



FORSCHUNGSPROGRAMM

2019 – 2021

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 Energie.



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

INHALTSVERZEICHNIS

1. Einleitung	5
2. Auftrag der BAM	6
3. Forschung für Sicherheit in Technik und Chemie	9
3.1 Themenfeld Energie	10
Erneuerbare Energien	10
Energiespeicherung	11
Thermische Kraftwerke	11
Kerntechnische Entsorgung	13
3.2 Themenfeld Infrastruktur	14
Sicherheit und Lebensdauer von Bauwerken	14
Sicherheit von Industrieanlagen und Verkehrswegen	15
Transport und Lagerung von Gefahrstoffen und -gütern	16
Fire Science	17
Security	17
3.3 Themenfeld Umwelt	18
Umweltverhalten von Materialien und Produkten	18
Umweltschadstoffe	19
Ressourcenzrückgewinnung und Materialverwertung	21
3.4 Themenfeld Material	22
Life Cycle von Komponenten	22
Degradation von Werkstoffen und Materialien	24
Materialien und Stoffe	26
Nanoskalige Materialien und deren Eigenschaften	29
3.5 Themenfeld Analytical Sciences	30
Spurenanalytik und chemische Zusammensetzung	30
Oberflächen- und Grenzflächenanalytik	31
Zerstörungsfreie Prüfung und Spektroskopie	32
Strukturanalytik und Materialographie	34
Sensorik	34
Qualitätssicherung	36
4. Forschungsinfrastruktur	37
4.1 Qualität der Forschung	37
4.2 Zentrale Forschungsförderungsprogramme	37
Themenfeldprojekte	38
Innovationsprogramm „Menschen und Ideen“	38
4.3 Doktorandenprogramm der BAM	39
4.4 Vernetzung & Internationalisierung	40
4.5 Ressourcen	40

1. EINLEITUNG

Die voranschreitende Digitalisierung, die Globalisierung sowie die daraus resultierende beschleunigte technologische Entwicklung bringen heute für die Industrieländer Herausforderungen im Hinblick auf Wachstum, Beschäftigung und Strukturwandel mit sich, denen nur mit einer entsprechenden Innovationsdynamik und -dichte begegnet werden kann. Grundvoraussetzung hierfür ist eine leistungsfähige Forschung und Entwicklung ebenso wie Wissens- und Technologietransfer zur Umsetzung von Forschungsergebnissen in marktfähige Produkte und Dienstleistungen. Europa hat sich im Rahmen des Lissabon-Prozesses zum Ziel gesetzt, den Anteil der Forschungsausgaben am Bruttoinlandsprodukt auf 3 % zu steigern. Um die Forschungsinfrastruktur in der Bundesrepublik zu stärken und global wettbewerbsfähig zu bleiben, hat die Bundesregierung mit der Hightech-Strategie 2025 einen weiteren wichtigen Schritt zur Förderung des wissenschaftlich-technischen Fortschritts in Deutschland getan.

Forschungsprogramme sind sowohl für Forschungseinrichtungen als auch für Mittelgeber ein wichtiges Instrument für die Darstellung und Steuerung ihrer Aktivitäten. Dies gilt auch für die Bundeseinrichtungen mit Forschungs- und Entwicklungsaufgaben, zu denen die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) zählt. Die BAM verfügt über einen klaren gesetzlichen Auftrag für die Sicherheit in Technik und Chemie. 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.



©BAM

2. AUFTRAG DER BAM

Technologischer Wandel ist ein Garant für den Wohlstand unserer Gesellschaft. Neue Technologien sind die Basis für die erfolgreiche Weiterentwicklung des Wirtschaftsstandortes Deutschland und für eine Wertschöpfung in globalen Märkten. Die nachhaltige Sicherheit neuer Technologien schafft das Vertrauen der Bürger in den Wandel und sichert unsere Zukunft. In den Spitzen- und Schlüsseltechnologien Materialwissenschaft, Werkstofftechnik und Chemie leistet die BAM 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.



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.



Hoheitliche und öffentliche Leistungen

Hoheitliche und öffentliche Leistungen sind durch Gesetz übertragene Aufgaben. Zulassun-

gen 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.



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. Mit der Durchführung von Prüfungen und Analysen, der Erstellung von Gutachten, Konformitätsbewertungen sowie durch die Bereitstellung von Referenzmaterialien, -verfahren und -daten trägt die BAM zur Qualitätssicherung bei.



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 Expertenplattformen.

Die BAM kommuniziert sicherheitstechnische Problemlösungen und bringt diese in die Regelsetzung und Normung ein. Beratung, Information und Mitarbeit in nationalen und internationalen Gremien gehört daher zu ihren wesentlichen Aufgaben. Seit mehr als 100 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, Kom-

ponenten 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. Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler 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 neutraler Moderator 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 weitergeben 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 geregelt¹:

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

Die Erkenntnisse der BAM dienen nicht nur dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), dem die BAM nachgeordnet ist. Die BAM erfüllt auch Aufgaben für andere Ressorts, insbesondere für das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU), das Bundesministerium für Arbeit und Soziales (BMAS) und das Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (BMI).

¹Rechtliche Grundlagen für die Aufgaben der BAM:

https://www.bam.de/_SharedDocs/DE/Downloads/Rechtliche-Grundlagen/bam-rechtl-grundlagen.pdf

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 BMWi wird die strategische Ausrichtung der BAM festgeschrieben, die im Forschungsprogramm sowie in BAM-internen Zielvereinbarungen konkretisiert wird. Die Leitlinie *„Sicherheit in Technik und Chemie“* macht die Aufgaben der BAM in der Forschung und in allen anderen Tätigkeiten für Auftraggeber und Partner wie für die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der BAM anschaulich.

Die Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten der BAM können in einem einfachen Produktionsmodell unterschiedlichen Stufen zugeordnet werden: Der Beginn neuer Fragestellungen ist eine starke und ergebnisoffene Grundlagenforschung, da die Arbeit der BAM auf höchstem Niveau nicht ohne eine solide Wissensbasis möglich ist. Wird die Grundlagenforschung nicht aus Eigenmitteln finanziert, sind öffentliche Forschungsträger, die keine thematische Einschränkung vorsehen, die wichtigsten Geldgeber. Grundlagenforschung erzeugt neues Wissen und hat als Produktionsleistung

die Publikation in Fachzeitschriften. Ist die Grundlagenforschung in einem Gebiet vorangeschritten, tritt in der BAM die angewandte Forschung an ihre Stelle. Die angewandte Forschung ist auf ein spezifisches Ergebnis ausgerichtet. Sie ist häufig drittmittelgetrieben und generiert neben Publikationen weitere Drittmittelumsätze für die Verfolgung der Ziele der BAM.

Auf die angewandte Forschung folgt die Technologieentwicklung. Sie baut auf vorhandenem Wissen auf und ist klar auf die Entwicklung neuer Produkte und Prozesse ausgerichtet. Technologieentwicklung wird von industriellen Auftraggebern oder von Drittmittelgebern, die den Technologietransfer fördern, unterstützt. Zu den Ergebnissen der Technologieentwicklung gehören auch Patente, Lizenzen oder Normen und technische Regeln. Das Ergebnis ist neben dem generierten Wissen auch die Entwicklung von Technologien und wissenschaftlich-technischen Dienstleistungen (z.B. Prüfungen, Zulassungen oder Konformitätsbewertungen) auf dem aktuellen Stand der Technik. Im Rahmen des Wissens- und Technologietransfers finden auf dieser Stufe auch sehr erfolgreiche Ausgründungen aus der BAM statt.

3. FORSCHUNG FÜR SICHERHEIT IN TECHNIK UND CHEMIE

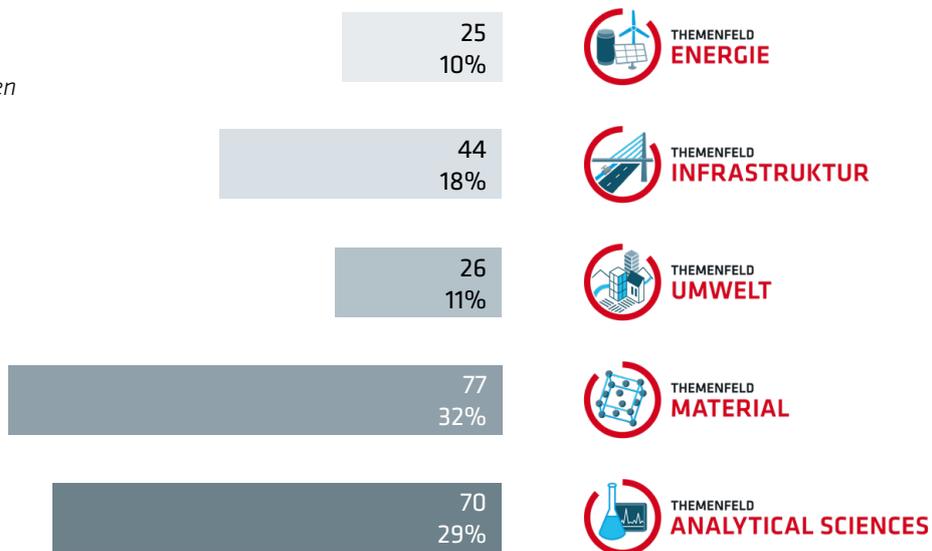
Die BAM integriert Forschung, Bewertung und Beratung in Technik und Chemie unter einem Dach. Im Rahmen ihrer gesetzlichen und gesellschaftspolitischen Aufgaben identifiziert die BAM Anforderungen an die Sicherheit in Technik und Chemie für die Gesellschaft von morgen. Forschung bildet als Erzeugerin von Expertise die Grundlage für Bewertung und Beratung. Diese kann langfristig nur mit kontinuierlichen Qualitätsstandards gewährleistet werden. Der strategischen Ausrichtung dieser Vorlauftforschung wird daher ein besonders hoher Stellenwert beigemessen. Die Bundesregierung hat in ihrer neuen Hightech-Strategie Themenkomplexe identifiziert, welche für die Entwicklung Deutschlands im Hinblick auf die Innovationsfähigkeit und zukünftige Herausforderungen von besonderer Relevanz sind. Dazu gehören verschiedene Technologien in den Bereichen Energie, Umwelt, Werkstoffe und Sicherheit. Zudem hat die neue Regierung in ihrem Koalitionsvertrag Schlüsseltechnologien identifiziert, welche für eine nachhaltige Anschlussfähigkeit der Deutschen Wirtschaft entscheidend sein werden.

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 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 grundsätzlich 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. Die Verteilung aller Fachaufgaben über die Themenfelder ist in der folgenden Abbildung gezeigt. Die Forschung an der BAM in den einzelnen Aktivitätsfeldern wird in diesem Forschungsprogramm für jedes Themenfeld kurz beschrieben.

Relative Verteilung der Fachaufgaben der BAM in der thematischen Zuordnung zu den Themenfeldern.



3.1 Themenfeld Energie

Für den Wirtschaftsstandort Deutschland ist das Thema Energie von zentraler Bedeutung. Im Themenfeld Energie forschen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der BAM an der gesamten Nutzungskette von Erzeugung über Speicherung und Verbrauch bis zur Entsorgung, zum Beispiel für die Energieträger Wind, Sonne und Gas. Die Forschungsaktivitäten im Themenfeld Energie gliedern sich in die Aktivitätsfelder: Erneuerbare Energien, Energiespeicherung, thermische Kraftwerke und kerntechnische Entsorgung.



©BAM



Erneuerbare Energien

Das Gelingen der Energiewende ist ein wichtiger Faktor für die Wettbewerbsfähigkeit des Industriestandorts Deutschland. Bis 2050 soll der Anteil erneuerbarer Energien an der Stromversorgung 80 Prozent betragen. Das bedeutet, dass das Energieversorgungssystem auf die neuen Anforderungen hin angepasst werden muss. Dabei geht es nicht nur um einen sicheren Netzbetrieb und die zuverlässige Versorgung mit Strom, sondern auch um die sichere Speicherung überschüssiger Energie.

Eine bereits weitverbreitete Technologie zur Stromerzeugung ist die Windenergie. Die Forschungstätigkeiten der BAM auf dem Gebiet der Offshore-Windenergieanlagen (OWEA) umfassen die Optimierung von Gründungskonstruktionen, die Verknüpfung von messtechnischen Überwachungsaufgaben mit Handlungskonzepten sowie Untersuchungen zur Installation von Gründungskörpern wie Pfählen. Parallel werden entsprechende numerische Simulationswerkzeuge eingesetzt und weiterentwickelt. Zur langfristigen Gewährleistung der technischen Sicherheit beinhalten die Forschungsarbeiten auch systematische Untersuchungen zu der Beständigkeit und der Dauerhaftigkeit der verbauten Stahllegierungen. Für die regelmäßige bzw. kontinuierliche Überwachung von bestehenden OWEA erforscht die BAM neue thermografische Verfahren, die die natürliche Sonneneinstrahlung als Wärmequelle nutzen und so Fehlstellen und Inhomogenitäten in großflächigen Strukturen wie Rotorblättern aus großer Entfernung aufzeigen können.

