den Ausbau der verfahrensübergreifenden Expertise im Bereich AM durch interdisziplinäre Zusammenarbeit sowie den Ausbau von Netzwerken mit externen Stakeholder*innen.



Beim pulverbettbasierten Laserstrahlschmelzprozess ist das Verständnis über die Wechselwirkungen zwischen Prozessführung, Bauteilgeometrie und resultierenden Werkstoffeigenschaften von entscheidender Bedeutung. Ziel ist es durch experimentelle und numerische Methoden die lokale Temperaturentwicklung im Druckprozess zu verstehen, kontrollierte Prozessführungen für optimale Mikrostrukturen abzuleiten und Methoden für eine Qualitätssicherung zu entwickeln, um den Einsatz von additiv gefertigten Komponenten in sicherheitsrelevanten Anwendungen zu ermöglichen.

Bei allen additiven Fertigungsverfahren, die auf Schmelzprozessen beruhen, sind örtliche und zeitliche Temperaturgradienten und deren Verteilungen die wesentlichen Parameter, die grundlegend die Struktureinstellung bestimmen. Die Integration von Thermografie mit Infrarot-Kameratechnik in den Produktionsprozess ist daher der Schlüssel für eine lückenlose Qualitätskontrolle. Die großen Datenmengen, die dabei innerhalb kürzester Zeit anfallen, erfordern den Einsatz von KI-basierten Auswertemethoden. In der Forschungsanlage, die sich aktuell noch im Aufbau befindet, soll das selektive Laserschmelzen mit umfangreicher Sensorik untersucht werden. Diese Aktivitäten schaffen die Grundlagen für eine lückenlose Dokumentation, fehlerfreie und damit ressourcenschonende additive Fertigung sicherheitsrelevanter Bauteile und Komponenten.

Neben der Prozesskontrolle können additiv gefertigte Werkstoffe unter Verwendung von Hochenergie-Röntgen- und Neutronentechniken charakterisiert werden. Auf diesem Weg lassen sich 3D-Analysen von oberflächennahen und inneren Volumeneigenspannungen sowie von Mikrostrukturen durchführen.

Um besondere mechanische, tribologische oder korrosive Belastbarkeiten von Komponenten zu erzeu-

gen, werden Verfahren für eine gezielte Einstellung von Werkstoffeigenschaften und -gradienten bei der additiven Fertigung durch u.a. Legierungsmodifikationen und Randschichtbearbeitungen entwickelt. In diesem Segment verfügt die BAM über ausgezeichnete Kompetenzen im Bereich der Hochtemperaturanwendungen und damit verbundenen mikrostrukturellen Schädigungsmechanismen, die weitestgehend unerforscht sind. Darüber hinaus werden die Prozesse und die Prozesskontrolle so weiterentwickelt, dass auch Fertigungen unter besonderen Bedingungen wie der Schwerelosigkeit im Weltraum ermöglicht werden.

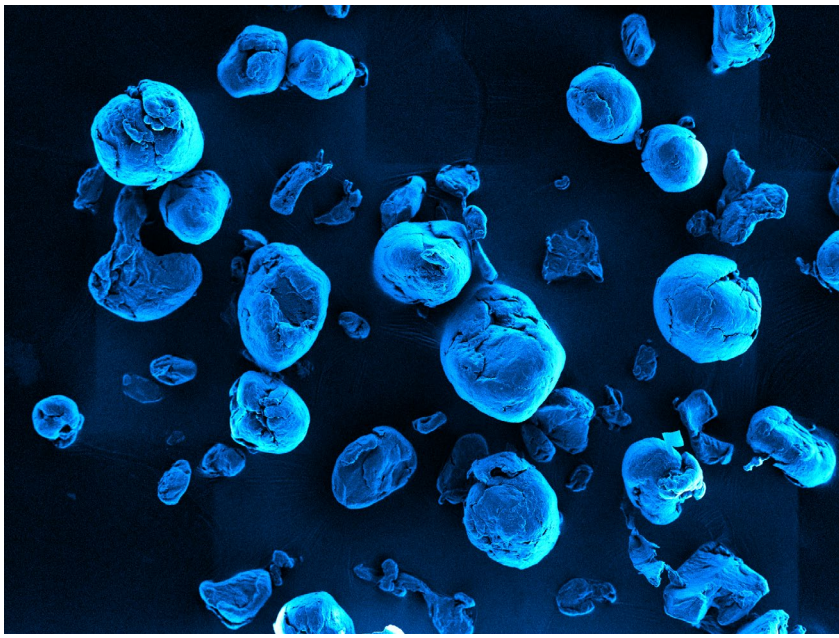
Hybride Prozesse werden in der BAM untersucht und weiterentwickelt, in denen es u.a. Ziel ist unterschiedliche Materialklassen direkt kombiniert zu drucken. Hierfür werden Prozessstrategien entwickelt und anlagentechnische Voraussetzungen für die Kombination additiv gefertigter mit konventionellen Bauteilen untersucht.

nano@BAM

Die Eigenschaften von Nanomaterialien unterscheiden sich stark von denen makroskopischer Materialien, wodurch Nanomaterialien so interessant für verschiedene Anwendungen sind. Die BAM forscht an Nanomaterialien unter dem Aspekt der Sicherheit. Das Kompetenzzentrum nano@BAM bündelt die Arbeiten zu funktionalisierten Nanoobjekten, Strukturen aus Nanoobjekten, Nanoschichten, Nanotechnik und innovativen Materialien.

Die BAM arbeitet an der Entwicklung von Methoden zur Charakterisierung der strukturellen und der optischen Eigenschaften von nanoskaligen Materialien und zu ihrer Oberflächenchemie mit optisch-spektroskopischen und elektrochemischen Methoden. Die Validierung dieser Methoden durch Methodenvergleiche und ggf. Ringversuche und ihre Applikation zur Charakterisierung neuer Funktionsmaterialien und ggf. ihre Einbringung in die Normung, in Kombination mit entsprechenden Referenzmaterialien, bildet einen weiteren Teil dieser Arbeiten.

Bildgebende Verfahren, die eine laterale oder Tiefenauflösung auf der Nanometer-Skala realisieren, spielen in der Analytik der Materialien eine wichtige Rolle und werden an ausgewählten 3D-, 2D- und 1D-Strukturen



korrelativ weiterentwickelt. Für die morphologische Charakterisierung werden die hochaufgelöste Elektronenmikroskopie, AFM (Atomic Force Microscopy), Röntgenkleinwinkelstreuung (SAXS, Small Angle X-ray Scattering), Weißlichtmikroskopie und Imaging-Ellipsometrie angewendet, für die chemische Charakterisierung XPS (X-Ray Photoelectron Spectroscopy) und HAXPES (Hard X-Ray Photoelectron Spectroscopy), ToF-SIMS (Time Of Flight Secondary Ion Mass Spectroscopy), Augerelektronenmikroskopie und mechanische Eigenschaften werden mittels FT-IR (Fourier-Transform-Infrared Spectroscopy) und der instrumentierten Eindringprüfung analysiert. Auch elektrische Eigenschaften und optische Konstanten werden korrelativ untersucht.

Netzwerke aus Polymeren mit Poren im Bereich von 1 bis 100 nm werden synthetisiert und mit Hilfe der Röntgenkleinwinkelstreuung und Methoden der Lichtstreuung charakterisiert. Vor allem werden Nanogele in wässrigen Medien untersucht. Induzierte Selbstheilungsprozesse auf Basis von Polymerkettendiffusion nach mechanischer Schädigung sind ebenfalls Gegenstand der Untersuchungen.

Durch eine photochemische Reaktion organischer Moleküle mittels eines ortsgesteuerten Femtosekunden-Pulslasers kann eine gelartige Matrix Lage für Lage so angeregt werden, dass sie sich zu Makromolekülen verbindet und aushärtet. Anwendungen der Technik liegen z. B. in der Modifikation von Sensoroberflächen zur Optimierung ihrer Leistungsfähigkeit oder in der Herstellung

von gedruckten Keramikbauteilen mit Strukturgrößen im sub-Mikrometer-Bereich als Absorber oder Filter. Es ist aber noch ein hohes Maß an Grundlagenforschung erforderlich, um z. B. die Schrumpfprozesse bei der Aushärtung oder die Festigkeit der gedruckten Struktur zu optimieren, wozu Nanopartikel bei einer Druckauflösung im Bereich von 200 nm geeignet sind. In der Röntgentomographie der Strukturen werden Referenzmaterialien mit dreidimensionalen Referenzgeometrien und nichtmetallischer und nicht-keramischer Zusammensetzung eingesetzt. Dem voran geht eine aufwendige Entwicklung von Teststrukturen für die Beurteilung der Zuverlässigkeit des Druckvorgangs.

Materialdesign

Gläser sind als Schlüsselkomponenten moderner und zukünftiger Technologien zunehmend im Fokus innovativer Material- und Produktentwicklungen. Um die steigenden Anforderungen an ihre schnelle und zielgenaue Entwicklung zu erfüllen, sind datengetriebene Methoden zur Hochdurchsatz-Glasentwicklung ein gegenwärtiger internationaler Schwerpunkt. Gestützt auf ein weltweit einzigartiges robotisches System zur Glassynthese und eingebunden in eine enge Kooperation mit den führenden deutschen Glasforschungsinstituten, der Schott AG und der Deutschen Glastechnischen Gesellschaft, arbeitet die BAM an den Grundlagen der digitalen Infrastruktur zur beschleunigten datengetriebenen Glasentwicklung.