Der sichere Einsatz neuartiger Konzepte zur Energieerzeugung bedarf zum Teil neuartiger Materialien, die an der BAM betrachtet werden. So zeigen beispielsweise moderne Hochleistungspolymere mit intrinsischer Mikroporosität herausragende Permeationseigenschaften für die Auftrennung von Gasgemischen. Forscherinnen und Forscher der BAM entwickeln Konzepte zur Bewertung und Verbesserung der Langzeitperformance sowie der molekularen Dynamik und Gastransporteigenschaften solcher Hochleistungspolymere. Auch glasig-kristalline Werkstoffe sind Schlüsselkomponenten für Anwendungen in der Energietechnik (z.B.

Solarglas, Glasfasern, Wasserstoffsperrschichten). Durch die Untersuchung von thermisch initiierten Relaxations- und Transportvorgängen (z.B. thermischer Rissheilung, Wasserstoffdiffusion oder Sinterung) soll zur Entwicklung von zuverlässigen Hochleistungswerkstoffen und Systemen für erneuerbare Energien beigetragen werden. In Schichtsystemen können Glas und Polymere auch gezielt kombiniert werden, um beispielsweise der abrasiven Schädigung an Photovoltaik-Modulen durch Sand und andere Partikel vorzubeugen. Auch biologisch induzierten Einbußen des Wirkungsgrads der Photovoltaik, wie er durch die Bildung von Biofilmen eintritt, kann entgegengewirkt werden, sofern diese umfänglich verstanden sind.

Als Teil des Nationalen Aktionsplans Energieeffizienz unterstützt die BAM die Marktüberwachung bezüglich der Messnormen für die vier Produktgruppen Wärmepumpen, Klimaanlage, Wäschetrockner und Dunstabzugshauben. Hierzu werden Ringversuche und weitere Produktprüfungen in externen Labors durchgeführt und im Rahmen von Forschungsarbeiten ausgewertet. Ziel ist die Verbesserung der Prüfmethode, so dass sie die realen Betriebsbedingungen möglichst realistisch abbilden und die Eignung der Prüfmethode für die Marktüberwachung sicherstellen. Die Umsetzung der Forschungsergebnisse geschieht im Austausch mit den Behörden der Länder und den einschlägigen Normungsgremien.

Energiespeicherung

Um die Energie aus erneuerbaren Quellen zu speichern, braucht es geeignete und leistungsfähige Energieträger und -speicher. Dies gilt sowohl für den mobilen Einsatz als auch für große Speicherkraftwerke. Aktuell sind bereits (Lithium-)Batterien und Wasserstoff als neuartige Energiespeicher und -träger im Einsatz. Diese müssen aber nicht nur wirtschaftlich und effizient, sondern auch sicher sein, um von Verbraucherinnen und Verbrauchern akzeptiert zu werden. Die BAM beteiligt sich im Bereich Energiespeicherung unter anderem an der Weiterentwicklung von wasserstoffbasierten Verfahren und bearbeitet Sicherheitsfragen der Wasserstofftechnologien. Composite-Druckgefäße werden für den Transport und die Nutzung von Wasserstoff verwendet. Die BAM arbeitet an Prüfmethode, um die Lebensdauer von Composite-Druckgefäßen exakter vorherzusagen und so langfristig den Transport von

Wasserstoff als Energieträger sicherer zu machen. Die Sicherheit und Degradation von Composite-Gasspeichern wird statistisch bewertet und Versagensauswirkungen von Energiespeichern werden betrachtet.

Im Themenschwerpunkt Gasanalytik werden Herstellungsverfahren und Analysemethoden für hochgenaue Gasmischungen erarbeitet. Dazu gehören beispielsweise nationale Gas-Normale für Energiegase und Automobil-Abgase sowie die Zertifizierungsanalytik. Die Themen umspannen die sichere Herstellung wasserstoffreicher Erdgase für die „Power-to-Gas“-Technologie oder den Einsatz der quantitativen NMR-Spektroskopie als belastbare Analytik der chemischen Zusammensetzung von Flüssiggasen.

Die BAM forscht des Weiteren zur Transportsicherheit von defekten oder beschädigten Lithium-Batterien sowie deren Prototypen. Ziel ist es, Standards für nationale und internationale Regelwerke und Gesetze mitzugestalten. Darüber hinaus werden an der BAM Sicherheitsaspekte bei der Entwicklung und Aufstellung von Hochleistungsbatterien untersucht, um diese aktiv in die Normung und Regelsetzung einzubringen.

Auch alternative Ansätze zur Zwischenspeicherung wie Schmelzwärmespeicher auf Salzbasis werden an der BAM erforscht. Dies beinhaltet über thermodynamische Modelle und deren experimentelle Validierung hinaus auch die Entwicklung und Auswahl korrosionsbeständiger Werkstoffe.

Thermische Kraftwerke

Die Energiewende stellt auch thermische Kraftwerke vor neue Herausforderungen. Zukünftig sollen konventionelle Kraftwerke, welche durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe betrieben werden, hauptsächlich zur Netzstabilisierung eingesetzt werden. Durch den damit verbundenen zeitlich variablen Betrieb bei zum Teil sehr hohen Temperaturen entstehen neue Belastungsszenarien.

Die wesentliche Herausforderung liegt auf der Weiterentwicklung der verwendeten Werkstoffe. Dafür werden die kombinierten thermischen und mechanischen Beanspruchungen sowohl experimentell untersucht als auch numerisch simuliert. Aufbauend auf den so gewonnenen Ergebnissen werden neue Werkstoff(e)

(-kombinationen) entwickelt und vorgeschlagen. So werden beispielsweise Stahlrohre mittels Sol-Gel Verfahren beschichtet, um einer beschleunigten Hochtemperaturkorrosion proaktiv vorzubeugen. Darüber hinaus werden numerische Modelle für die sichere Auslegung von zukünftigen Kraftwerken herangezogen.

Für die thermoelektrische Rückgewinnung von Restwärme in Hochtemperaturanwendungen werden geeignete Oxidkeramiken entwickelt, daraus mit Hilfe der

Folien- und Multilayertechnik neuartige co-gesinterte thermoelektrische Generatoren aufgebaut und deren Wirkungsgrad und Zuverlässigkeit sowie das Potenzial für eine kostengünstige Herstellung bewertet.

Kerntechnische Entsorgung

Zur Entsorgung radioaktiver Abfälle aus Kernkraftwerken, Forschung, Medizin und Industrie werden Behälter



©BAM

Castor Fallversuch

benötigt, die einen dichten Einschluss im Normalbetrieb und in Unfall- bzw. Störfallsituationen gewährleisten. Diese Behälter werden für Transporte, die Zwischenlagerung sowie die Endlagerung in tiefen geologischen Formationen eingesetzt. Nachdem sich die Errichtung von Endlagern verzögert, verlängert sich die Dauer der Zwischenlagerung von einigen Jahrzehnten bis zu möglicherweise 100 Jahren. Die BAM leistet im Bereich der kerntechnischen Entsorgung einen wichtigen Beitrag bei Sicherheitsbewertungen im Rahmen von Zulassungs-, Aufsichts- und Genehmigungsverfahren. Mit ihrer analytischen, numerischen und experimentellen Kompetenz und der ausgeprägten Interdisziplinarität entwickelt und validiert sie Nachweisverfahren und Bewertungsmethoden zum Langzeitverhalten von Werkstoffen, Bauteilen, Behältern und Behälterinventaren.

Im Mittelpunkt steht aktuell die Sicherheitsbewertung von Behältern für radioaktive Abfälle im Hinblick auf die vier wesentlichen Schutzfunktionen Ausschluss von Kritikalität, dichter Einschluss, Abschirmung und Zerfallswärmeabfuhr und vor dem Hintergrund verlängerter Zwischenlagerzeiträume einschließlich nachfolgender Transporte. Aktuelle Forschungsinhalte betreffen daher die weitergehende Untersuchung und Beschreibung des Langzeitverhaltens und der Alterungsmechanismen von Behälterdichtsystemen und insbesondere von Metall- und Elastomerdichtungen, das bruchmechanische Versagensverhalten von Brennstabhüllrohren unter Berücksichtigung radiolater Hydrid-Ausscheidungen, sowie das mechanische

Verhalten von Brennelementen unter Unfallbeförderungsbedingungen und das mechanische und thermische Verhalten von stoßdämpfenden Strukturen.

Weiterhin gewinnt die Entwicklung von Anforderungen und Behälterkonzepten für die Endlagerung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle (bestrahlte Brennelemente, verglaste hochradioaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung) für alle in Frage kommenden geologischen Wirtsgesteine (Salz, Tonstein, Kristallin) im Rahmen des per Gesetz neu geregelten Standortauswahlverfahrens entscheidend an Bedeutung. Basierend auf der vorhandenen Expertise aus der Sicherheitsbewertung für den Transport und die Zwischenlagerung radioaktiver Abfälle wirkt die BAM hier bei der Herleitung von behälterspezifischen Anforderungen und Bewertungskonzepten unter Berücksichtigung der vielfältigen Beanspruchungsparameter in einem tiefen geologischen Endlager mit.

Schließlich sind zur Bewertung der Behälterintegrität unter Betriebsbedingungen und bei Störfällen neben experimentellen Erprobungen computergestützte Modelle von weiter zunehmender Bedeutung. Die BAM widmet sich in diesem Zusammenhang der kontinuierlichen Entwicklung und Weiterentwicklung numerischer Modelle und Prüfmethoden zur Simulation und sicherheitstechnischen Bewertung mechanischer und thermischer Unfallszenarien von Transport- und Lagerbehältern.



3.2 Themenfeld Infrastruktur

Eine moderne, jederzeit verfügbare und technisch sichere Infrastruktur von Industrieanlagen, Bauwerken, Versorgungssystemen und -wegen ist ein zentraler wirtschaftlicher Standortfaktor in Deutschland. Im Themenfeld Infrastruktur arbeitet die BAM an der Entwicklung technisch-wissenschaftlicher Verfahren zur Gewährleistung einer sicheren und dauerhaften technischen Infrastruktur.

Sicherheit und Lebensdauer von Bauwerken

Das Gebiet Bauwerkssicherheit umfasst die Entwicklung, Untersuchung und Bewertung innovativer Baustoffe und Bauweisen hinsichtlich ihrer Sicherheit und Dauerhaftigkeit in allen Bereichen des Hoch- und Ingenieurbaus. Aktuelle Schwerpunkte der Forschung betreffen Verkehrswege, Brücken, Industrieanlagen und Bauwerke für die Energieerzeugung.

Die BAM forscht für eine Verbesserung der Verkehrsinfrastruktur. Dieses Forschungsgebiet umfasst werkstoffwissenschaftliche Studien wie die Alterung von Straßenbelägen durch die Alkali-Kieselsäure-Reaktion. Das genaue Verständnis dieser chemischen Beanspruchung wird hierbei in Verbindung von mechanischer Beanspruchung unter Anwendung möglichst zerstörungsfreier Methoden untersucht. Darüber hinaus werden Fugenabdichtungen, die eine wichtige Funktion in Bezug auf die Dauerhaftigkeit von Straßen- und Ingenieurbauwerken haben, unter Einwirkung der jeweils relevanten praxisnahen Beanspruchungen untersucht und im System bewertet. Im Bereich des Schienenverkehrs werden die messtechnischen und numerischen Bewertungsverfahren zu Fragen des Erschütterungsschutzes weiterentwickelt.

Die Schwerpunkte der BAM in der großmaßstäblichen Bauteilanalyse liegen auf Untersuchungen zur Ermüdungsfestigkeit von Bauteilen, insbesondere



©BAM

Schweißverbindungen, sowie auf der Untersuchung von Schutzelementen unter stoßartiger Belastung und der Entwicklung optimierter Schutzelemente.

Ein wichtiges Feld ist die Erforschung von Methoden für die Bauwerküberwachung. Für eine Dauerüberwachung von verbauten Werkstoffen arbeitet die BAM an neuen bauteilintegrierten Sensoren und Methoden, zum Beispiel auf Basis von Ultraschall oder RFID-Technologien. Primär auf der Basis von Ultraschall und Radar werden Verfahren zur Zustandserfassung von Bestandsbauten und zur Qualitätssicherung von Neubauten entwickelt, validiert und in die Praxis überführt, mit denen geschädigte Bereiche lokalisiert werden können. Darüber hinaus entwickelt und nutzt die BAM verteilte faseroptische Sensorik und Fasersensorsysteme für eine kontinuierliche lückenlose Überwachung von Infrastrukturbauten mit einer großen räumlichen Ausdehnung wie Brücken, Dämme oder Tunnelwandungen. Die unterschiedlichen Skalen, die mit der an der BAM entwickelten Sensorik erfasst werden können, reichen von wenigen Millimetern bis hin zu mehreren Kilometern.

Neue Applikationstechniken, z.B. 3-D Druck und Injektionstechniken oder Anwendungsbereiche erfordern neue Messverfahren und -geräte, an denen die BAM forscht, um neuen oder geänderten Anforderungen an Baustoffe, Bauteile oder Bauwerken gerecht zu werden. Darüber hinaus arbeitet die BAM an der Entwicklung neuer Instandsetzungsprodukte und Instandsetzungsverfahren, da die Instandhaltung und Instandsetzung von Infrastrukturbauwerken ein Kernthema bei der Nutzung baulicher Infrastruktur ist. Für eine Umsetzung von Integration Building Information Modeling (BIM) und Digitalisierung werden zudem vermehrt passive und/oder intelligente Systeme zur Bauwerksüberwachung untersucht, die im Rahmen des Lifecycle-Managements die aktuelle Bauwerksbewertung ermöglichen.

Brückenmonitoring zur Bewertung, Lebensdauerprognose und Instandsetzung von Brückenbauwerken

Der Stellenwert von theoretischen Simulationen und Modellen nimmt in der Forschung der BAM stetig zu. Im Bereich Mechanik der Baustoffe ist ein Ziel die Entwicklung von neuen Verfahren zur Simulation des Betonverhaltens unter verschiedenen Belastungsszenarien, z.B. statische und zyklische Lasten sowie die Kopplung mit Multiphysics-Problemen (Feuchte, Temperatur) und deren Kalibrierung unter Verwendung stochastischer Verfahren. Im Bereich Bauwerksmonitoring, Schadensdetektion und Zustandsanalyse liegt die wesentliche Herausforderung in der Erprobung und Verbesserung von theoretisch basierten Verfahren zur Bauwerksüberwachung an Bauwerken im Betrieb. Dazu gehört auch die Planung und Durchführung großer Messkampagnen in der Bauwerksüberwachung. Spezielle Fragestellungen sind die Anwendung von Verfahren zur Schadensdetektion für Gründungsbauwerke sowie Untersuchungen zur Lokalisation und zu Umwelteinflüssen bei Schadensdetektionsverfahren. Mittelfristiger Schwerpunkt ist die konzeptionelle Einbindung risikobasierter Verfahren.

Sicherheit von Industrieanlagen und Verkehrswegen

Der sichere Betrieb technischer Industrieanlagen erfordert umfassende Kenntnisse zum Verhalten der eingesetzten metallischen Werkstoffe in unterschiedlichen branchentypischen Anwendungen. Die BAM erprobt daher kontinuierlich Werkstoffe bezüglich ihres Korrosionsverhaltens in technischen Umgebungen und sorgt für einen unmittelbaren Eingang der Ergebnisse in Normen und Regelwerke.

Im Bereich Brandschutz betrachtet die BAM aktuelle interdisziplinäre und gesellschaftlich relevante Fragestellungen, die sich aus dem Bereich der Sicherheit von Industrie- und Verkehrsanlagen ergeben. Grundlegendes Ziel ist die Erforschung mathematisch-physikalischer Modelle für Wärme- und Stoffübertragung, Brand- und Rauchausbreitung, Toxizität und Lichtschwächung für die numerische Simulation von Schadensereignissen, insbesondere Großschadensfeuern. Mittelfristige Schwerpunkte liegen dabei auf der Kopplung des Brandgeschehens mit dem thermo-mechanischen Bauteilverhalten, auf der Verknüpfung von Explosionsszenarien mit Brandereignissen sowie auf der numerischen Erfassung der Brandbekämpfung.

Im Bereich des Brand- und Explosionsschutzes und der Störfallauswirkungsbetrachtungen werden Modelle für Störfallszenarien entwickelt und experimentell überprüft. Dabei werden insbesondere Gasausbreitungsrechnungen mit strömungsmechanischen Methoden durchgeführt und ihre Einsatzgrenzen ermittelt. Darüber hinaus erfolgen experimentelle Untersuchungen und Simulationen zur Ermittlung thermischer Sicherheitsabstände für Feuerbälle organischer Peroxide. Der Einfluss von Feuerbällen beim Brand von organischen Peroxiden auf die freiwerdende Wärmestrahlung und deren Gefährdungen auf die Umgebung werden bestimmt. Neue Produktionsverfahren werden hinsichtlich der sicheren Durchführung exothermer Reaktionen untersucht, um hier ggf. über das technische Regelwerk den Stand der Technik zu definieren.

Auf dem BAM Testgelände Technische Sicherheit (BAM TTS) werden Maßnahmen des konstruktiven Brand- und Explosionsschutzes, welche die Auswirkungen von Explosionen auf ein unbedenkliches Maß vermindern oder die Explosionsausbreitung räumlich beschränken, im Technikums- und Realmaßstab untersucht. Darüber hinaus werden Turbulenzeinflüsse auf Druckentlastungen in großen Volumina untersucht sowie eine standardisierte Prüfmethode für instabile Detonationssicherungen erarbeitet. Zur sicherheits-

technischen Beurteilung von Anlagenkomponenten werden für die Untersuchung von Ausrüstungsteilen und Ventilen im Gas-Hochdruckbereich neue Prüfapparaturen für Drücke bis zu 1500 bar entwickelt. Damit trägt die BAM der technischen Entwicklung der Gasspeichertechnik bei den Energiegasen Rechnung.

Im Rahmen der Bewertung von Druckbehältern, Tanks und Rohrleitungen und deren Beständigkeitsbewertung werden die Kriterien zur sicherheitstechnischen Bewertung von Gefahrguttanks unter auslegungsüberschreitenden Belastungen weiterentwickelt. Hierbei werden neben den thermohydraulischen Lastannahmen auch Umgebungsrandbedingungen berücksichtigt.

Transport und Lagerung von Gefahrstoffen und -gütern

Die BAM untersucht und bewertet Behälter für den Transport und die Lagerung von Gefahrstoffen und -gütern. Dazu gehören zum Beispiel Chemikalienbehälter, Fässer, IBC (Intermediate Bulk Container), Druckgasflaschen bis hin zu Tankwagen und Lagertanks. Anhand von sicherheitstechnischen Fragen wie Konstruktionsmerkmalen, Materialeignung und Schädigungsmechanismen werden Prüfverfahren und Methoden entwickelt und Maßnahmen zum Transport und zur Lagerung von Gefahrstoffen und -gütern abgeleitet. Die Forschung rund um die Verfahren zur sicheren Verwendung und Zulassung von Druckgefäßen dient insbesondere auch der Beantwortung von Fragestellungen aus der Politikberatung unter anderem zu Treibgasspeichern aus dem Bereich Mobilität.

Der Transport und die Lagerung gefährlicher Güter erfordern eine Einstufung der Korrosivität der Werkstoffe von Tank- und Lagerbehältern. Die BAM führt daher systematische Untersuchungen zur Klassifizierung der Korrosivität von Medien und zur Qualifizierung neuer Werkstoffe für spezielle Einsatzgebiete durch und verankert die Erkenntnisse in aktuellen Regelwerken.



©BAM

Brandversuch auf dem BAM Testgelände Technische Sicherheit

Fire Science

Der Brand- und Explosionsschutz in komplexen Industrieanlagen, beim Transport gefährlicher Güter oder in Infrastrukturbauwerken aber auch der Flammenschutz von neuen Werkstoffen und der Feuerwiderstand von Bauteilen und Strukturen sind wesentliche Bausteine für das Sicherheitsniveau und die nachhaltige Wettbewerbsfähigkeit des Technologiestandorts Deutschland. Im Aktivitätsfeld Fire Science erforscht und bewertet die BAM die wissenschaftlich-technischen Zusammenhänge von Bränden und Explosionen und deren Verlauf. Außerdem werden die Pyrolyse von Werkstoffen, ihr Brandverhalten, Flammenschutz und Rauchentwicklung, der Brandschutz von Bauteilen, Gefahrstoff-/ -gutumschließungen und industriellen Anlagen, die Branddetektion, die Brandbekämpfung und die Evakuierung erforscht und bewertet.

Die BAM führt unter kontrollierten Bedingungen Brandversuche im Groß- und Realmaßstab durch. Diese dienen als unersetzliche Grundlage für die numerische Modellentwicklung und die Bereitstellung und Validierung von Versuchs- und Bewertungsverfahren auf kleineren Skalen. Ferner lassen sich Aussagen zum Feuerwiderstand unmittelbar aus den Versuchsergebnissen ableiten.

Untersuchungen des Feuerwiderstands von Konstruktionen mit neuen Baustoffen bzw. neuen Kombinationen von Baustoffen erfolgen auf versuchstechnischer (thermomechanische Beanspruchung) und auf rechnerischer (Simulationsberechnungen mittels FEM) Grundlage. Konkrete Beispiele sind das Brandverhalten, der Flammenschutz sowie die Flammenschutzmechanismen von zukünftigen Polymerwerkstoffen, aktuellen Werkstoffentwicklungen sowie neuen Flammschutzkonzepten. Dabei stehen nachhaltige Materialien (nachwachsende Rohstoffe), Leichtbaumaterialien (Schäume und Composite) und synergistische Multikomponenten-Flammenschutzsysteme im Vordergrund sowie der Einsatz von maßgeschneiderten Untersuchungsmethoden. An der BAM wird zudem die Schutzwirkung von reaktiven Brandschutzsystemen auf Tragstrukturen zur Verbesserung des Feuerwiderstands untersucht. Ziel ist neben der Optimierung des Einsatzes der reaktiven Brandschutzsysteme insbesondere die Entwicklung einheitlicher Prüf- und Bewertungsmethoden. Das Abplatzen an Betonoberflächen infolge von Brandeinwirkung sowie die zugrundeliegenden

Mechanismen werden untersucht. Ferner werden Prüfmethode für das Abplatzverhalten von Beton entwickelt und der Einfluss der Geometrie und Größe von Versuchskörpern auf das Abplatzen untersucht.

Rauch beeinflusst aufgrund seiner Toxizität und Sichttrübung die Fluchtmöglichkeit von Personen im Brandfall. An der BAM wird die Rauchgaszusammensetzung in anwendungsrelevanten Brandszenarien sowie der Einfluss von alten und neuen Materialien auf die Rauchentwicklung untersucht. Hierzu werden im Labormaßstab die freiwerdenden toxischen Gase und Partikel untersucht und bewertet. Ziel ist es, die Simulation des Evakuierungsverhaltens zu verfeinern, insbesondere die Kombination der Raumbrandsimulation mit der Simulation des Fluchtverhaltens. Weitere Schwerpunkte von Betrachtungen stellen die Brandfrüherkennung und linear-gerichtete Brände wie z.B. Fassadenbrände dar.

Security

Im Bereich Security arbeitet die BAM an der Entwicklung technischer Konzepte zum Erhalt der öffentlichen Sicherheit und zur Risikominimierung. Eine wichtige Thematik im Bereich Security besteht in experimentellen und numerischen Untersuchungen an kritischer Infrastruktur gegenüber Detonationswirkungen. Die BAM verfügt mit dem Testgelände Technische Sicherheit (BAM TTS) über eine einmalige Infrastruktur, um Spreng- und Brandszenarien, wie sie bei gezielten Angriffen auftreten würden, im Realmaßstab nachzustellen. Anhand von Versuchen wird die Wirkung von Detonationen auf Bauteile wie Fassaden, Fenster und Türen bestimmt und für numerische Simulationen verwendet. Der erzeugte Datensatz wird darüber hinaus herangezogen, um die Skalierbarkeit der Experimente zu überprüfen. Darüber hinaus beschäftigt sich die BAM mit der experimentellen Untersuchung möglicher Brand- und Explosionsauswirkungen im Realmaßstab, wenn unkonventionelle Spreng- und Brandvorrichtungen zum Einsatz kommen.



3.3 Themenfeld Umwelt

Wirtschaftliches Wachstum fördern und dabei Ressourcen schonen und ökologische Schutzziele einhalten – das steht im Fokus der Aktivitäten im Themenfeld Umwelt der BAM. 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.