Neben Gläsern spielen hier auch Metalle und anorganische Materialien in der Materialentwicklung auf verschiedenen Gebieten eine wichtige Rolle. Die BAM entwickelt neuartige TWIP-Stähle (twinning induced plasticity-Stähle), die eine gute Kombination aus hoher Festigkeit, hoher Duktilität und Schadensbeständigkeit bieten. Eine neue Materialklasse, die in der Forschung immer mehr an Interesse erfährt, sind Hoch-Entropy-Materialien (HEM), ein Überbegriff, der sowohl die Multi-Hauptelement-Legierungen (MPEA) und die anorganischen Materialien mit komplexen Zusammensetzungen umfasst. Diese neuen Materialien ermöglichen ein anwendungsspezifisches Materialdesign auf atomarer Ebene. In den Forschungsarbeiten der BAM basiert die Vorhersage der Mikrostruktur und die Optimierung der Zusammensetzung auf Simulationsergebnissen. Die Materialien werden abhängig vom Anwendungsfeld, hinsichtlich deren Korrosionseigenschaften, mechanischer Kenngrößen und elektrokatalytischer Aktivität und Selektivität charakterisiert und optimiert. Um mechanische und funktionale Eigenschaften von metallischen Legierungen zu bestimmen, werden ab initio und Phasenfeld basierte Methoden verwendet. Dabei geht es um das Verständnis von experimentellen Beobachtungen genauso wie um die Vorhersage neuer Materialien. Mit Multiskalenansätzen wird auch eine Beschreibung auf Meso- und Nanoskalen-Ebene angestrebt.

Durch die unendliche Anzahl der Kombinationen der Syntheseparameter wie die Zusammensetzung, Mikrostruktur und Nachbehandlungsschritten entsteht ein unbegrenzter Experimentierraum, der nur durch eine Vorselektion anhand Simulationsergebnissen und mittels eines hoch-automatisierten Forschungsansatzes erforscht werden kann. Damit gewinnt die automatisierte Synthese und Charakterisierung, sowie KI-unterstütztes, automatisiertes Design-of-Experiments in der Materialentwicklung eine immer größere Rolle.

In diesem Zusammenhang entwickelt die BAM Material Acceleration Platforms (MAPs) für die Erforschung von neuartigen Legierungen und Nano-, Energie- und Baumaterialien mit einem spezifischen Fokus auf Ressourcenrückgewinnung und Materialsubstitution. Die MAPs, die an der BAM entwickelt werden, bestehen aus automatisierten Synthese- und Charakterisierungsmodulen, die in unterschiedlichen Konfigurationen gekoppelt werden können, um auf neue Aufgaben flexibel reagieren zu können.

Ein Beispiel ist die Plattformlösung (Chemputer), die für die Synthese neuer Funktionsmaterialien eingesetzt wird. Der Chemputer ist eine modulare, automatisierte Plattform, die für die Durchführung von mehrstufigen, lösungsbasierten organischen Synthesen entwickelt wurde. An der BAM erweitern wir diesen Aufbau zur Durchführung automatisierter organischer Synthesen, die autonom durch Rückmeldungen aus der Online-NMR gesteuert werden. Übliche Laborgeräte wie Heizungen und Glasgeräte wie Rundkolben sind mit dem Backbone verbunden und bilden Reaktionsmodule. Lösungen können in diesen Modulen manipuliert werden, und da alle Vorgänge durch ein Softwareskript gesteuert werden, ist die Reproduzierbarkeit zwischen einzelnen Synthesen hoch. Ebenso sind Anpassungen der Synthesebedingungen, falls erforderlich, einfach zu

implementieren und werden in der Reaktionsprotokolldatei und einem Codeversionierungssystem dokumentiert. Ein wichtiger erster Schritt zur Automatisierung von Nanopartikelsynthesen in einer modularen Mehrzweckplattform konnte mit der reproduzierbaren Synthese von Silbernanopartikeln realisiert werden. Die Modularität des Chemputers eröffnet viele Möglichkeiten für die Synthese einer Vielzahl unterschiedlicher Nanopartikel-Morphologien und -Größen und potenziell komplexerer Strukturen.

Ein weiteres Beispiel bietet die Automatisierung der elektrochemischen Analyse und Korrosionsprüfung in dem FRIDA-LAB (Flexible Robotic Platform for Integrated Development and Analysis of 2-D Materials). Die BAM entwickelt in dem FRIDA-LAB die Module für die Automatisierung der Beschichtungsprozesse und Oberflächenbehandlungen gekoppelt mit den Charakterisierungsmodulen für Oberflächentopographie, -chemie und elektrochemischen Eigenschaften. Das KI-unterstützte Design-of-Experiments steuert die Versuchsplanung, um die Optimierung der anwendungsspezifischen Eigenschaften zu beschleunigen. Die aktuellen Arbeiten fokussieren auf die Entwicklung einer weiteren Versuchsebene, die die Untersuchung der Langzeitstabilität der in der Lead-Generation Ebene ausgewählten Materialien ermöglicht. Solche automatisierten Langzeitversuche werden die Forschungsarbeiten der BAM in den Gebieten MIC, Windenergie und Energiematerialien unterstützen.

Neben chemischen und elektrochemischen Methoden werden an der BAM auch neuartige physikalische Prozesse zur Oberflächenbehandlung erforscht. Mittels Femtosekundenlaserimpulsen werden Oberflächen auf der Mikro- und Nanoskala modifiziert. Eine derartige Funktionalisierung eröffnet Anwendungsmöglichkeiten im Reibungs- und Verschleißschutz, in der Medizintechnik, der Fluidik und dem Oberflächenschutz. Aktuelle Forschungsarbeiten fokussieren auf die Strukturierung von Oberflächen für Anti-fouling-Anwendungen und auf die Prozessentwicklung für die Herstellung ressourceneffizienter, neuartiger Photovoltaik-Module.

Charakterisierung neuer Materialien und Stoffe

An der Charakterisierung neuer Materialien und Stoffe wird in der BAM auf vielfältige Weise geforscht. Das Wissen um die physikalisch-chemischen Eigenschaften und Gefährdungen von Chemikalien ist für die Sicherheit in Chemie und Technik von entscheidender Bedeutung. Die BAM engagiert sich daher bei der Prüfung, Bewertung, Einstufung und Zuordnung von Gefahrstoffen und Gefahrgütern. In der Forschung steht hierbei die Entwicklung und Weiterentwicklung von Prüfverfahren für die Einstufung und Klassifizierung von Gefahrstoffen/-gütern im Mittelpunkt. Die Untersuchung und Beurteilung von Gefahren beim Umgang mit brennbaren Gasen, Schüttgütern und Stäuben inklusive hybrider Gemische beinhaltet die Bestimmung sicherheitstechnischer Kenngrößen und weitere Parameter inklusive der Reaktionskinetiken. Der Fokus der Aufgaben liegt auf regenerativen Energiespeichern (chemische Wasserstoffspeicher, Metalle als Energiespeicher, Biomasse, Biogas) sowie neuen Materialien und Techniken (Nanomaterialien, Materialen für additive Fertigung).

Für die Digitalisierung in den Bereichen Materialien und Werkstofftechnik spielen Forschungsdaten eine entscheidende Rolle. Sie werden durch Anreicherung der Messdaten mit Metadaten erzeugt und damit vollständig dokumentiert. Dies trägt zur Datensicherheit und Rückverfolgbarkeit bei und ist Voraussetzung für eine umfassende Datennachnutzung durch interne und externe Nutzer*innen. Im Rahmen der Initiative Nationale Forschungsdateninfrastrukturen (NFDI) MatWerk leistet die BAM in einem Forschungsprojekt Beiträge zur Definition, Strukturierung und Publikation von Referenzdaten. In weiteren Forschungsprojekten werden semantische Strukturen entwickelt, die Voraussetzung für zukünftigen Datenaustausch sind.

Die Material- und Struktureigenschaften von Komponenten und neuen Stoffen werden unter Verwendung von hochempfindlichen Ultraschall- und elektromagnetischen Prüfverfahren untersucht, die an der BAM angepasst und weiterentwickelt werden.

Die Untersuchung von Werkstoffen mittels Elektronenstrahlmikroanalyse schließt den Messbereich vom nm- bis in den µm-Bereich ein und ermöglicht in Kombination mit der quantitativen und nunmehr einzigartigen automatisierten 3D-Metallografie ergänzende Beiträge und Daten zur lokalen Analyse der kristallinen Phasen, Werkstoffchemie, Ausscheidungen im nm-Bereich und zur Analyse von Versetzungen sowie Nanoteilchen. Besonders interessante Anwendungsfelder finden sich in der Wasserstofftechnik, der Gasturbi-

nentechnik oder allgemein in Bereichen der Energietechnik mit chemischer und/oder thermischer Last.

Die Untersuchung der komplexen Struktur-Eigenschafts-Beziehungen von Gläsern sowie der vielschichtigen Relaxationsphänomene, die ihren Einsatz ermöglichen oder begrenzen, setzt eine komplexe Technik zur thermischen Charakterisierung voraus, die an der BAM entwickelt wird.

An der BAM werden die elektrischen, dielektrischen und thermoelektrischen Eigenschaften keramischer Werkstoffe und Schichtverbunde bestimmt und Frequenz- und Temperaturabhängigkeiten betrachtet. Die Einflüsse von Zusammensetzung, Prozessparametern bei der Werkstoffsynthese und der Mikrostruktur werden untersucht.