Umweltverhalten von Materialien und Produkten

Im Bereich Umweltverhalten von Materialien und Produkten entwickelt die BAM Messmethoden, mit denen solche Wechselwirkungen qualitativ und quantitativ bestimmt werden können. Darüber hinaus charakterisieren Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der BAM Schäden durch Umwelteinflüsse, klären Entstehungsmechanismen auf und zeigen Ansätze für Verbesserungen und Schutzmaßnahmen. Sie leisten damit einen wichtigen Beitrag zur Verbesserung des Umweltverhaltens und der Umweltverträglichkeit von modernen und zukunftsfähigen Materialien und Produkten.

Durch Einsatz molekularbiologischer, mikroskopischer und geochemischer Analysemethoden werden

beispielsweise biogene Veränderungen auf Gesteinen, Fassaden und Solaranlagen quantitativ nachgewiesen. In Laborexperimenten mit Modellbiofilmen klärt die BAM Mechanismen der Verwitterungsprozesse auf. Das erhaltene Wissen um die genomische Beschaffenheit der materialbesiedelnden und -zerstörenden Organismen bildet die Grundlage für eine weiterführende Biodeteriorationsforschung. Die BAM setzt markierte genetisch manipulierbare Modellpilze ein, um das Verständnis der Materialbesiedlungsprozesse zu verbessern und nachhaltig innovative Bekämpfungsmethoden zu entwickeln.

Die Biofilmbildung in technischen Anlagen führt zu einer verminderten Produktion und Effizienz, oft sogar zu unvermitteltem Versagen mit gefährlichen Konsequenzen. Die Untersuchungen der Mechanismen von mikrobiell induzierter Korrosion sollen dazu dienen, die Faktoren, die die Anfälligkeit von Materialien und Oberflächen für mikrobielle Besiedlung und mikrobiell induzierte Korrosion bestimmen, besser zu verstehen und geeignete Gegenmaßnahmen zu entwickeln.

Ein weites Forschungsgebiet zur Biokorrosion sind medizinische Implantate. Die Arbeiten tragen zu einem Verständnis bei, inwiefern die Mikroorganismen, die Korrosion verursachen, auch Krankheitserreger sein können. Darauf basierend führt die BAM



©BAM

Untersuchungen zur Entwicklung von Biozidresistenzen bei Bacteria in Kombination mit Antibiotika durch, um etwaige Kreuzresistenzen besser zu verstehen. Die breite Expertise der BAM im Umgang mit Mikroorganismen wird auch genutzt, um solche in technischen Systemen wie Kühlkreisläufen, Kühlschmiermitteln, Treibstoffversorgungen und ähnlichem zu quantifizieren und charakterisieren.

Die BAM verwendet materialschädigende Insekten im Rahmen ihrer Forschungsarbeiten und betreibt die Zucht und Bereitstellung von Insekten als Referenzorganismen für Prüfungen. Dies beinhaltet Untersuchungen zur biologischen Bekämpfung von Materialschädlingen, gelbe Biotechnologie zur Entwicklung von neuartigen Substanzen, wie z.B. antimikrobielle Stoffe und die Isolierung neuer Mikroorganismen insbesondere mit Hilfe von Termiten.

Die BAM betreibt Auslagerungsversuche in natürlichen und künstlichen Klimaten. Materialien werden dabei unterschiedlichen Beanspruchungen in der Luft, im Boden und in Gewässern ausgesetzt, die mittel- und langfristigen Veränderungen unterworfen sind. Diese Veränderungen sowie der Einsatz neuer Materialien in innovativen technischen Lösungen in globalen Märkten erfordern fortlaufende Untersuchungen zum Materialverhalten. Die erhaltenen Datensätze werden BAM-intern zur Validierung von Alterungskammern für eine künstliche Beschleunigung dieser Prozesse herangezogen.

In Modellversuchen werden die Schadstoffausträge aus Materialien und Produkten ermittelt. Die Modellszenarien in Klimakammern und in mikrobiell hochaktiven Böden werden mit Freilandszenarien verglichen, um Wege zu einer beschleunigten Testung zu finden. Beispielfhaft werden so Austräge von Flammschutzmitteln und Monomeren als Abbauprodukten aus Polymermaterialien untersucht. Darüber hinaus wird die Mobilität von

Schadstoffen in Boden und Grundwasser betrachtet. Dafür werden Verfahren zur Ableitung des Gefährdungspotentials aus dem experimentell bestimmten Quellterm für mittelfristige Zeiträume weiterentwickelt. Ein Schwerpunkt sind Untersuchungen in Systemen mit neuartigen Schadstoffen, sogenannte emerging pollutants wie z.B. perfluorierte Verbindungen.

Im Bereich der Baustoffgewinnung wird die Ressourcenschonung und Nachhaltigkeit betrachtet. Die Baustoffindustrie umfasst die aktuell größten Massenströme und den größten Verbrauch an primären Rohstoffen. Die Verwendung von Massenreststoffen zur Nutzung als Ausgangsstoffe für die Baustoffe kann bei gleicher oder gesteigerter Leistungsfähigkeit einen wichtigen Beitrag zur Ressourcenschonung liefern. Hierfür kommen alle umweltverträglichen Massenreststoffe in Frage, die als dauerhaftes Material in Bauprodukten einsetzbar sind.

Umweltschadstoffe

Innovative Produkte und Materialien können neue, umweltfremde Stoffe freisetzen. Jeder dieser neuen Stoffe bringt erwünschte und oftmals unerwünschte Wirkungen mit sich. Ein Forschungszweig fokussiert sich auf die Entwicklung chromatographischer Analyseverfahren für organische Kontaminanten in der Umwelt und in Lebensmitteln mit dem Ziel, diese Verfahren für die Qualitätssicherung bzw. nationale und internationale Normung nutzbar zu machen. Im Mittelpunkt dieser Arbeiten steht die spurenanalytische Quantifizierung klassischer Target-Analyten und emerging pollutants. Darüber hinaus können die Gas- und Flüssigkeitschromatographie eingesetzt werden, um die Konzentrationen von Umweltschadstoffen direkt in Umweltmatrices (Wasser, Boden, Luft) zu bestimmen. Auch Reinstoffanalysen werden im Rahmen der Teilnahme an Ringversuchen durchgeführt.

Die BAM nimmt eine Bewertung der Nachhaltigkeit von Materialien bezüglich technischer Sicherheit vor. Hierzu erfolgt eine Abwägung der technischen Sicherheit gegenüber vertretbaren toxischen und ökotoxischen Auffälligkeiten und Nachteilen. Ergibt sich durch Umweltgesetzgebungen eine Substitution von Stoffklassen, so erarbeitet die BAM werkstoff- und schmierstofftechnische Lösungswege für die Substituenten durch die Erstellung tribologischer Profile.

Glasträger mit Modellbiofilmen

An der BAM werden Referenzverfahren für die qualitative und quantitative Bestimmung der Emission aus Materialien und Produkten in die Luft, Immission und deren Wechselwirkung mit Material und Umwelt entwickelt. Emissionen aus Materialien und Produkten, wie Bedarfsgegenständen, 2D- und 3D-Druckern und Nanomaterialien, wie auch deren Immission und Wirkung auf Material und Umwelt werden bisher nur unzureichend untersucht und charakterisiert. Daher werden an der BAM leistungsfähige Verfahren erarbeitet, auch für neue, bisher nicht näher untersuchte Luftschadstoffe, die eine umfassende qualitative und quantitative Erfassung und Bewertung unter praxisnahen Bedingungen ermöglichen, Referenzwerte

schaffen und Minderungsmöglichkeiten aufzeigen. 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) untersuchen 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 Kunst-



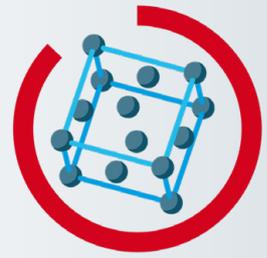
©BAM

werke schädigen. Die BAM arbeitet an der qualitativen und quantitativen Bestimmung der Biozide und ermöglicht dadurch die Bewertung des Gefahrenpotentials und die Erstellung von Konzepten zur Detoxifizierung.

Ressourcenrückgewinnung und Materialverwertung

Die Erhöhung der Rohstoffproduktivität ist erklärtes Ziel der Bundesregierung. Dieses ist insbesondere durch eine konsequente Weiterentwicklung der Kreislaufwirtschaft unter Einbeziehung von Massenreststoffen erreichbar. Im Bereich der Gewinnung und Verwertung von Sekundärrohstoffen befasst sich die BAM mit der Rückgewinnung von Wertstoffen aus großen Reststoffströmen der industriellen Produktion, Baurestmassen, sowie Aschen und Schlacken. Für die Verwertung solcher Reststoffe entwickelt und bewertet die BAM Verfahren der Stofftrennung. 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. Unter anderem werden pyrometallurgische Prozesse im kleintechnischen Lichtbogenofen bei Temperaturen oberhalb von 2000°C untersucht. Darüber hinaus wird die Rückgewinnung von Sekundärrohstoffen aus Abfällen mit nassmechanischen Verfahren in einer halbtechnischen Aufbereitungsanlage untersucht. Schwerpunkt bilden Aschen aus der thermischen Abfallbehandlung.

Aluminium aus Hausmüllverbrennungsasche



3.4 Themenfeld Material

Materialwissenschaft und Werkstofftechnik sind essenzielle Schlüsseltechnologien einer modernen, wirtschaftlich starken Gesellschaft und bilden die klassische Kernkompetenz der BAM. Das Themenfeld Material führt die materialwissenschaftlichen und werkstofftechnischen Erkenntnisse aus allen Themenfeldern zusammen und beleuchtet Lebensdauer, Zuverlässigkeit und Nachhaltigkeit von Materialien und den Life Cycle von Komponenten.

Life Cycle von Komponenten

Der sichere Betrieb von technischen Systemen und Prozessen ist von grundlegender Bedeutung für die öffentlich-technische Sicherheit. Die sicherheitstechnischen Anforderungen müssen von der Konzepterstellung und der Konstruktion über die Fertigung und Montage sowie die Betriebsphase einschließlich Überwachung und Reparatur bis hin zur Demontage und Recycling realisiert werden. Im Zuge der Globalisierung der Märkte und den damit einhergehenden verkürzten Entwicklungszeiten kommt es verstärkt darauf an, das hohe Niveau der technischen Sicherheit in Deutschland und der in unserem Land gefertigten Produkte zu erhalten, um diesen Standort- und Wettbewerbsvorteil zu sichern und weiter auszubauen. Dies verlangt von der Wirtschaft und den Überwachungsorganen zuverlässige, aussagekräftige und realistische Prüfverfahren und Simulationstechniken. Die BAM hilft bei der Entwicklung und Anwendung solcher Verfahren zur sicherheitstechnischen Bewertung und interdisziplinärer Schadensanalyse technischer Systeme und ihrer Komponenten.

Additiven Fertigungsverfahren wird in der digitalen vernetzten Industrieproduktion der Zukunft eine große Rolle beigemessen. Die BAM arbeitet an der Verfahrensentwicklung und Beurteilung additiver Fertigungsverfahren für Metalle. Verschiedene additive Fertigungsverfahren für metallische Werkstoffe werden zur Schaffung eines Verständnisses für die Zusammenhänge zwischen Prozessparametern und resultierenden mechanisch-technologischen Eigenschaften und Defekterscheinungen genutzt. Dadurch soll eine Grundlage für den zukünftigen Einsatz additiv gefertigter Bauteile für sicherheitsrelevante Anwendungen geschaffen werden.

Schweißverbindungen spielen als Fügechnik weiterhin eine Schlüsselrolle im Konstruktions- und Fertigungswesen. Die BAM arbeitet zu dem Einsatz des Laserstrahl- und Laserstrahlhybridschweißverfahrens zum Schweißen von dickwandigen Konstruktionen vor dem Hintergrund der Herstellung qualitätsgerechter Schweißverbindungen. Die Mechanismen der Heißrissentstehung beim Laserstrahlschweißen werden unter dem Aspekt des Zusammenwirkens zwischen dem Werkstoff, der Konstruktion und dem Schweißprozess untersucht. Die Arbeiten zur Heiß- und Kaltrissbildung an Fügeverbindungen und deren Vermeidung konzentrieren sich auf die Quantifizierung von spezifischen Einflussgrößen und auf die Entwicklung von Strategien zur Heißriss- und Kaltrissvermeidung beim Schweißen von Bauteilen. Es erfolgen Untersuchungen zu konstruktiven und werkstofflichen Einflüssen auf das Kaltrissverhalten (Wasserstofftransportverhalten) von innovativen hochfesten Stählen unter Anwendung moderner Heiß- und Kaltrissprüfverfahren. Warmfeste Stähle sind vielfältig eingesetzte Werkstoffe in der Energiebranche und Industrie. Zur Unterdrückung der Rissbildung beim Schweißen von warmfesten Stählen erfolgen Untersuchungen zur Vermeidung von Spannungsrelaxationsrissen unter Einspannung und Simulationen von Wärmeeinflusszonen-Gefügen sowie thermodynamische Berechnungen.

Zur Untersuchung der wasserstoffunterstützten Rissbildung und Risskorrosion in metallischen Strukturwerkstoffen liegt der Fokus auf der Degradation mechanischer Eigenschaften von metallischen Strukturwerkstoffen für sicherheitsrelevante Komponenten durch Wasserstoff während der Fertigung und im Betrieb. Mit Hilfe von Experimenten unter Abbildung realitätsnaher Beanspruchungen lassen sich kritische Bedingungen für die Entstehung wasserstoffunterstützter Risse ermitteln. Über begleitende numerische Simulationen werden die Schädigungsmechanismen erörtert und geeignete Maßnahmen zur Vermeidung der Rissbildung erarbeitet sowie neue Werkstoffe für den Einsatz unter kritischen Bedingungen qualifiziert. Aktuelle Forschungsvorhaben beschäftigen sich mit der zeitlichen Entstehung wasserstoffunterstützter Risse in Schweißnähten von Komponenten für Offshore-Windenergieanlagen sowie mit der Entstehung

wasserstoffunterstützter Risse ausgehend von lokaler Korrosion.

Die Weiterentwicklung der Schweißsimulation zur numerischen und multiphysikalischen Betrachtung von sicherheitsrelevanten Fragestellungen insbesondere im Bereich des Laserstrahlschweißens zur Klärung von Mechanismen der Defektbildung oder deren Prävention ist ein weiterer Forschungsbereich. Aktuelle Arbeiten befassen sich daher mit der Entstehung der Heißrissbildung sowie der Einflussnahme auf das Schmelzbad mittels extern eingebrachter elektromagnetischer Kräfte. Darüber hinaus werden Laserstrahlschweißprozesse mit niedrigem Energieeintrag zum Fügen wärmesensibler metallischer Werkstoffe oder von Mischverbindungen entwickelt und die Nutzung gepulster Laserstrahlquellen hoher Strahlqualität und Technologien zur elektromagnetischen Schmelzbadbeeinflussung zur Reduktion von Schweißnahtdefekten untersucht. Im Bereich der Schweißmetallurgie erfolgen Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Analyse von Nichtgleichgewichtsprozessen und der Ausscheidungskinetik beim Schweißen, insbesondere zur Simulation schweißähnlicher Gefüge, zur Gewinnung von Daten für die Modellierung des Werkstoffverhaltens und zur Erstellung von Zeit-Temperatur-Umwandlungs-Schaubildern.

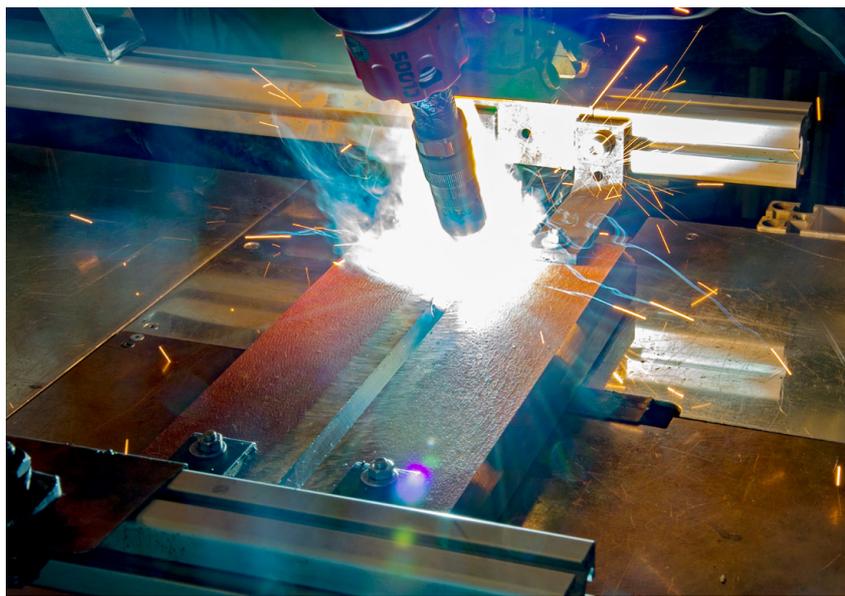
Im Rahmen der Entwicklung adaptiver Metallschutzgas-Schweißprozesse für Dickblechanwendungen werden Strategien zur adaptiven Regelung von Multiparameterprozessen als Basis einer sicheren Prozessführung entwickelt. Die konsequente digitale Vernetzung von Sensorik und Gerätetechnik ermöglicht hierbei das Versuchsdatenmanagement mit Hilfe relationaler Datenbanken. Durch Fusion von Messdaten unterschiedlicher physikalischer Domänen gelingt die Ableitung von Regressionsmodellen durch Einsatz von Methoden der multivariaten Datenanalyse sowie des Maschinenlernens in Form von künstlichen neuronalen Netzwerken. Störgrößen des Prozesses können so in-situ erfasst und ausgeregelt werden, um

Elektromagnetische Schmelzbadunterstützung beim Laserstrahlhybridschweißen

sichere und qualitätsgerechte Schweißverbindungen im Dickblechbereich zu gewährleisten. Die Methodik lässt sich ebenfalls auf drahtbasierte generativ gefertigte Proben mittels Lichtbogen übertragen.

Der Forschungsschwerpunkt im Bereich Eigenspannungsanalyse besteht in der Analyse von schweißbedingten Eigenspannungen unter realistischen Einspannbedingungen. Dabei erfolgt die mobile Messung lokaler Eigenspannungsprofile an Bauteilen mit der Röntgendiffraktion und inkrementellen Bohrlochmethode. Im Mittelpunkt der Forschungsarbeiten zur Prüfung und Bewertung von geschweißten Komponenten steht die Weiterentwicklung und Anwendung realitätsnaher Prüfverfahren, die als Teil einer geschlossenen Prüfkette die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf real gefügte Bauteile sicherstellen.

Die Prüfung von Werkstoffen und Bauteilen erfordert eine permanente Weiterentwicklung. Daher werden an der BAM Werkstoffprüfmethoden und Methoden für die Bauteilprüfung und -bewertung bei monotoner und zyklischer mechanischer Belastung entwickelt, insbesondere für die bruchmechanische Charakterisierung von Gusswerkstoffen und zur Ermittlung der Betriebsfestigkeit von dünnen Kupferblechen und kleinen Proben aus dünnen Bauteilen. Darüber hinaus erfolgen Untersuchungen im Bereich der interdisziplinären Schadensanalyse, speziell Untersuchungen von Bruchflächen auf Bruchmechanismen (Fraktographie) und zur Analyse von Werkstoffgefügen (materialographische Untersuchungen).



©BAM

Zur Untersuchung des Werkstoff- und Lebensdauerhaltens von Konstruktionswerkstoffen werden zuverlässige Verformungs- und Schädigungsmodelle zur Beanspruchungsanalyse mit kommerziellen Finite-Element-Programmen entwickelt und das Risswachstum unter Ermüdungsbeanspruchung und bei hoher Temperatur numerisch simuliert. Darüber hinaus erfolgen Untersuchungen zur Risscharakterisierung mittels inhomogener Erwärmung und Thermografie. Vertikal oder schräg zur Oberfläche verlaufende Risse, die entweder zur Oberfläche hin offen sind oder dicht unter der Oberfläche liegen, können mit der Laserthermografie geortet und charakterisiert werden. Dazu wird ein Laserspot oder eine Laserlinie über die Bauteiloberfläche gescannt. Risse behindern den lateralen Wärmefluss und Risskanten erwärmen sich stärker als die ungestörte Umgebung.

Degradation von Werkstoffen und Materialien

Die Degradation von Werkstoffen und Materialien hat sowohl eine volkswirtschaftliche als auch eine sicherheitstechnische Komponente. Durch die Einführung von neuen Werkstoffen und Multimaterialsystemen sowie die Verschiedenartigkeit der Einsatz- und Nutzungsbedingungen daraus hergestellter Komponenten sind deren Degradations- und Schädigungsmechanismen noch nicht ausreichend erforscht. Die BAM untersucht kombinierte mechanische, thermische und korrosive Beanspruchungen neuer Werkstoffe oder bekannter Werkstoffe unter

neuen Einsatzbedingungen aus den Bereichen Metalle, Keramik und Polymere und deren Verbunden.

Glasig-kristalline Werkstoffe und Bauteile unterliegen komplexen Degradationsmechanismen. Diese Effekte sind insbesondere für Werkstoffverbunde unter Anwendungsbedingungen wenig erforscht. Das erfordert die Untersuchung grundlegender Degradationsphänomene an Grenz- und Oberflächen wie z.B. dem unterkritischen Risswachstum in Gläsern, der Oberflächenentglasung und grenzflächeninitiiert Porenbildung.

Die Hochtemperaturkorrosion und Alterung von Werkstoffen in Gasen wird anhand der Auslagerung von Keramiken oder metallischen Legierungen in multikomponentigen Gasen bis 1100 °C und bis 300 bar untersucht. Neben der Korrelation des Materialverlustes und der Gefügeänderung des Materials mit den Korrosionsbedingungen und thermodynamischen Modellrechnungen erfolgt auch die vergleichende Beurteilung der Beständigkeit unterschiedlicher Werkstoffe.

Zur Integritätsbewertung von Bauteilen für Automobil- und Energieanwendungen werden experimentelle Untersuchungen und numerische Simulationen des Deformations-, Schädigungs- und Versagensverhaltens von Werkstoffen für Verkehrsanwendungen unter komplexen thermisch-mechanischen Beanspruchungen durchgeführt. Der Fokus liegt auf metallischen Hochtemperaturwerkstoffen wie z. B. warmfesten ferritischen und austenitischen Gusseisenwerkstoffen.

Reibungsminderung ist ein Beitrag zur Energieeffizienz und wird durch alternative Schmierstoffe und Beschichtungen, wie auch neue Werkstoffe, erzielt. Die BAM entwickelt daher Modelle und Softwaretools zur Untersuchung der Reibungsminderung in geschmierten und ungeschmierten Tribosystemen und reduziert so in der tribologischen Prüfkette die Abstraktionsebenen und verkürzt die Entwicklungskaskaden. Mit der Verschiebung der Belastungsgrenzen eröffnen sich Perspektiven



©BAM

*Probeentnahme und
Messung in einem Parkhaus*

zum Leichtbau durch höhere Belastungen bei derselben Geometrie oder Konstruktionen mit geringerem Gewicht/Materialeinsatz bei gleicher Beanspruchung. Dies erfordert zuvor die Bereitstellung entsprechender tribologischer Prüftechnik bei Extrembeanspruchungen in Last und Temperatur, die an der BAM entwickelt wird.

Zur Untersuchung der Degradation von Polymeren unter Anwendungsbedingungen und Bewertung für die Zulassung werden Kunststoffe verschiedenen aggressiven Medien (Kraftstoffe, Pflanzenschutzmittel etc.) ausgesetzt und durch dynamische Versuche und Zeitstandsversuche charakterisiert. Mit zeitraffenden Methoden wird das Alterungsverhalten untersucht sowie die Gehalte an Stabilisatoren ermittelt.

Infolge der Alterung von Kunststoffen auf molekularer Ebene verändern sich verschiedene Eigenschaften und verschiedene Funktionalitäten in nicht vorher bekannter und berechenbarer Weise. Empirische Versuche zur Witterungsbeständigkeit von Polymeren durch künstliche Bewitterung stellen eine in allen Parametern kontrollierbare und wiederholbare Beanspruchung dar und werden zur systematischen Untersuchung der Alterung von sicherheitsrelevanten Eigenschaftsprofilen eingesetzt. Makromoleküle wie Polymere und Copolymere und deren Degradationsprodukte werden hinsichtlich ihrer molekularen und chemischen Heterogenität mittels flüssigchromatographischer, spektroskopischer und massenspektrometrischer Verfahren und entsprechender Methodenkopplungen charakterisiert. Zur Untersuchung von Schädigungsmechanismen auf der Mikroskala in Polymeren und Faserverbundwerkstoffen mit Hochleistungs-Verstärkungsfasern werden sowohl mechanische Prüfungen an isolierten Teilsystemen als auch Versuche an Verbundwerkstoffen nach Dauer-Wechselbeanspruchung vorgenommen.