Die unikalen Möglichkeiten keramischer Schichtverbunde (Multilayer) für Innovationen in den Schlüsseltechnologien Sensorik, Kommunikations- und Energietechnik, werden exemplarisch durch die Entwicklung von neuartigen H_2-Sensoren, Hochfrequenz-Schaltungsträgern und thermoelektrischen Generatoren demonstriert. Neben Werkstoff- und Technologieentwicklungen besteht die Aufgabe einer ontologiebasierten Digitalisierung sämtlicher Prozess- und Materialdaten entlang der keramischen Prozesskette zur Ermittlung und Verbesserung der Ressourceneffizienz.

Polymermatrix-Composites (PMC) insbesondere mit Endlosfaserverstärkung mit synthetischen Fasern (Carbon, Glas, Aramid) werden heute vermehrt in sicherheitskritischen hoch beanspruchten Leichtbaustrukturen verwendet. Die Arbeit der BAM befasst sich mit der Bewertung der Betriebsfestigkeit unter thermomechanischer Beanspruchung, mit einem zunehmenden Fokus auf Rezyklat PMCs um die Entwicklung neuartiger Hochleistungskomposite aus ausgedienten PMC-Komponenten voran zu treiben. Hierzu werden neben experimentellen Untersuchungen analytische und numerische Werkstoffmodelle entwickelt, um im weiten Anwendungsbereich der PMC die Gebrauchstauglichkeit und Lebensdauer bestimmen zu können.

Bei Elastomeren wird an der BAM sowohl die Alterung als auch die Homogenität der Produkte insbesondere hinsichtlich der Dispersion von Partikeln untersucht. Der Einsatz von multifunktionalen Nanopartikeln wie Graphen in verschiedenen Elastomeren wird erforscht. Zur Entwicklung elastomerer Referenzmaterialien werden maßgeschneiderte Elastomermischungen entwickelt.

Die stetig steigenden Ansprüche an die Materialien zum Bau von Infrastruktur und die gleichzeitig immer drängender werdenden Probleme mit dem CO_2-Ausstoß der Zementproduktion erfordern neue leistungsfähigere und nachhaltigere Bindemittel. Während einige Ansätze hierzu bereits den Weg in die Praxis gefunden haben, haben verschiedene andere Bindemitteltechnologien, die aus technischer und ökologischer Sicht äußerst vielversprechend sind, die Baupraxis noch nicht erreicht. An der BAM werden solche Technologien bzw. Materialien mit besonderem Fokus auf die Applizierbarkeit und Dauerhaftigkeit der Materialien und die zugrunde liegenden Degradationsmechanismen untersucht, um Aussagen über ihre technisch sinnvolle Anwendung treffen zu können. Mit zeitraffenden Methoden wird das Alterungsverhalten untersucht sowie mit analytischen Methoden die Gehalte an Stabilisatoren ermittelt.

Degradation und Life Cycle von Werkstoffen und Materialien

Die Aufklärung von technischen Schäden, korrosionsbedingten Schadensfällen und den Ursachen von Schäden ist essenziell für die Schadensprävention und für eine erfolgreiche, nachhaltige Volkswirtschaft unabdingbar. Die BAM befasst sich daher mit der Analyse und Aufklärung von Schadensfällen, wozu sie ein übergreifendes Gremium für die interdisziplinäre Schadensanalyse geschaffen hat. Forschungsthemen sind seit jeher Schädigungsmechanismen insbesondere unter komplexer Beanspruchung und zukünftig Wissensmanagement zu Schadensursachen und zur Schadensprävention. Dazu wird der Zugriff auf und die (Nach) Nutzung von Forschungsdaten zu (Alt) Werkstoffen (statt Vergleichsversuchen) aufgebaut.

Die Bruchfläche als „Gedächtnis“ eines Rissfortschritts zeigt den Ort der Rissbildung und damit der Lasteinleitung an kritischer Stelle sowie dessen Fortschritt durch das Gefüge. Zur Bewertung der Sicherheit von Bauteilen und der verwendungsgemäßen Eignung des Bauteilwerkstoffs trägt die Fraktografie als wesentliche Grundlage bei. Durch die mögliche Digitalisierung des Werkstoffs sowie die digitale Beschreibung des Bruchs entfernt sich die Fraktografie heute jedoch von der rein erfahrungsgetriebenen Methode in eine

wissenschaftliche Methode, die dazu beiträgt, einen digitalen Zwilling in real simulierten Belastungen digital zu testen. Die BAM arbeitet an Datenbanken und Methoden des maschinellen Lernens in dieser Disziplin.

An der BAM werden experimentelle Untersuchungen und numerische Simulationen des Deformations-, Schädigungs- und Versagensverhaltens von Werkstoffen unter komplexen thermisch-mechanischen Beanspruchungen (z. B. isotherme und nichtisotherme Ermüdung inklusive Rissfortschritt, axialtorsionale Ermüdung) durchgeführt. Der Fokus liegt auf metallischen Hochtemperaturwerkstoffen wie z. B. warmfeste austenitische Gusseisenwerkstoffe, ausscheidungsgehärteten Aluminiumlegierungen und additiv gefertigten Werkstoffen. Insbesondere Langzeituntersuchungen und Belastungsprofile nahe Realanwendungen sind hier hervorzuheben.

Die Bewertung bzw. Optimierung der schweißbedingten Beanspruchungen gewinnt zunehmend an Bedeutung. Beim Schweißen von Bauteilen konzentrieren sich die Arbeiten auf die Quantifizierung von spezifischen Einflussgrößen und auf die Entwicklung von Strategien zur Heißriss- und Kaltrissvermeidung. Es erfolgen Untersuchungen zu konstruktiven und werkstofflichen Einflüssen auf das Kaltrissverhalten (Wasserstofftransportverhalten) von innovativen hochfesten Stählen unter Anwendung moderner Heiß- und Kaltrissprüfverfahren. Das Bauteilverhalten wird maßgeblich durch die (Schweiß-) Eigenspannungen beeinflusst. Der Forschungsschwerpunkt liegt in der Analyse von schweißbedingten Eigenspannungen unter realistischen Einspannbedingungen. Dazu kommen mobile sowie robotergestützte Systeme zum Einsatz.

In der schweißtechnischen Fertigung forscht die BAM auch zur sicheren Anwendung von Hochleistungslasern. Im Mittelpunkt der Arbeiten steht die Steigerung der Sicherheit, Effizienz und Nachhaltigkeit von Hochleistungslaserstrahlschweißverfahren im Dickblechbereich durch deren weitere Industrialisierung, Automatisierung und Digitalisierung sowie der Vorhersage durch numerische Simulation. Ein weiterer Schwerpunkt ist die numerische Auslegung elektromagnetischer Anwendungen zur Defektvermeidung.

Die datenzentrierte Forschung für die bauteilindividuelle schweißtechnische Fertigung rückt immer weiter in den Fokus, z. B. bei der Digitalisierung der Fertigungskette als Grundlage multivariater Datenanalyse (z. B. KI) oder beim Zugriff auf historische Produktionsdaten durch Forschungsdatenmanagementsysteme unter Berücksichtigung der FAIR (Findable, Accessible, Interoperable und Reusable) Prinzipien. Anwendungen für Automatisierungsstrategien werden entwickelt, z. B. bei der Fertigung von Komponenten für Offshore Windenergie sowie der additiven Fertigung mittels Lichtbogen. Ferner bei der Analyse und Optimierung der Ökobilanzierung für nachhaltige Produktionstechnologien (Reduktion CO_2-Fußabdruck).

Zur Weiterentwicklung von Leichtbaustrategien (anforderungsgerechtes Gestalten und werkstoffgerechte Bauteiloptimierung) und Ableitung von Bauteileigenschaften werden realitätsnahe Prüfverfahren angewendet und weiterentwickelt (Eigenkonzeption und Einsatz von mehrachsigen Großprüfanlagen mit mehreren MN Prüfkraft), die als Teil einer geschlossenen Prüfkette die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf reale gefügte Bauteile sicherstellen.

Mechanismen, die zu Schäden in Baustoffen führen, werden systematisch untersucht. Hierbei werden sowohl die Eigenschaften der Baustoffe

als auch die Umgebungsbedingungen berücksichtigt, die eine Schädigung triggern. Analytisch liegt der Fokus auf Mikro- und Nanoebene, während einige aktuell erforschte alternative und neuartige Ansätze, um Baustoffe vor Schädigung zu schützen, sich auf gezielte Modifizierung der Funktionalität von Oberflächen beziehen (z. B. Fassaden).

An der BAM wird die Erkennung und Quantifizierung von mikrostrukturellen Schädigungsmechanismen in technischen metallischen Hochleistungslegierungen, wie z. B. die Vorhersage von Alterungsschädigung und Scherlokalisierung in metallischen Gläsern oder die Phasenstabilität in Hochentropielegierungen, untersucht. Mit der zunehmenden Komplexität von modernen Werkstoffen rücken metastabile Zustände und deren Langlebigkeit immer mehr in den Fokus, damit auch hier die Beständigkeit in einer Anwendung gewährleistet werden kann. Daneben findet die quantitative computertomographische Analyse der Meso- und Mikrostrukturen von metallischen Legierungen und deren Verbundwerkstoffen sowie von Beton und Kompositen unter mechanischen oder thermischen Belastungen bzw. von Batterien unter Operando-Bedingungen Anwendung.

Die Anwendbarkeit glasiger Komponenten wird oft von komplexen Relaxationsphänomenen limitiert, die von der Zeit, der Temperatur aber auch von der Umgebung, wie z. B. der Feuchte, bestimmt werden. Das grundlegende Verständnis solcher Phänomene von der Relaxation von Spannungen, über die Diffusion volatiler Spezies wie z. B. Wasserstoff, dem Wachstum von Mikrorissen bis hin zu Kristallisationsprozessen oder dem viskosen Fließen bei hohen Anwendungs- oder Herstellungstemperaturen ist somit eine wichtige Voraussetzung für die sichere Anwendung glasiger Komponenten. Die BAM forscht am grundlegenden Verständnis derartiger Relaxationsphänomene.

Die Alterung von Kunststoffen auf molekularer Ebene verändert ihre Eigenschaften in nicht vorher bekannter Weise. Empirische Versuche durch künstliche Bewitterung stellen eine in allen Parametern kontrollierbare und wiederholbare Beanspruchung dar und werden zur systematischen Untersuchung der Beständigkeit von sicherheitsrelevanten Eigenschaftsprofilen eingesetzt. Die Degradation komplexer Funktionalitäten wie des Flammschutzes und die Freisetzung gesundheitsschädlicher Produkte beim Alterungsprozess werden untersucht. Durch die Entwicklung digitaler Alterungszwillinge werden experimentell nicht zugängliche Alterungsfragestellungen adressiert.

Aufgrund guter Beständigkeit gegenüber Chemikalien werden Polymerwerkstoffe vielfach für Behälter und Gefahrgutumschließungen eingesetzt. Neben anderen Schädigungsmechanismen wird insbesondere der Effekt der Spannungsrisskorrosion bei Kontakt mit flüssigen Medien untersucht. Ziel ist die Weiterentwicklung der Untersuchungsmethoden sowie die Verbesserung der meist auf PE-HD (High-Density-Polyethylen) basierenden Materialien einschließlich ihrer Nachhaltigkeit durch Einsatz von Recyclaten.

Polymermatrix-Composites (PMC) werden unter extremen mechanischen Lasten eingesetzt. Hierfür müssten die Komponenten des Werkstoffs - die polymere Matrix, die Verstärkungsfasern und deren chemische und mechanische Verbindung - optimiert sein. Die Faser-Matrix-Kopplung wird mit z.T. selbst entwickelten unikalen Prüfvorrichtungen auf der Mikroebene untersucht. Das Verständnis dieser Kopplung ist für die Optimierung der Qualität der PMC-Werkstoffe notwendig.

Wärmespeicher, Gasturbinen oder thermische industrielle Prozesse belasten die Materialien thermisch und chemisch und führen zu Hochtemperaturkorrosion, die die Alterung beschleunigt. In den Laboren der BAM werden die Korrosionsprozesse nahe den realen industriellen Bedingungen nachgestellt und die Einflüsse auf die Werkstoffe wirklichkeitsgetreu abgebildet. Medien im Fokus sind Stickstoff, Sauerstoff, Wasserdampf und Salzschmelzen.

Im Vergleich zur generellen Korrosion, die einen vorhersehbaren Verlauf hat, führen lokale Korrosionsprozesse zu hohen und unberechenbaren Sicherheitsrisiken. Da technische Komponenten im Betrieb gekoppelten Belastungen ausgesetzt sind, werden an der BAM Test- und Prüfverfahren entwickelt, die diese realistischen Szenarien simulieren. Für die Untersuchungen unter gleichzeitiger korrosiver und mechanischer Beanspruchung werden hochauflösende mikroskopische Methoden gekoppelt mit elektrochemischen Techniken eingesetzt, um die kritischen Grenzen der mechanischen Belastung (statisch, dynamisch, zyklisch) für die Initiierung der lokalen Korrosion zu bestimmen und die Änderungen in

der Topographie im Verlauf der Korrosionsprozesse zu verfolgen. Es werden Bedingungen identifiziert, die eine Repassivierung der Oberfläche und damit eine Inhibierung der Korrosion ermöglichen. Zudem werden Oberflächentechnologien (Beschichtungen, laserstrukturierte Oberflächen) hinsichtlich deren Beständigkeit getestet.

Dynamische Untersuchungen der Laser-Material-Wechselwirkung im Femtosekundenbereich sind für eine verbesserte Prozesskontrolle in der Laser-Material-Bearbeitung notwendig. Solche Ultrakurzpulslaser (UKPL)-Anlagen werden in vielen Industrien für Oberflächenmodifizierung diverser Materialien (Stahl, Glas, Keramik) verwendet und in den letzten Jahren auch im medizinischen Bereich verstärkt eingesetzt. An der BAM werden die materialabhängigen Prozessparameter bestimmt, die während UKPL-Oberflächenbearbeitung zu unerwünschten Röntgenemissionen führen und das Gefährdungspotential beurteilt. Des Weiteren liefern Untersuchungen transienter Materialparameter grundlegende Informationen über thermisches Verhalten unterschiedlicher Materialien. Durch die systematische Variation der Laser-Prozessparameter lassen sich Momentaufnahmen von Diffusions- und Rekristallisationsprozessen erzeugen. In Kombination mit hochauflösender mechanischer Prüfung und Mikrostrukturanalyse kann so die thermische Belastung mit den resultierenden Materialeigenschaften und mechanischen Kenngrößen korreliert werden. Insbesondere für neuartige Werkstoffe wie Multi-Hauptelement-Legierungen oder additiv gefertigte Materialien ermöglicht diese Methodik ein beschleunigtes Parameterscanning.

Reibbeanspruchte Bauteile für extrem tiefe oder hohe Temperaturen sowie hohe Belastungen erfordern spezielle Werkstofflösungen und angepasste Schmierkonzepte. Zur tribologischen Charakterisierung solcher Materialien betreibt die BAM Versuchseinrichtungen für Temperaturen bis -269°C bzw. 1000°C und Lasten bis 150 kN. Reibungsmindernde Werkstoffpaarungen, Beschichtungen und Schmierstoffe werden in Modellsystemen untersucht und Kenngrößen für Reibung und Verschleiß bestimmt sowie in Datenbanken archiviert. Aufgrund der gemessenen Werte werden Modellvorstellungen entwickelt und die wirkenden Mechanismen aufgeklärt.

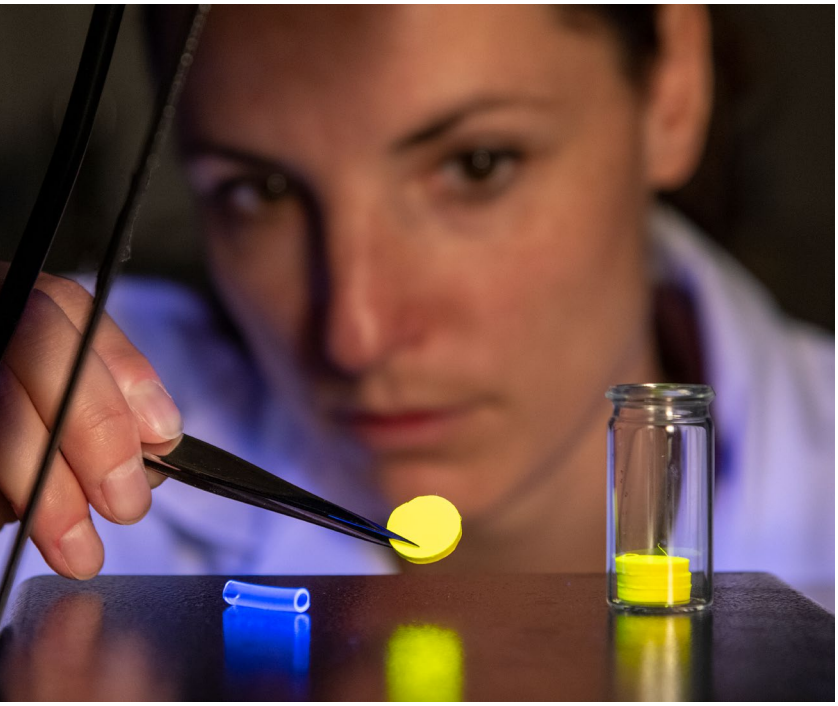
3.5 Themenfeld Analytical Sciences

Die BAM verfügt seit Jahrzehnten über eine ausgewiesene Kompetenz in dem Querschnittsthema Analytical Sciences und bündelt ihre Arbeiten auf dem Gebiet in den Aktivitätsfeldern Qualitätssicherung und Data Science, Sensorik, zerstörungsfreie Prüfung und Spektroskopie, Spurenanalytik und chemische Zusammensetzung, Oberflächen- und Grenzflächenanalytik und Strukturanalytik und Materialographie.

Qualitätssicherung und Data Science

Die Arbeiten auf dem Gebiet der Qualitätssicherung und Data Science sind vielfältig und stellen klassische Querschnittsaufgaben in der BAM dar. Die Qualitätsinfrastruktur beinhaltet klassisch analoge Arbeiten und Entwicklungen von Standards sowie einen zunehmenden Anteil an digitalen Prozessen. Ein Schwerpunkt der Arbeiten in dem Aktivitätsfeld liegt auf der Entwicklung von Referenzprodukten, d.h. zuverlässigen Standards, wozu sowohl Referenzmaterialien als auch Referenzverfahren und Referenzdaten zählen.