Im Vergleich zur makroskopischen Korrosion, die einen vorhersehbaren Verlauf hat, führen lokale Korrosionsprozesse, wie z.B. Lochfraß oder Spaltkorrosion, zu hohen und unberechenbaren Sicherheitsrisiken. Die Entwicklung hochauflösender Methoden zur Korrosionsanalytik soll dazu dienen, die initialen Phasen der lokalen Korrosionsprozesse zu detektieren, um diese mit der chemischen Umgebung und Mikrostruktur der Probe zu korrelieren. Für die Charakterisierung von 2D- und 3D-Materialien mit dem Fokus auf die Oberflächenchemie bzw. Funktionsgruppen und deren Alterung, die auf typische Korrosionsparameter wie z.B. pH oder die Freisetzung anderer korrosionsrelevanter Analyte rea-

gieren werden multimodale, abspaltbare und stimulisensitive optische Sonden erforscht und entwickelt. Für die Qualitätssicherung funktionalisierter Oberflächen in komplexen Schichtsystemen und Multi-Material-Kompositen ist die Bildgebung auf der Mikro- und Nanoskala zur Erkennung und Trennung von geschädigten und ungeschädigten Bereichen unverzichtbar, um schnell zuverlässige Aussagen zur lateralen bzw. vertikalen Lokalisierung von Unvollkommenheiten, Fehlstellen, Beanspruchungen als Versagensursache zu erhalten.

Zum Nachweis und zur Bildgebung von Wasserstoff in metallischen Mikrostrukturen werden neue 2D- und 3D-Analyseverfahren entwickelt, wobei durch verschiedene Verfahren gewonnene Daten mit neuen Methoden fusioniert werden. Diese Entwicklungen dienen dem sicheren Einsatz von metallischen Hochleistungswerkstoffen, bei denen die wasserstoffinduzierte Degradation ein aktuelles Forschungsthema ist.

In der technischen Anwendung werden Materialien oft gekoppelten Belastungen ausgesetzt, die mit experimentellen Methoden schwer zu simulieren sind. Für die Analyse der Ober- und Grenzflächenstabilität unter gekoppelter korrosiver und mechanischer Belastung erfolgt die Methodenentwicklung mittels Raster-Kraft-Mikroskopie, um Degradationsmechanismen und die Stabilität von Materialien und deren Grenzflächen durch in situ Untersuchungen besser zu verstehen.

Die grundlegende Klärung von Schädigungsmechanismen auf der Mikro- und Nanoebene unter Berücksichtigung von Zusammensetzung, Gefüge und Umgebungsbedingungen ermöglicht eine gezielte Entwicklung von Vermeidungsstrategien. Im Fokus steht derzeit aufgrund ihrer Bedeutung für die bauliche Infrastruktur die Untersuchung der Schädigungsmechanismen und Schutzmaßnahmen bei der Betonschädigung durch die Alkali-Kieselsäure-Reaktion. Vor allem mit elektrischen, elektromagnetischen und spektroskopischen Verfahren wird zerstörungsfrei (oder zumindest minimalinvasiv) die Stoffzusammensetzung und die Materialstruktur von Baustoffen sowie das Transportverhalten von Wasser und Schadstoffen in Baustoffen untersucht und Materialparameter ermittelt. Der Aufgabenfokus liegt auf der Grundlagenforschung und der Verfahrensentwicklung.

Mittels in situ Computertomographie werden mikro-mechanische Eigenschaften und die Schädigungsentwicklung in verschiedenen Werkstoffen als Funktion

äußerer Beanspruchungen wie z. B. mechanischen Lasten, Temperatur oder chemisch-physikalischen Einflussparametern untersucht. Im Fokus stehen Verbundwerkstoffe, Beton und additiv gefertigte Legierungen. Zur Untersuchung von Schädigungsmechanismen, Defektverteilung und Mikrostruktur in verschiedenen strukturierten Werkstoffklassen, insbesondere Verbundwerkstoffen, Keramiken und Legierungen werden Röntgenrefraktionstechniken (im Labor und am Synchrotron) verwendet. Zur einseitigen zerstörungsfreien Prüfung von Leichtbauteilen und Dielektrika werden Verfahren und Technologien der radiologischen Rückstreutechnik entwickelt und angewendet.

Im Bereich der optischen Detektionsmethoden werden Standards und potenzielle Referenzmaterialien sowie Validierungs- und Rückführungskonzepte für die Anwendung in der Bio- und Materialanalytik und für die Charakterisierung von Materialien und deren Alterung erforscht und entwickelt. Die Materialcharakterisierung mittels faseroptischer Sensorik mit der Applikation und der Integration faseroptischer Sensoren in Werkstoffen und Strukturen (z.B. in Kompositen, Beton, technischen Textilien) im Hinblick auf die Schadensfrüherkennung und -lokalisierung bzw. für die Strukturüberwachung (Structural Health Monitoring) wird weiterentwickelt. In Betracht kommen sowohl verteilte als auch punktuell-messende Sensoren auf Basis optischer Glas- und Polymerfasern.

Die aktive Thermografie mit flächiger optischer Anregung, z. B. mit Blitzlampen, Halogenlampen und Infrarotstrahlern, eignet sich sehr gut zur Prüfung von dünnen Faserverbundwerkstoffen. Impaktschäden, Delaminationen und weitere Inhomogenitäten können je nach Dicke des Materials entweder durch eine einseitige Reflexionsmessung von der Vorderseite oder durch eine beidseitige Prüfung nachgewiesen werden. Aktive Thermografieverfahren zur Charakterisierung von Faserverbundwerkstoffen werden an der BAM validiert.

Die systematische Betrachtung von Schadensfällen gewährleistet das frühzeitige Erkennen von Problemfeldern, welche die technische Sicherheit gefährden können. Aufbauend auf der systematischen Untersuchung korrosionsbedingter Schäden wird der aktuelle Forschungsbedarf ermittelt, werden Probleme bei der Anwendung des aktuellen Regelwerkes erkannt und der Handlungsbedarf für die Normungs- und Regelungsarbeit abgeleitet.

Materialien und Stoffe

Die BAM leistet einen signifikanten Beitrag zur Erhebung von Materialdaten, indem sie unter Berücksichtigung theoretischer und praktischer Aspekte die Struktur und das Verhalten von Materialien und Stoffen untersucht und bewertet. Unmittelbarer Nutzen der Ergebnisse ist es, die Sicherheit im Umgang mit gefährlichen Stoffen zu gewährleisten sowie den sicheren und zuverlässigen Einsatz innovativer Materialien (z. B. Verbund- und Hochtemperaturwerkstoffe, Nanomaterialien) und Fertigungsverfahren (z. B. additive Fertigung, Leichtbau) zu ermöglichen. Die Material- und Stoffcharakterisierung basiert auf modernsten, zum Teil unikalen Untersuchungsverfahren, die von der Nano- bis zur Makroskala reichen. Im Rahmen eigener Forschungsaktivitäten werden die Verfahren ständig verbessert und bedarfsorientiert neu- bzw. weiterentwickelt. Im Aktivitätsfeld Materialien und Stoffe sind Forschungsarbeiten aus vielen Bereichen gebündelt.

Die Prüfverfahren für die Einstufung von Gefahrstoffen/-gütern werden ständig weiterentwickelt und validiert, um weltweit eine einheitliche Einstufung von Stoffen und Gütern zu gewährleisten. Aufgrund von Unfällen und Regelungslücken müssen neue oder geänderte Prüfverfahren entwickelt bzw. weiterentwickelt werden. Zur Untersuchung der Wirkung bei der Explosion und Umsetzung von Explosivstoffen und Pyrotechnik werden Reaktionsphänomene bei der Umsetzung pyrotechnischer Gegenstände betrachtet und Methoden zur normierten Bestimmung von wesentlichen Reaktionsparametern wie Druck- und Stoßenergien sowie der Reaktionswärme entwickelt. Im Rahmen der Durchführung des Konformitätsverfahrens für Explosivstoffe und Pyrotechnik werden Schutzzonenbetrachtungen für die Reaktion pyrotechnischer Gegenstände erstellt und Methoden zur Bestimmung von Leistungsparametern pyrotechnischer Gegenstände als Basis für die Bestimmung von Schutz- und Sicherheitsabständen und zur abstandsbezogenen Gefährdungsbewertung auf Basis der kinetischen Energien und des Wärmehaltes von Reststücken entwickelt.

Zur Ermittlung sicherheitstechnischer Kenngrößen von Gasen wird ein Bestimmungsverfahren für Explosionskenngrößen von Gas-Staub-Gemischen entwickelt und für die Normung vorbereitet. Diese Gemische spielen im Explosionsschutz von Prozessanlagen eine wichtige Rolle. Im Bereich der Zündvorgänge und des

Brandverhaltens von Materialien in Kontakt mit Sauerstoff wird zur Untersuchung des Zündverhaltens von Materialien im Kontakt mit Hochdrucksauerstoff eine neuartige unikale Prüfeinrichtung für Druckstöße bis 750 bar entwickelt. Damit wird es erstmals möglich sein, Materialuntersuchungen für industrielle Sauerstoffanlagen im Höchstdruckbereich vorzunehmen.

Die Funktionssicherheit von Beschichtungen, Klebungen und Materialverbunden wird von der Integrität der Materialgrenzflächen bestimmt. Mit der Zentrifugentechnologie wird ein neuartiges Mehr-Proben-Prüfverfahren entwickelt, das Festigkeiten auf statistischer Basis bestimmt und die Aufklärung von Versagensursachen und -mechanismen ermöglicht.

Funktionalisierte Oberflächen bestehen aus Mehr- und Vielschichtsystemen, wobei enge Toleranzbänder für die Schichtdicke, die Mikrostruktur, die Stöchiometrie und die Morphologie abhängig vom Substrat, vom Beschichtungsprozess und von der Applikation zu validieren bzw. zu garantieren sind. Durch Oberflächenmodifizierung werden Schutzfunktionen mit neuen Eigenschaftsprofilen über Grenzflächen-Design und Material-Engineering entwickelt.

Im Bereich der Elastomere werden Untersuchungen der Alterung von Elastomeren sowie zum Einsatz von Graphen in verschiedenen Elastomeren durchgeführt. Daneben werden elastomere Referenzmaterialien an den aktuellen Bedarf angepasst.

Zur dynamischen Ermittlung von Materialkonstanten (Split-Hopkinson-Pressure-Bar) wird die instrumentierte Eindringprüfung zur Bestimmung der Martenshärte und anderer Werkstoffparameter, als Referenzmessverfahren und zur zerstörungsarmen Bestimmung lokaler Festigkeiten und lokaler Spannungs-Dehnungskurven genutzt. Hochdynamische Werkstoffbeanspruchungen werden mittels Split-Hopkinson-Stab untersucht.

Zur Bestimmung von werkstoffmechanischen Kennwerten wie z. B. Härte, E-Modul, Streckgrenze, Zugfestigkeit, Ermüdungslebensdauer oder Zeitstandfestigkeit an überwiegend metallischen Werkstoffen bei Raumtemperatur und/oder hoher Temperatur bis 1200°C werden experimentelle Methoden zur Ermittlung des Deformations-, Schädigungs- und Versagensverhaltens von Werkstoffen unter komplexer thermisch-mechanischer Beanspruchung weiterentwickelt. Zur Bewertung der werkstoffmechanischen Kennwerte von Polymeren und Faserverbundwerkstoffen werden mechanische Prüfungen an verstärkten und unverstärkten Kunststoffen unter Zug-, Biege-, oder Torsionsbelastung unter verschiedenen Randbedingungen wie beispielweise Temperatur, Faserorientierung oder Belastungsgeschwindigkeiten durchgeführt. Die chemische und kristallographische Elektronenstrahlmikroanalyse von Werkstoffen bis in den Nanobereich sowie von Nanopartikeln zur Untersuchung



*Befüllung der Kugelmühle -
Erforschung von kristallinen
Strukturen*

©BAM

der Element- und Phasenverteilung, Phasenidentifikation und Gefügeanalytik mittels Elektronenmikroskopie und Mikrosonde wird weiterentwickelt.

Die Mikrostruktur additiv gefertigter Komponenten wird hinsichtlich Poren, Korngrößen, Risse, etc. charakterisiert. Diese multiskalige Charakterisierung umfasst das Pulver oder das Halbzeug, wie z.B. Drähte, ideale Proben und industrielle Komponenten. Neutronen- und Synchrotronbeugung wird für die Bestimmung von Eigenspannungen in Komponenten, insbesondere von additiv gefertigten Bauteilen weiterentwickelt. Die mikromechanischen Eigenschaften multiphasiger Werkstoffe werden durch eine Kombination dieser Verfahren und Modelle validiert.