So werden beispielsweise optische Detektionsmethoden wie statische, zeitaufgelöste und ortsaufgelöste Fluoreszenzmethoden für Lebens- und Materialwissenschaften als Standards etabliert. Dies umfasst molekulare und nanoskalige Systeme in verschiedenen Matrizen, Partikel und Gläser. Applikationen beinhalten Referenzprodukte zur Kalibrierung und Funktionsprüfung von spektroskopischen Messsystemen, Kalibrier- und Rückführungskonzepte für Messmethoden und Referenzmaterialien zur Ermittlung von relevanten Kenngrößen.



Die Entwicklung von forensischem Referenzmaterial zur Atemalkoholkontrolle oder die Herstellung von Antikörpern als Referenzmaterialien sind weitere Beispiele. Außerdem werden Referenzdatensätze erarbeitet, die der Standardisierung der Auswertung massenspektrometrischer Daten dienen. Die Synthese von Nanopartikeln z. B. aus Metallen oder Polymeren erfolgt mit dem Ziel, diese als zertifizierte und nicht zertifizierte Referenzmaterialien weiterzuentwickeln.

Neben der Erforschung von Stabilisotopen-Standards wird aktuell an Referenzmaterialien für den Bereich Einzelzell- und -partikelanalytik gearbeitet. Weiterhin steht die Entwicklung im Bereich emerging contaminants, wie per- und polyfluorierte Alkylverbindungen (PFAS), für organische Schadstoffe in Umweltmatrices und Materialien/Produkten sowie für Kontaminanten in Lebensmitteln und von anorganischen Referenzmaterialien auf den Gebieten Eisen/Stahl, Nichteisenmetalle, Glas, Keramik, Recyclingmaterialien, Boden, Holz und Reinstoffe im Fokus der Arbeiten. Darüber hinaus wird das BAM-eigene Software-Tool eCERTO zur statistischen Datenauswertung von Referenzmaterial-Projekten weiterentwickelt.

Die Qualitätsinfrastruktur (QI) ist das Fundament für sichere und verlässliche Anwendungen und Produkte, die Anforderungen z. B. aus Normen, Regulierung und von Anwendern erfüllen. Die BAM untersucht die bisher kaum erforschten Wirkzusammenhänge, Funktionsweisen und Trends der QI und ihrer Elemente aus wirtschaftswissenschaftlicher Sicht. Damit trägt die BAM zu einem besseren grundlegenden Verständnis der QI bei und unterstützt eine evidenzbasierte Beratung von Stakeholdern aus Politik, Wirtschaft und Gesellschaft. Im Rahmen der Initiative

QI-FoKuS werden aktuelle Themen der QI, insbesondere der Konformitätsbewertung und Akkreditierung (z. B. die Lage in der Corona-Pandemie; Stand und Trends der Digitalisierung) mithilfe von Umfragen unter relevanten Stakeholdern adressiert und die so erhobenen Daten wissenschaftlich ausgewertet.

Im Kontext der Initiative QI-Digital gestaltet die BAM das Stakeholdermanagement und die Transfermaßnahmen für eine erfolgreiche digitale Transformation der QI, indem Ergebnisse, Wissen und Technologien der F&E-Arbeiten der BAM gemeinsam mit den Akteur*innen aus der Forschung, Industrie und QI in die Anwendung gebracht werden.

Die BAM beschäftigt sich darüber hinaus intensiv mit allgemeinen Fragestellungen des Themas Data Science. So beteiligt sich die BAM an zahlreichen nationalen Digitalisierungsinitiativen (u.a. NFDI), von denen die Plattformen MaterialDigital und NFDI-MatWerk eine zentrale Bedeutung haben (s. auch 3.4). Die wichtigste inhaltliche Arbeit ist hierbei die Schaffung von Workflow-Umgebungen, die es erlauben, komplexe Simulationsprotokolle und experimentelle Prozesse reproduzierbar zu beschreiben. Methoden des maschinellen Lernens und der angewandten Statistik nehmen im Bereich der Wissenschaften einen zunehmend größeren Stellenwert ein. Dazu werden beispielhafte Prototypen im Bereich digitaler Methoden und Software für wissenschaftliche Fragestellungen entwickelt.

Um aus Daten Informationen erhalten zu können, welche letztlich Wissen erzeugen, müssen diese mit dazugehörigen Metadaten verknüpft und in definierte Beziehung zu Erfahrungen gesetzt werden. In Anwendungen der künstlichen Intelligenz wird dieser Prozess von Computern nachvollzogen, um von automatisierten Abläufen zu autonomen Systemen zu gelangen. Die maschinenlesbare semantische Beschreibung der Metadaten und Kontextualisierung erfolgt dabei über formale Ontologien. Die BAM arbeitet derzeit an verschiedenen formalen digitalen Repräsentationen, wie z. B. an dem Verfahren der laserinduzierten Plasmaspektroskopie.

Sensorik

Zur Messung und Kontrolle der Eigenschaften und Veränderungen technischer und biologischer Systeme spielen Sensoren in vielen Bereichen der Industrie sowie auch im täglichen Leben eine sehr wichtige Rolle. Vor dem Hintergrund der digitalen Transformation der Prozessindustrie steht beispielsweise die Verfahrenstechnik durch die Automatisierung in der Chemie- und Pharmaindustrie vor einem großen Umbruch. Autonome und smarte Sensorsysteme werden für die Bereiche Zustandsüberwachung sicherheitskritischer Anlagen, Bauwerke und Szenarien, Umwelt- und Emissionsmonitoring sowie Prozessüberwachung und -steuerung eingesetzt.

Die BAM arbeitet an der Erforschung und Entwicklung von optisch auslesbaren Sensorsystemen, die modular aus einer molekularen oder partikulären Signalerzeugungseinheit (Reporter) und einer analytspezifischen Erkennungsstruktur aufgebaut sind und entweder direkt, eingebaut in einem Sensorfilm oder in Kombination mit optischen Fasern, eingesetzt werden können. Material- und bioanalytisch relevante Zielanalyte sind u.a. Temperatur, Protonen- und Sauerstoffkonzentration. Diese Systeme sind im Allgemeinen selbst-referenziert. Dies umfasst auch die Entwicklung von Auslesekonzepten und ggf. Prototypen.

Viele Fragestellungen in der Vor-Ort-Analytik bedürfen der Integration von mehreren Arbeitsschritten, die auf bzw. mit einfachen Schnelltests oder Sensoren nicht mehr realisiert werden können, z. B. wenn die Probenmatrix komplex oder wenn mehrere unterschiedliche Analyten simultan nachgewiesen werden müssen. Für solche Fragestellungen werden Lab-on-a-Chip-Verfahren entwickelt, d.h. Mobilgeräte, deren Herzstück ein mikrofluidischer Chip oder eine 3D-Mikrofluidik ist, die entsprechend komplexe (bio)chemische Abläufe in einem miniaturisierten Format realisieren kann.

Die BAM beschäftigt sich im Hinblick auf die Schadensfrüherkennung und -lokalisierung bzw. für die Strukturüberwachung (Structural Health Monitoring, SHM) mit der Entwicklung und Anwendung von punktuell-messenden faseroptischen Sensoren für Temperatur, Dehnung, Druck, Feuchte, Vibrationen und radioaktive Strahlung zur Überwachung von Bauwerken, technischen Anlagen und Strukturen jeder Art. Dazu zählen insbesondere Faser-Bragg-Gitter (FBG) auf Basis von Glas- und Polymerfasern. Neben den punktuellen Sensoren entwickelt die BAM auch verteilte faseroptische Sensorik und Fasersensorsysteme für die kontinuierlich verteilte, lückenlose Überwachung geotechnischer Anlagen, räumlich aus-

gedehnter Bauwerke und energietechnischer Anlagen. Die Sensoren detektieren die Kenngrößen auf km-Längen mit Ortsauflösungen im m-Bereich.

Sprengstoffe gehören zu sehr unterschiedlichen Substanzklassen und haben stark differierende physikochemische Eigenschaften. Daher ist deren Detektion sehr schwierig und wird heute immer noch routinemäßig durch Spürhunde durchgeführt. Die BAM arbeitet daher an der Entwicklung von „künstlichen Nasen" für diesen Zweck. Aufgrund der strukturellen Vielfalt muss aber für jeden Sprengstoff-Typ ein eigenes Bindemolekül (hier Antikörper oder Peptid) entwickelt werden. Die BAM arbeitet an der Entwicklung und Charakterisierung solcher Binder, die für hochselektive und hochsensitive Biosensoren genutzt werden können. Prototypen der betreffenden Biosensoren konnten schon vorgestellt werden.

Zerstörungsfreie Prüfung und Spektroskopie

Die BAM entwickelt, evaluiert und optimiert neuartige Mess- und Auswerteverfahren sowie Prüfkonzepte und Regelwerke für die zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen. Hierbei werden nicht nur bereits eingeführte Messverfahren wie Ultraschall, Radar und laserinduzierte Plasmaspektroskopie (LIBS) verbessert, sondern auch völlig neue Methoden wie die Myonentomographie oder Terahertz-Echo exploriert.

Für neuartige Bauweisen und Materialien wie Beton-3D-Druck oder Carbonbeton arbeitet die BAM an den benötigten neuen oder adaptierten Messverfahren für Prüfung und Überwachung. Dazu gehören auch Messverfahren zur verbesserten Sortierung beim Betonrecycling. Dies dient als Beitrag zur dringend erforderlichen Ressourcenschonung und der Reduzierung des CO_2-Fußabdrucks im Bauwesen.

Die Umsetzung der Visionen von Industrie 4.0 und einer Kreislaufwirtschaft erfordern eine belastbare verteilte Analytik in engmaschigen und gleichzeitig großen Netzwerken mit zahlreichen Sensoren. Dies erfordert analytische Methoden, die klein, kostengünstig, vernetzbar, modular und ressourcensparend sind. Um solche Methoden (weiter) zu entwickeln, werden grundlegende physikochemische Konzepte herangezogen, um analytische Systeme durch eine Optimierung ihrer Einzelschritte auf diese Ziele auszurichten. Beispiele hierfür sind die Entwicklung neuer Ionisations- sowie Transfermethoden für die Massenspektrometrie sowie neue Anregungs- und Detektionsschemata in der optischen Spektroskopie.

Die Anwendung und Weiterentwicklung optischer Messverfahren zur Bestimmung mechanischer, geometrischer und kinematischer Kenngrößen im Rahmen der 3D-Beanspruchungsanalyse von Materialien und Komponenten wird ebenfalls an der BAM betrachtet. Dabei werden bildgestützte Verfahren der Fotogrammmetrie, Streifenprojektion und 3D-Korrelation zur Digitalisierung von Objekten und deren Verformungsprozessen genutzt.

Die Thermografie kann neben der Detektion von Fehlstellen prinzipiell auch Aussagen zu Materialqualitäten oder Zusammensetzungen von Materialgemischen liefern, in vielen Fällen ohne vorherige Oberflächenbehandlung und völlig berührungslos. Je nach Anwendungsfall wird das Potential und die Umsetzbarkeit für mobile Lösungen betrachtet. Bei der anstehenden Transformation der Wirtschaft auf geschlossene Materialkreisläufe kann das Messverfahren eine herausragende Rolle bei der Qualitätssicherung von wiederverwendeten Materialien erlangen.

Die BAM entwickelt und optimiert den Einsatz von Verfahren und Technologien für die 3D-Hochenergie-Durchstrahlungsprüfung mit dem Ziel der hochauflösenden, quantitativen Prüfung und Charakterisierung von dickwandigen Proben, Komponenten und Konstruktionen. Darüber hinaus wird die stationäre und mobile Laminographie und Computertomographie zur quantitativen 3D-Durchstrahlungsprüfung von komplexen Komponenten und Konstruktionen weiterentwickelt und mittels Mikro-Computertomographie die Mikrostruktur von neuen Materialien untersucht. Die radiologische Rückstreutechnik wird zur einseitigen zerstörungsfreien Prüfung von Leichtbauteilen und additiv gefertigten Bauteilen weiterentwickelt. Deformationsmodelle und Programme zur Simulation von Röntgentomographie sowie KI zur quantitativen Datenanalyse und schnellen und effizienten 3D-Rekonstruktion werden entwickelt.

Die physikalischen Zusammenhänge der Ultraschallausbreitung werden simuliert und reale Prüfszenarien für akustische und elektromagnetische Verfahren mit numerischen Verfahren modelliert. Zudem werden

eigene problemangepasste numerische Simulationsverfahren entwickelt, um spezielle Fragestellungen, zum Beispiel der räumlichen Auflösung gegenüber der Ausbreitungsdimension bei geführten Wellen und deren Auswirkung auf die numerische Rechenleistung, gezielt und effizient beantworten zu können.

Spurenanalytik und chemische Zusammensetzung

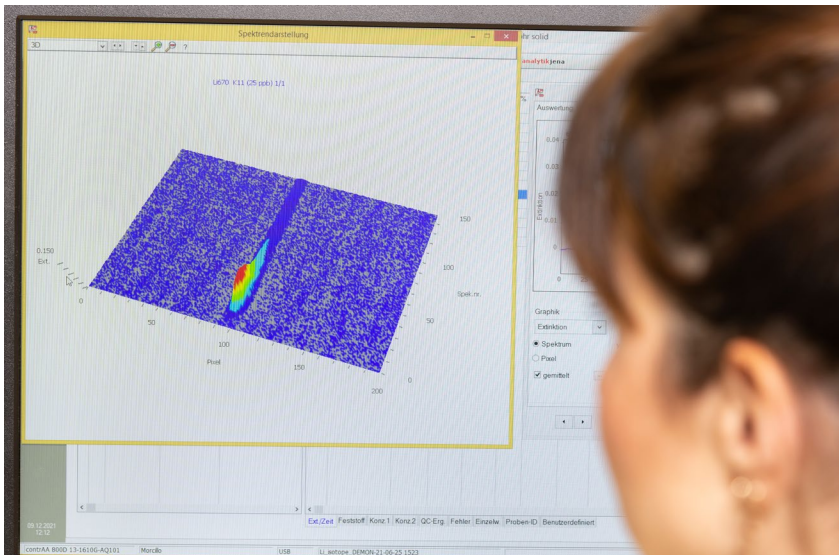
Viele aktuelle Fragestellungen betreffen die chemische Zusammensetzung bzw. Verunreinigung von Materialien, Produkten und deren Rohstoffen. Anwendungsfälle reichen von der Umweltanalytik über die Suche nach geeigneten Quellen für Ausgangsmaterialien für die chemische Industrie als Alternative zu fossilen Rohstoffen bis hin zur begleitenden Analytik in der Entwicklung neuer Materialien. Für die verlässliche Beantwortung dieser Fragen erforscht, entwickelt und erprobt die BAM Analyseverfahren und bindet sie nahtlos in ihre übrigen Tätigkeiten ein.

Ein bedeutender Anteil dieser Forschung fließt in die Erarbeitung, Etablierung und Validierung anorganischer Elementanalytik mittels massenspektrometrischer (MS) Analyseprotokolle. Auf dem Gebiet der plasmagekoppelten elementaren Massenspektrometrie (ICP-MS) werden bildgebende Verfahren zur ortsaufgelösten MS verwendet. Hierzu wird eine fokussierte Laserablation in Kombination mit induktiv gekoppelter Plasma-Massenspektrometrie eingesetzt, um z. B. in Materialien die Multi-Elementverteilung qualitativ und quantitativ darzustellen. Aktuelle Schwerpunkte liegen in der ortsaufgelösten (quasi-) simultanen Untersuchung von Umwelt- und Stoffströmen (z. B. Circular Economy). Weiterhin werden neue Ansätze zur Quantifizierung von Nichtmetallen wie Fluor erprobt. Methoden für die Multielementanalyse einzelner Zellen und Nanopartikel werden entwickelt, um z. B. Multielement-Nanopartikel oder Einzelzellen/Organismen in ihrer stöchiometrischen Zusammensetzung zu analysieren. Hierfür werden parallel potenzielle Referenzmaterialien für die Einzelzell-ICP-MS entwickelt.

Forschungsarbeit auf dem Gebiet der organischen MS fließt derzeit verstärkt in die Erarbeitung von Protokollen zur Detektion und Quantifizierung unbekannter Analyten (non-target screening) und Transformations- und Abbauprodukten, die erst während oder nach der Nutzung durch Alterung aus Produkten freigesetzt werden. Den Schwerpunkt bilden hier Simulationsmethoden. Dabei kommt hochauflösende MS in Kopplung mit Chromatographie-Techniken zum Einsatz. Dabei greifen die Chromatographien teilweise auf eigene monolithische Materialentwicklungen zurück. Die Methoden werden zur sicheren Quantifizierung von Analyten eingesetzt, auch bei der Charakterisierung organischer und biochemischer Referenzmaterialien wie beispielsweise Proteinen und Antikörpern.

Ein wesentlicher Bestandteil belastbarer Analytik ist die reproduzierbare Probennahme. Hierfür werden sowohl automatisierte Verfahren für Probenahme und -manipulation als auch neue Spektrometer entwickelt, die klein und mobil sind und unmittelbar am Abfrageort eingesetzt werden können (point-of-care). Optisch spektroskopische Verfahren, die oft robuster, kompakter und kostengünstiger sind, werden außerdem gezielt für aktuelle und zukünftige Anwendungsfälle wie Recyclingstrategien oder die Isotopenanalyse von Batteriematerialien ertüchtigt.

Peptide sind eine sehr moderne Substanzklasse, da sie die Selektivitätsvorteile von Proteinen mit der synthetischen Herstellbarkeit und Stabilität von kleinen Molekülen verbinden. Mit Peptidbibliotheken können mit geringem Aufwand Bindemoleküle gegen fast beliebige Zielmoleküle gefunden werden. Das können pharmazeutische Produkte, chromatographische Phasen oder Binder von Sprengstoffen, Toxinen oder Viren sein. Die Einbindung in Biosensoren erscheint besonders vielversprechend. Für die Prote-



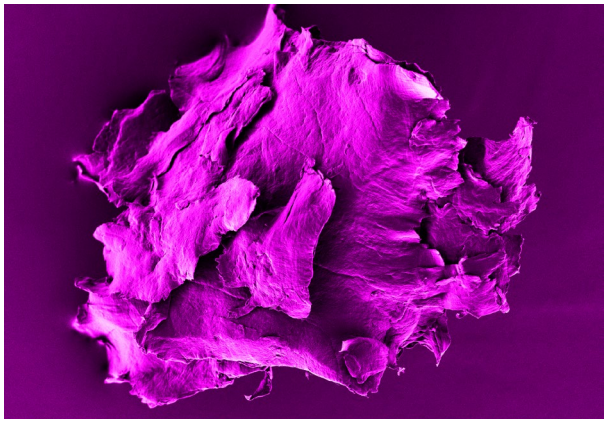
inanalytik werden zudem spezielle Referenzverfahren und -materialien entwickelt, die ohne Derivatisierung hergestellt werden und somit ein metrologisch besonders belastbares Qualitätsbudget aufweisen.