Mittels aktiver Thermografieverfahren zur in-situ und ex-situ Werkstoffcharakterisierung werden die thermischen Materialeigenschaften (Temperaturleitfähigkeit, Wärmeleitfähigkeit) und deren Anisotropien experimentell ermittelt. Bei bekannten Materialeigenschaften können alternativ die Schichtdicke, die Haftung auf Untergründen oder Lage und Tiefe von Einschlüssen bestimmt werden. Es werden auch prozessbedingte orts- und zeitabhängige Wärmeflüsse ausgenutzt, wie z. B. beim Schweißen und in der additiven Fertigung.

Für die additive Fertigung von Keramik werden Werkstoffsysteme, wie z.B. Aluminiumoxid, Siliciumcarbid oder Siliciumnitrid, und 3D-Druckprozesse für Hochleistungskeramik entwickelt. Dazu werden keramische Zwischenerzeugnisse wie Pulver und Schlicker für eine optimale Eignung als Feedstock im 3D-Druckprozess angepasst. Zur Entwicklung und Bewertung von keramischen Biowerkstoffen für Implantate werden Untersuchungen zur mechanischen Festigkeit und Löslichkeit von biokeramischen Werkstoffen wie resorbierbaren Knochenersatzwerkstoffen auf Basis von Calciumphosphaten und Alkali-Calciumphosphaten sowie Wollastonit/Apatit Glaskeramiken durchgeführt.

Im Fokus der Forschung an Hochleistungskeramik steht die Methodenentwicklung für die elektrische und dielektrische Charakterisierung. Die Degradation und das Versagen von Funktionswerkstoffen und Schichtverbunden unter elektrischer bzw. elektromechanischer Belastung werden durch Weiterentwicklung von Prüfverfahren, Implementierung von Modellierungsansätzen, in-situ Untersuchung von Schadensverläufen, Lebensdaueruntersuchungen sowie Werkstoffanalytik am geschädigten Prüfkörper/Bauteil erforscht.

Der Einsatz und die Herstellung bei hohen Temperaturen beeinflussen maßgeblich das Gefüge, die Materialeigenschaften sowie Defekte von Werkstoffen und Bauteilen. Zur Bewertung und komplexen thermischen Charakterisierung von glasigen, keramischen und metallischen Werkstoffen erfolgt der Einsatz und die Weiterentwicklung vielfältiger thermischer Verfahren.

Im Bereich der Laser-Materialbearbeitung werden zeitabhängige Materialparameter und Wechselwirkungen im Femtosekundenbereich für eine verbesserte Prozesskontrolle untersucht. Die berührungslose Reinigung und Dekontamination von Kulturgütern auf organischer Basis (Holz, Papier, Pergament, Textil) wird ebenfalls in diesem Kontext an Modellobjekten und mobilem Kulturgut durchgeführt. Begleitet werden die Arbeiten von der Bewertung des sekundären Gefährdungspotentials der Lasermaterialbearbeitung durch Röntgenemission.

Die Leistungsfähigkeit zementgebundener Baustoffe kann durch Zugabe geeigneter Fasern verbessert werden. Im Fokus der Entwicklung und Erprobung innovativer Baustoffe stehen Untersuchungen zur Wirkung verschiedenster (Mikro-)Fasern auf die Zugfestigkeit und Verformung sowie deren Ursachenklärung z.B. im Falle der gezielten Verbesserung des Verbundes und Schutzes gegen Abplatzungen im Brandfall. Die Entwicklung, Charakterisierung und Verwendung neuer umweltfreundlicher Bindemitteltypen (z.B. Geopolymere) im Bereich der Zementherstellung, die im Hinblick auf ihren CO₂-Fußabdruck, die Nachhaltigkeit und Dauerhaftigkeit Vorteile gegenüber den überwiegend portlandzementbasierten Bindemitteln der Gegenwart besitzen, ist ein Kernthema, da die Portlandzementherstellung ca. 5 % der weltweiten, jährlichen Gesamtemission an CO₂ ausmacht.

Die Material- und Strukturcharakterisierung von Materialien und Bauteilen liefert wichtige Informationen über deren Zuverlässigkeit und Lebensdauerverhalten. Hierzu werden hochauflösende akustische und magnetische Verfahren entwickelt, mit denen z.B. additiv gefertigte Bauteile oder Faserverbundstrukturen zerstörungsfrei analysiert werden können. Für spezielle Anwendungen werden Metamaterialien mit optimierten akustischen und mechanischen Eigenschaften entwickelt, die so in der Natur nicht vorkommen.

Bei der Mechanochemie werden Feststoffe durch die Einwirkung mechanische Energie, die durch Kol-

lision mit Mahlkugeln erzeugt wird, zur Reaktion gebracht, um organische, metall-organische und anorganische Verbindungen zu synthetisieren. An der BAM werden die zugrundeliegenden Mechanismen von mechanochemischen Synthesen durch die Kopplung analytischer Methoden in Echtzeit untersucht. Dadurch können Informationen über den kristallinen, molekularen und thermischen Zustand während des Mahlvorgangs erhalten werden.

Nanoskalige Materialien und deren Eigenschaften

Nanoskalige Materialien besitzen Eigenschaften, die sich stark von denen makroskopischer Festkörper unterscheiden. Schwerpunkte der BAM bei der genauen Charakterisierung von Nanomaterialien sind die Bestimmung von Größe und Größenverteilung, Form und Morphologie, der spezifischen Oberfläche sowie der chemischen Zusammensetzung und Oberflächenchemie von Nanopartikeln. Die BAM entwickelt und vertreibt Nano-Referenzmaterialien, stellt Referenzdaten bereit und erforscht Verfahren der Nanotechnologie, die durch das gezielte Ausnutzen der spezifischen Eigenschaften nanoskaliger Materialien neue technologische Entwicklungen erlauben. Die BAM untersucht auch gezielt die Gefährdungspotentiale und prüft die sichere Verwendung von Nanomaterialien durch den Nachweis in der Umwelt, die Betrachtung von Emissionen, der Alterung und der biologischen Wirkung.

Die Analytik von Nanopartikeln (1 bis 100 nm) sowohl in Bezug auf die Abmessungen als auch die chemische Charakterisierung mit den Verfahren REM/EDX und XPS, AES, SIMS wird weiterentwickelt, um die Auflösung und Nachweisgrenzen zu verbessern und neue Quantifizierungsmethoden zu entwickeln. Die Anwendungen sind Nanopartikel mit Kern-Schale-Struktur und nicht-sphärischen Geometrien. Zur Granulometrie und Suspensionscharakterisierung an Mikro- und Nanopartikeln werden alternative Messverfahren wie z.B. die dynamische Lichtstreuung, fotoanalytische Zentrifugation und Ultraschall-Spektroskopie für die Partikelgrößenbestimmung von Nanopulvern unter besonderer Berücksichtigung des Einflusses der Dispergierung auf die Messergebnisse untersucht und bewertet. Das zur Identifizierung von Nanomaterialien gemäß EC recommendation 2011/696 vorgeschlagene Screening-Verfahren „Volume-specific

surface area (VSSA)“ wird verifiziert und die Entwicklung von Referenzmaterialien fortgeführt.

Die BAM forscht zu Strukturierungen von nanoskaligen Oberflächen hinsichtlich ihrer Geometrie, aber auch ihrer chemischen Zusammensetzung mit Elektronenstrahlmethoden oder Rasterkraftmikroskopie. Die dreidimensionale Lithographie mit nanoskaligen Additiven mittels Zweiphotonen-Polymerisation wird neben der kundenorientierten Herstellung von Strukturen für die Forschung hinsichtlich der Realisierung von anisotropen Eigenschaften wie Magnetismus oder Piezoaktivität in sub-mikroskopischen Polymerstrukturen verwendet.

Die Entwicklung und Validierung von bildgebenden Hybrid-Mikroskopieverfahren inklusive hyperspektraler Verfahren konzentriert sich auf die Kombination von Raman-Mikrospektroskopie, Elektronenmikroskopie und/oder Rasterkraftmikroskopie mit elektrischer Leitfähigkeit oder Photoleitfähigkeit. So können beispielsweise die Bestimmung des E-Moduls von Nanofasern und Kohlenstoff-Nanoröhren untersucht werden.



3.5 Themenfeld Analytical Sciences

Analytical Sciences sind eine Schlüsseltechnologie für die Lösung von grundlegenden und angewandten Problemstellungen an der Schnittstelle zwischen Chemie, Physik, Biologie und den Materialwissenschaften. Sie liefern Informationen über die Eigenschaften, das Verhalten und die Zusammensetzung von Materie in Raum und Zeit. Die BAM verfügt seit Jahrzehnten über eine ausgewiesene Kompetenz in diesem Querschnittsthema und setzt ihre Erkenntnisse in allen Applikationsfeldern ein.

Spurenanalytik und chemische Zusammensetzung

Die BAM entwickelt eine breite Palette an Methoden, Erkennungsstrukturen und Geräten zur chemischen Charakterisierung von Stoffen, Stoffgemischen und

Proben aus ganz unterschiedlichen Anwendungsfeldern. Im Bereich Chemische Zusammensetzung und Spurenanalytik beraten wir zu allen Fragen der Zuverlässigkeit, Richtigkeit und Präzision chemischer Analyseverfahren sowie zur Qualitätssicherung und -kontrolle in chemisch-analytischen Laboratorien. Hauptaufgaben sind die Entwicklung und Bewertung zuverlässiger Verfahren zur chemischen Analyse von Boden, Wasser und Abfall, die Entwicklung und Herstellung von Referenzverfahren und -materialien für den Umwelt- und Verbraucherschutz sowie die Materialanalytik.

Die BAM entwickelt neue Referenzmethoden und Referenzmaterialien für die Ultraspuren- und Isotopenanalyse und entwickelt und produziert gemeinsam mit der PTB und dem „European Directorate for the Quality of Medicines & Health Care (EDQM)“ primäre nationale Standards für die anorganische



©BAM

Spurenanalyse. Für die Qualitätssicherung der Analytik fast aller Peptide oder Proteine gibt es keine Referenzmaterialien. Daher ist die Entwicklung neuer Methoden zur Proteinquantifizierung notwendig.

Massenspektrometrische Verfahren (Target-, Non-Target und Suspected-Target-Screening) werden für umweltanalytische Fragestellungen entwickelt. Insbesondere Metaboliten, sowie Abbau- und Transformationsprodukte von Schadstoffen sind hier die Targets. Als Techniken werden die LC-MS/(MS) als auch die GC-MS/(MS) angewendet, auch als hochauflösende Massenspektrometrie. Im Bereich des non-Target Screenings von Umwelt- und Lebensmittelmatrices für Authentizitätsstudien und zur Identifizierung von Transformationsprodukten bildet die Anwendung hochauflösender Massenspektrometrie einen Schwerpunkt. Ziel ist es, analytische Methoden und Referenzmaterialien für Produktidentität/-konformität, Herkunftsnachweis und Nachhaltigkeit zu entwickeln. Darüber hinaus werden Ionisationsquellen und -techniken unter Atmosphärendruck für die analytische Massenspektrometrie zur empfindlichen Hochdurchsatzanalytik unmittelbar aus komplexen Matrices entwickelt. Basierend auf einer Kopplung der Laser Ablation mit der ICP-Massenspektrometrie, die eine quantitative Bildgebung von Elementverteilungen im Sub-Mikrometer-Maßstab ermöglicht, wird ein neues Elementmikroskop für die Bildgebung von Einzelzellen entwickelt.

Zur selektiven Anreicherung von Analyten durch Affinitätschromatographie in flüssigchromatographischen Systemen werden monolithische Säulen auf der Basis von polymeren oder keramischen Materialien neu entwickelt. Da Antikörper als Affinitätsreagenzien sehr teuer und nicht langzeitstabil sind, werden Antikörpersurrogate wie Peptidaptamere entwickelt, die in der Bioanalytik und Biotechnologie Einsatz finden.

*Gaschromatograph mit
massenselektivem Detektor
zur Analyse*

Zur Charakterisierung von umweltinduzierten Veränderungen historischer Materialien durch Korrosions- und Alterungsmechanismen an Kulturgut werden minimal-invasive Untersuchungen zur Aufklärung der Mechanismen durchgeführt, um den dauerhaften Erhalt unseres kulturellen Erbes zu ermöglichen.