Abschließend erfährt auch Kulturgut Korrosions- und Alterungsmechanismen. Minimal-invasive Untersuchungen tragen zur Aufklärung dieser Mechanismen bei und ermöglichen so den dauerhaften Erhalt unseres kulturellen Erbes.

Oberflächen- und Grenzflächenanalytik

Die Grenzflächen von Materialien haben einen bestimmenden Einfluss auf das Verhalten und die speziellen Eigenschaften der Stoffe. Daher ist die Analytik der Grenz- und Oberflächen eine wichtige Forschungsaufgabe der BAM. So sind beispielsweise Alterungs- und Degradationsprozesse von (Funktions)werkstoffen wichtige Systemreaktionen, deren Verständnis die Vorhersage der sicheren Lebensdauer ermöglicht.
An der BAM werden Methoden zur hochauflösenden Grenzflächenanalytik und kombinierte spektroskopische und mikroskopische Verfahren mit elektrochemischen Methoden entwickelt, um eine vollständige Beschreibung der Alterungsprozesse zu erhalten.

Diese Methoden werden beispielsweise für die Untersuchung der Degradationsprozesse von neuartigen Elektrokatalysatoren und für die Aufklärung der Korrosionsprozesse von Strukturwerkstoffen wie Leichtbaumaterialien und bei der additiven Fertigung und neuartigen Legierungen wie Multi-Hauptelement-Legierungen eingesetzt. Aktuelle Forschungsarbeiten zielen auf die Entwicklung von autonomen Plattformen, die die automatisierte Durchführung der Probenvorbereitung und -charakterisierung inkl. Datenauswertung ermöglichen.



Für die alternativen Energieträger Wasserstoff und Erdgas, insbesondere in tiefkalt verflüssigter Form, erforscht die BAM angepasste Schmier- und Werkstoffe für Tribosysteme, die in speziellen, selbstentwickelten Versuchsapparaturen auf ihre Eignung geprüft und tribologisch charakterisiert werden.

Chemische Degradation und mechanisch-tribologische Beanspruchung an Oberflächen sind auch die grundlegende Ursache für die Entstehung von Mikro- und Nanoplastik. Quantitative Analytik von Mikroplastik wird mittels Massenspektroskopie von für Polymere typischen Zerfallsmolekülen durchgeführt und ist hinsichtlich Empfindlichkeit und Präzision für das Monitoring von Mikroplastik z. B. in Trinkwasser, Gasproben und Bodenproben gut geeignet. Die Oberflächen machen Mikroplastik zu einem dynamischen Material, welches sich mit der Zeit stetig verändert. Als Referenzmaterialien für verschiedene, z. B. spektroskopische und spektrometrische Analyseverfahren werden daher ungealterte und gealterte Materialpulver mit den charakteristischen Merkmalen Zusammensetzung und Größenverteilung hergestellt und weiterentwickelt.

Über das klassische Verständnis von Oberflächen hinaus besitzen Kompositwerkstoffe auch innere Grenzflächen, welche als Oberflächen verstanden werden können. Diese inneren Oberflächen beispielsweise zwischen Polymer und Verstärker-Faser oder -Partikel für die innovative Materialklasse der polymerbasierten Nanocomposite dominiert die Eigenschaften, da durch die geringe Größe der Nanopartikel der Volumen- bzw. Massenanteil der Grenzphasen sehr groß ist. Diese erst im Kontakt der beiden Komponenten entstehende Phase kann als eigenständiges Material angesehen werden und für maßgeschneiderte Netzwerke genutzt werden. Da Netzwerke aber nicht rezykliert werden können, weil sie nicht zerstörungsfrei schmelzbar sind, werden chemisch steuerbare Eingriffsmöglichkeiten für eine Auflösung des Netzwerkes und das Recycling dieser Werkstoffe untersucht.

Strukturanalytik und Materialographie

Die BAM arbeitet an der Weiterentwicklung der qualitativen und quantitativen Materialographie, die eine

vergleichbare numerisch korrekte Beschreibung des Aufbaus der Werkstoffe auf der µm-Skala ermöglicht. Mit der Methode wird der Anfangszustand eines Werkstoffs nach Herstellung des Bauteils, die Änderung eines Werkstoffs während seiner Anwendungszeit beschrieben. Die Materialographie an der BAM beschreibt hauptsächlich Baumaterialien und Metalle.

In der Metallographie erfolgt die Phasenanalyse mittels Röntgendiffraktometrie, die eine statistisch abgesicherte Übersicht über die kristallinen Phasen ermöglicht. Die Veränderung dieser Gefügestruktur wird dann beispielsweise in Abhängigkeit vom umgebenden Medium (H_2, Rauchgas, weitere gasförmige oder flüssige Medien, Festkörperwechselwirkungen) verfolgbar. Damit leistet die Methode einen Beitrag zur Digitalisierung, zum Erkennen möglicher Schadensentwicklungen und kritischem Versagen, zur Optimierung und damit der Nachhaltigkeit metallischer Werkstoffe.

Der Formgebungsprozess von zementbasierten Baustoffen erfolgt in vielen Fällen an fließfähigen, dispersen Systemen. Bis zu 95% der Bauschäden entstehen durch Fehler beim Einbau infolge mangelhafter Verarbeitbarkeit oder nicht auf den Prozess abgestimmte Materialeigenschaften. Insofern ist das Verständnis der Einflussparameter, die Modellierung sowie die gezielte Steuerung der flüssigen und festen Phasen der Schlüssel für die sichere, nachhaltige und dauerhafte Nutzung bekannter und neuer Baustoffsysteme und Verarbeitungstechniken. Die BAM arbeitet am Verständnis der Systeme auf der nanoskopischen sowie auf der makroskopischen Ebene.

4. FORSCHUNGSINFRASTRUKTUR

Eine leistungsfähige Forschung braucht geeignete Rahmenbedingungen. Nur mit den notwendigen personellen und materiellen Ressourcen lässt sich die gewünschte hohe Qualität der Forschung realisieren. Eine weitere Voraussetzung ist die Unabhängigkeit in der Forschung. Damit auch zukünftig qualifizierte Mitarbeiter*innen für eine kompetente Aufgabenerfüllung zur Verfügung stehen, ist die Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses der BAM ein besonderes Anliegen.

4.1 Qualität der Forschung

Die Kontinuität und Tragweite der Aufgaben der BAM stellen besonders hohe Anforderungen an die Qualität der in der BAM durchgeführten Forschungsarbeiten. Die BAM wendet hierfür sowohl interne als auch externe Verfahren und Instrumente der Qualitätssicherung an. Die interne Qualitätsinfrastruktur orientiert sich hierbei an den Europäischen Normenreihen EN ISO 9000 ff. sowie EN ISO/IEC 17000 ff. für Qualitätsmanagement und Akkreditierungsstellen und Prüflaboratorien. Initiiert durch die zunehmende Digitalisierung von Daten laufen derzeit zwei zentrale Projekte an der BAM, die eine modernisierte Qualitätsinfrastruktur sowie ein zentrales Forschungsdatenmanagementsystem zum Ziel haben. Die BAM arbeitet nach den Grundlagen der guten wissenschaftlichen Praxis der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) und verfügt über ein Qualitätsmanagement.

In allen Forschungsbereichen stellt sich die BAM der Qualitätskontrolle durch die „scientific community", insbesondere im Rahmen der Einwerbung von Drittmitteln, von Publikationen in referierten Zeitschriften, Vorträgen auf nationalen und internationalen Fachtagungen sowie Patenten und Lizenzen. Auch durch ihre Mitwirkung in zahlreichen Fachgremien stellt die BAM ihre Kompetenz unter Beweis. Darüber hinaus unterzieht sie sich in regelmäßigen Abständen externen Evaluationen, wie beispielsweise zuletzt im Jahr 2016 durch den Wissenschaftsrat. Die Tätigkeiten der BAM werden begleitet durch wissenschaftliche Beiräte sowie ein Kuratorium. Die Diskussion der Themen der BAM im Rahmen der Beiratssitzungen mit einem Kreis externer Stakeholder und Spezialist*innen liefert für die BAM wichtige Beiträge für die strategische Themenwahl in den Themenfeldern.

4.2 Zentrale Forschungsförderungsprogramme

Die BAM beteiligt sich aktiv an externen Fördermaßnahmen. Um die Beteiligung an der strategischen Ausrichtung zu befördern und kurz- und mittelfristig anschlussfähig an große europäische Fördermaßnahmen zu sein, unterhält die BAM zusätzlich interne, zentrale Fördermaßnahmen. Ziel dieser Förderung ist es, vielversprechenden Projekten eine Anschubfinanzierung zu gewähren. Hierzu gibt es das Innovationsprogramm „Menschen - Ideen". Die Förderlinie „Ideen" dient der Förderung von Forschungsprojekten in unterschiedlichen Reifegraden der technologischen Entwicklung und mit unterschiedlicher Zielsetzung, von der Förderung innovativer Ideen, Erschließung neuer Forschungsgebiete, Entwick-

lung strategisch relevanter Schwerpunktthemen bis hin zur Planung und Umsetzung fallbezogener Transferstrategien im Rahmen von Projekten.

Die Förderlinie „Menschen“ enthält Instrumente, bei denen der Mensch im Mittelpunkt steht, unter anderem sowohl die Unterstützung internationaler Post-Docs und Gastwissenschaftler*innen sowie von Nachwuchsgruppen als auch das Qualifizierungsprogramm von Nachwuchswissenschaftler*innen der BAM.

4.3 Doktorandenprogramm der BAM

Im Rahmen des 1996 begonnenen Doktorandenprogramms wird Wissenschaftler*innen die Möglichkeit zur Promotion gegeben. Aktuell sind etwa 150 Doktorand*innen an der BAM aktiv. Dafür werden zentrale Haushaltsmittel über die Förderlinie „Ideen“ bereitgestellt bzw. dezentrale Finanzierungen aus Mitteln der Abteilungen und externen Fördermitteln eingesetzt.

Damit die Doktorand*innen nach ihrer Einstellung erfolgreich und zügig exzellente Abschlüsse erreichen können, ist eine angemessene Betreuung notwendig. Die BAM hat dazu in strukturierter Weise Anforderungen an die Betreuung von Doktorand*innen an der BAM konkretisiert. Die Promotionsverfahren erfolgen durch Zusammenarbeit mit einer Vielzahl von Universitäten.

Durch die Zusammenführung des Promotionsprogramms in der Graduate Academy der BAM mit dem begleitenden Qualifizierungsangeboten des „Menschen-Potenziale“-Programms zu komplementären Skills, leistet die BAM einen wichtigen Ausbildungsbeitrag für den wissen-schaftlichen Nachwuchs in fachlichen Themen, die mit Sicherheit in Technik und Chemie verknüpft sind.

Das BTU-BAM Graduiertenkolleg „Trustworthy Hydrogen“, das von der BAM und der BTU Cottbus-Senftenberg eingerichtet wurde, ist erfolgreich mit der Ausschreibung von sieben Promotionsstellen gestartet worden. Ein strukturiertes Qualifizierungsprogramm als Kernelement des Graduiertenkollegs befindet sich aktuell in der Ausarbeitung.

4.4 Vernetzung & Internationalisierung

Für Forschung auf hohem Qualitätsniveau ist eine gute nationale und internationale Vernetzung mit Universitäten und außeruniversitären Forschungseinrichtungen essenziell. Die BAM hat daher als eine der ersten Ressortforschungseinrichtungen bereits im Jahr 1993 eine gemeinsame Berufung mit einer Universität im Rahmen der Leitung der Abteilung für Analytische Chemie und Referenzmaterialien durchgeführt. Gemeinsame Berufungen für Leitungsfunktionen an der BAM werden weiterverfolgt. Eine verstärkte Anzahl von Lehrtätigkeiten unterstützt diese Entwicklung.

Mit dem Gastwissenschaftler*innen-Programm und dem Adolf-Martens Programm für Post Docs stellt die BAM interne Mittel für den Aufenthalt internationaler Wissenschaftler*innen an der BAM bereit. Mit dem Programm „Menschen – Netzwerke“ fördert die BAM Forschungsaufenthalte von Wissenschaftler*innen der BAM an internationalen Partnereinrichtungen, für

den Aufbau neuer Kontakte bzw. die Gewinnung neuer Kompetenzen und Kenntnissen. In vielen Bereichen der BAM werden Student*innen verschiedener Universitäten und Fachhochschulen im Rahmen von Studien-, Bachelor-, Master- und Diplomarbeiten sowie Praxissemestern ausgebildet. Auch mit der Lehrtätigkeit ihrer Wissenschaftler*innen an Universitäten und Fachhochschulen trägt die BAM zur Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses bei, vor allem in den für die Aufgaben der BAM bedeutsamen Fachgebieten.

Die BAM hat ihre Kooperation mit der University of Birmingham weiter ausgebaut. Im außeruniversitären Bereich arbeitet die BAM national und international mit zahlreichen Forschungsinstituten zusammen, z. B. mit Instituten in Namibia zu dem Thema Capacity Building im Bereich Wasserstofftechnologien oder mit südkoreanischen Partnerinstitutionen zu Sicherheitsfragen bei Wasserstoffanwendungen. Viele dieser Kooperationen basieren auf Verträgen oder einem entsprechenden Memorandum of Understanding. Die BAM ist Mitglied im World Materials Research Forum (WMRIF) sowie deutsche Vertreterin in VAMAS (http://www.vamas.org/) und leitet u.a. die Technical Working Area zu Quantitative Microstructural Analysis. Die Internationalisierungsstrategie der BAM fokussiert darüber hinaus auf die Beteiligung an Projekten im Rahmen der europäischen Forschungsrahmenprogramme (aktuell Horizon Europe) und weiterer Vernetzungsprogramme (COST).

4.5 Ressourcen

Die BAM verfügt über ein fest budgetiertes und weitgehend flexibilisiertes Haushaltsvolumen von ca. 164 Mio. €. Zusätzlich zu den Haushaltsmitteln werden von der BAM Fördermittel von verschiedenen Drittmittelgebern (u.a. DFG, BMBF, EU) eingeworben und umgesetzt.

Die statistischen Angaben können der nachfolgenden Tabelle entnommen werden. Die BAM vergibt keine Mittel für extramurale Forschung nach außen.

Tabelle: Kennzahlen der BAM für die letzten Jahre

	2017	2018	2019	2020	2021
Drittmittel und Einnahmen (in T€)					
Umgesetzte Fördermittel (Drittmittel)	12.300	13.211	13.864	17.324	17.176
Einnahmen aus wissenschaftlich-technischen Dienstleistungen	9.984	9.563	11.249	10.729	10.434
Einnahmen Referenzmaterialverkauf	1.614	1.728	1.583	1.560	1.822
Lizenzeinnahmen	416	405	355	372	435
Output					
Veröffentlichungen (Web of Science)[3]	532	505	504	558	557
Vorträge	1068	1034	1032	381	655
Poster	378	439	335	77	129
Sonstige Veröffentlichungen	515	489	458	249	238
Patente inkl. Nationalisierungen	43	60	91	140	82
Neue zertifizierte Referenzmaterialien [davon Ethanol/Wasser-Gemische]	415 [378]	506 [440]	541 [498]	569 [469]	598 [496]

[3] *Web of science (core collection), Suchterm: BAM OR Bundesanstalt Mat Forsch* OR Fed Inst Mat Res* AND Berlin*

	2017	2018	2019	2020	2021
Personal (Stand 31.12.)					
Mitarbeiter*innen insgesamt	1660	1630	1601	1617	1632
Stammmitarbeiter*innen	1063	1072	1057	1049	1031
Haushaltsfinanzierte Zeitangestellte (inkl. Azubis, Doktorand*innen)	390	369	350	360	366
Vorhabenfinanzierte Zeitangestellte [davon Doktorand*innen]	207 [46]	193 [42]	195 [46]	213 [47]	245 [33]
Doktorand*innen	181	158	142	145	130
Auszubildende	59	62	61	61	57
Haushalt (in T€)					
Grundfinanzierung (gesamt)	142.490	144.201	143.816	155.068	164.836
Personalausgaben	80.820	83.090	84.694	86.072	85.955
Sachausgaben	39.629	41.405	39.424	44.680	49.350
Bauinvestitionen	7.400	6.200	3.966	8.002	7.007
Geräte-, IT-, sonstige Investitionen	14.641	13.507	15.732	16.314	22.524

Ein zentrales Element zur Sicherung der Qualität wissenschaftlicher Leistungen und der Effizienz des Wissenschaftssystems ist der wissenschaftsgeleitete Wettbewerb um Ressourcen. Dazu zählt sowohl die Teilnahme an Programmen des organisationsinternen Wettbewerbs als auch am nationalen und internationalen Wettbewerb um Drittmittel, beispielsweise in Förderprogrammen der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG), der Europäischen Union (EU) oder des Bundes.

Im Rahmen ihres Auftrages, die deutsche Wirtschaft zu unterstützen und Technologietransfer zu betreiben, wird die BAM sich auch zukünftig in besonderem Maße an Forschungsprogrammen der EU, des BMWK und des BMBF zur Förderung von kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) beteiligen. Von Bedeutung ist in diesem Zusammenhang die Beteiligung der BAM an den Förderprogrammen „Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand“ (ZIM) und „Industrielle Gemeinschaftsforschung“ (IGF) des BMWK sowie am Förderprogramm „Existenzgründungen aus der Wissenschaft“ (EXIST). Aufgrund ihrer regelsetzenden Tätigkeiten sind für die BAM auch Förderprogramme zur besseren Vernetzung von Forschung und Normung von Interesse.

In einem von Wissenschaft und Technologie geprägten Land wie der Bundesrepublik Deutschland stellen hervorragend qualifizierte Wissenschaftler*innen die wichtigste personelle Ressource zur Sicherung eines hohen Niveaus in Forschung und Entwicklung dar. Die BAM ist sich der Bedeutung dieser Aufgabe in der rechtzeitigen Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses bewusst und richtet sich grundsätzlich nach dem EU-Verhaltenskodex für die Einstellung von Forscher*innen. Für den Bereich Forschung und Entwicklung werden ca. 70 % der Arbeitszeit des Personals der BAM aufgewendet. Das befristet beschäftigte Personal ist ganz überwiegend in der Forschung tätig.

Ein hohes Niveau bei der technischen Ausstattung ist eine Voraussetzung für die hervorragende Stellung der BAM auf dem Gebiet der Sicherheit in Technik und Chemie. Die BAM verfügt zum Teil über Einrichtungen, die national oder auch europaweit einmalig sind. Als Beispiel sei das BAM TTS in Horstwalde genannt. Die experimentellen Möglichkeiten der BAM stehen im Rahmen der vertraglichen Vereinbarungen auch den Kooperationspartner*innen zur Verfügung.

20220093 BAM KM