Oberflächen- und Grenzflächenanalytik

Im Bereich Oberflächen- und Grenzflächenanalytik steht die Validierung und Weiterentwicklung von Charakterisierungsmethoden im Vordergrund. Die Analytik von Schichten (0,5 nm - 50 µm), Ober- und Grenzflächen (Informationstiefe 1 nm bis 50 µm) mit den Verfahren REM/EDX und XPS, AES, SIMS wird in Bezug auf die Verbesserung von Auflösung und Nachweisgrenzen, der Entwicklung neuer Quantifizierungsmethoden und der Datenfusion weiterentwickelt. Die Anwendungen sind funktionale Oberflächen für fortgeschrittene Technologien und deren sicherer Einsatz. Erfolgreiche Methodenentwicklungen für die Verfahren XPS, AES, SIMS und REM/EDX werden metrologisch durch die Aufstellung von vollständigen Messunsicherheitsbudgets aufgearbeitet, in internationalen Ringversuchen validiert und durch Standardisierung durch DIN, CEN und ISO Normungskomitees den Zielgruppen zu Verfügung gestellt.

Für die in situ Grenzflächenanalytik werden spektroelektrochemische Methoden (FTIR, Raman, XANES) bezüglich der Ober- und Grenzflächensensitivität weiterentwickelt und neue Modellsysteme entwickelt, um die Methoden bezüglich Informationstiefe und spektraler Auflösung besser zu charakterisieren. Im Bereich der Sicherheit und Zuverlässigkeit von mechanischen, optischen und chemischen Funktionen von Bauteiloberflächen stehen mit Blick auf die Produkte nicht Material- sondern Systemkenngrößen im Fokus, die bei sachgemäßem Gebrauch im spezifizierten Anforderungsprofil über die Lebensdauer zu garantieren sind. Kurzzeitige Extrembeanspruchungen, bedingt durch intrinsische Fehlstellen, extrinsische Verunreinigungen oder Überlastzustände, können zum Bauteilversagen führen. Der zuverlässige Betrieb von Komponenten, die zumeist ungeschmiert betrieben werden müssen, in alternativen Kraftstoffen und in Heißdampf zur Rekuperation muss gewährleistet werden, damit die Energieträger eine Anwendungschance erhalten. Die BAM führt hierfür tribologische Untersuchungen in den Medien der alternativen Energieträger

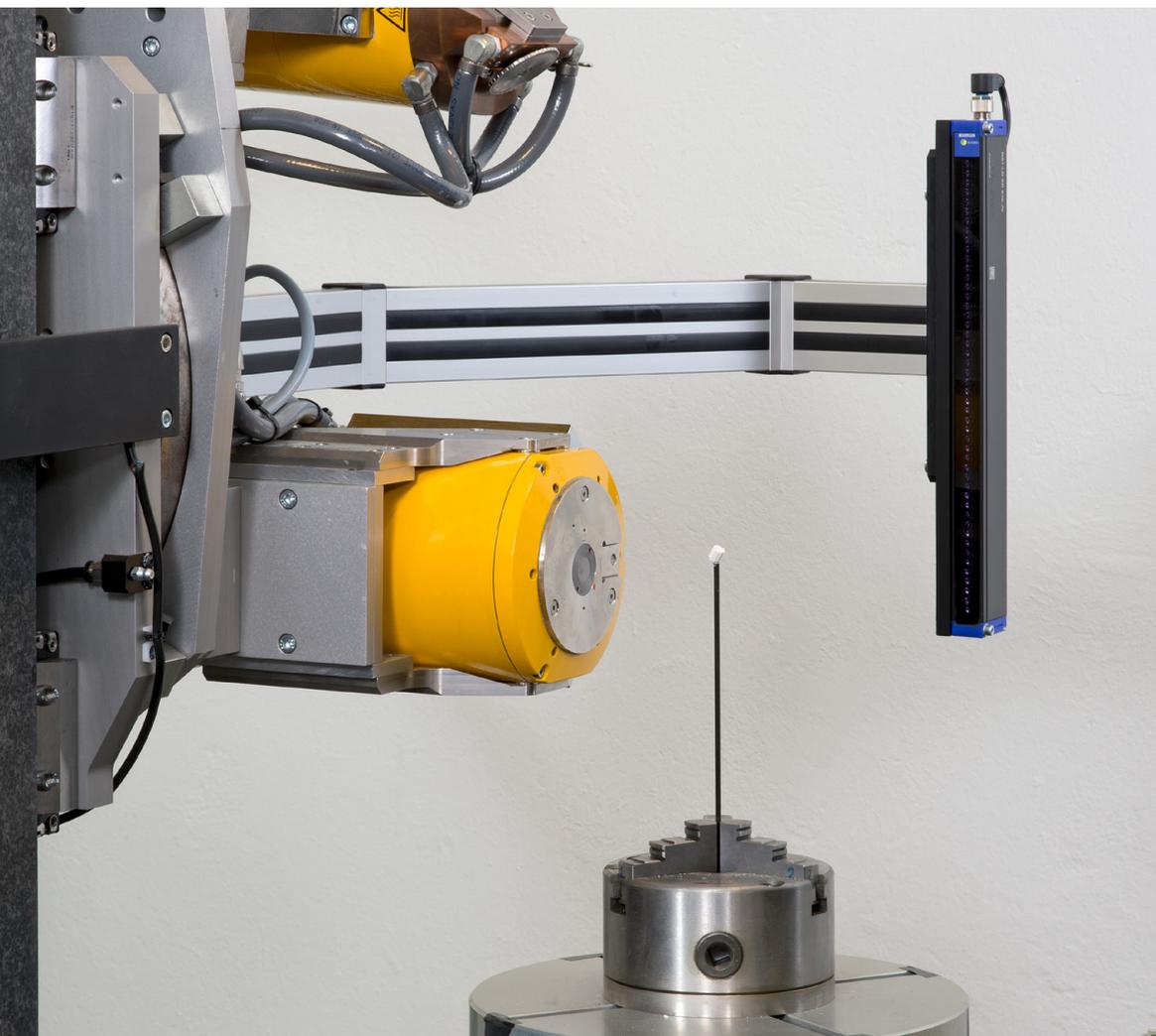
wie Wasserstoff, Methan und Heißdampf durch. Zur Untersuchung der Stabilität und Alterung heterogener Kunststoffmaterialien werden Polymere mit Additiven und verstärkenden Füllstoffen hinsichtlich ihrer Wirk- und Abbau-Mechanismen mittels physikalisch-chemischer Verfahren charakterisiert. Dies reicht von der Analyse und der Problematik des Mikroplastiks bis hin zu Strategien für ein verbessertes, anwendungsorientiertes Recycling von Kunststoffen.

Zerstörungsfreie Prüfung und Spektroskopie

Eine Kernkompetenz der BAM ist die zerstörungsfreie Prüfung und Spektroskopie für die Zustandsüberwachung und die Erfassung von beginnendem Materialversagen oder Prozesskenngrößen. Gerade spektroskopische Techniken eignen sich zum Beispiel für

Messungen im laufenden Betrieb oder von einzigartigen Objekten wie bedeutenden Kunst- und Kulturgütern.

Zur experimentellen Struktur- und Bauteilanalyse sowie zerstörungsfreier Prüfung werden optische Messverfahren zur Bestimmung mechanischer, geometrischer und kinematischer Kenngrößen im Rahmen der 3D-Beanspruchungsanalyse von Materialien und Komponenten angewendet und weiterentwickelt. Bildkorrelationsverfahren werden verwendet, um Objekte und deren Verformungsprozesse zu digitalisieren. Zur hochauflösenden, quantitativen Prüfung und Charakterisierung von dickwandigen Proben, Komponenten und Konstruktionen werden Verfahren und Technologien für die 3D-Hochenergie-Durchstrahlungsprüfung entwickelt und angewendet. Die BAM entwickelt und nutzt Verfahren und Technologien der stationären und mobilen Laminographie und Computertomographie zur quantitativen 3D-Durchstrahlungsprüfung



Röntgencomputertomograph mit Keramikprobe zur 3D-Charakterisierung von additiv gefertigten Teilen

©BAM

von komplexen Komponenten und Konstruktionen. Mittels 3D-Röntgenmikroskopie untersucht die BAM die Mikrostruktur von neuen Materialien.

Für die zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen als Voraussetzung für die nationale und internationale Normung, Zertifizierung und Ausbildung werden neue Referenzobjekte entwickelt und Kunden und Partnern Anleitungen oder fertige Objekte zur Verfügung gestellt. Zudem erfolgen methodenübergreifend Datenanalysen.

Übergreifend wird die Zuverlässigkeit zerstörungsfreier Prüfsysteme analysiert und quantifiziert sowie stochastisch auftretende sicherheitsrelevante Abweichungen technischer Systeme in Bezug auf Häufigkeit und Auswirkungen betrachtet. Die BAM entwickelt und stellt geeignete Methoden zur Risiko- und Gefahrenanalyse sowie zur Systemanalyse bereit und geeignete Maßnahmen zur Reduktion bzw. der Verhinderung von negativen Auswirkungen auf Mensch und Umwelt zur Verfügung. Gegenstand der Forschung sind sowohl technische Systeme als auch der Faktor Mensch.

Die hochauflösende Röntgen-Computertomographie am Synchrotron und im Labor wird für die Bestimmung von Dimensionen im Probeninneren, die quantitative zerstörungsfreie Materialcharakterisierung und für die Entwicklung neuer Methoden wie z. B. der Kantentomographie untersucht. Als akkreditiertes Prüflabor charakterisiert, validiert und zertifiziert die BAM Röntgenquellen, Röntgenfilmsysteme und digitale Detektorsysteme für ihre industrielle Anwendung. Das Ziel dieser Aktivitäten ist eine sichere Prüftechnik mit reproduzierbaren Ergebnissen.

Für die effiziente Modellierung der Ultraschallausbreitung in komplexen Strukturen, wie z.B. die Ausbreitung geführter Wellen in geschichteten Platten, werden numerische Simulationsmethoden entwickelt und angepasst. Mit Hilfe dieser neuartigen, effizienten Algorithmen sowie mit kommerziell verfügbaren Tools werden spezielle Fragestellungen zur Physik der Ultraschallausbreitung und zur Wechselwirkung des Ultraschalls mit dem Werkstoff behandelt. Um die Interpretierbarkeit von Messergebnissen aus akustischen und magnetischen Untersuchungen zu verbessern, werden Signalanalyse- und Signalverarbeitungsverfahren entwickelt. Im Mittelpunkt dabei steht die Verbesserung der Prüfaussage, z.B. durch bildhafte Repräsentation der

Prüfergebnisse. Zudem werden Verfahren zur Beurteilung der Zuverlässigkeit des Prüfergebnisses entwickelt.

Zur Zustandsüberwachung und Schadensfrüherkennung mittels lokaler faseroptischer Sensorik werden punktuell-messende faseroptische Sensoren für Temperatur, Dehnung, Druck, Feuchte, Vibrationen/Schall und radioaktive Strahlung zur Überwachung von Bauwerken und technischen Anlagen jeder Art entwickelt und genutzt. Dazu zählen insbesondere faseroptische Fabry-Pérot Interferometer und Faser-Bragg-Gitter auf Basis von glas- und polymeroptischen Fasern. Die orts- und zeitaufgelöste thermische Anregung an der Oberfläche mit neuen LED- und Laserarrays ermöglicht die Untersuchung der Ausbreitung und Überlagerung thermischer Wellenfelder. Damit und mit neu entwickelten Rekonstruktionsverfahren wird die Orts- und Tiefenaufklärung bei der quantitativen Charakterisierung von Fehlstellen wesentlich verbessert.

Innere Oberflächen und Grenzflächen können makroskopische Eigenschaften von Polymeren entscheidend bestimmen. Dies reicht von der Wirkung von Nanopartikeln auf die Rissfortschrittsenergie in polymeren Nanokompositen bis zu der Veränderung der Reaktionskinetik der Duroplasthärtung. Beides ist Bestandteil der Entwicklungsarbeiten zu neuen, polymerbasierten Leichtbaumaterialien. Mittels abbildender, rasterkraftmikroskopischer Verfahren werden Eigenschaften wie E-Modul, Steifigkeit, Reibung, Zusammensetzung sowie thermische und elektrische Eigenschaften lokal bestimmt und die Ergebnisse mit makroskopischen Methoden wie der dielektrischen Breitbandspektroskopie oder dynamisch-mechanischen Verfahren korreliert. Feinteilige und poröse Festkörper werden hinsichtlich ihrer spezifischen Oberfläche, Poreneigenschaften und ihrem Sorptionsverhalten mit Hilfe der Gassorption, Quecksilberporosimetrie, dynamischen Dampfsorption sowie Dichtebestimmung charakterisiert.

Optisch-spektroskopische Methoden zur Materialanalytik werden entwickelt und erprobt. Dazu gehört die Erforschung und Entwicklung von Konzepten und von Materialien zur Verstärkung von optischen Signalen in Assays, Schnelltests und generell optisch ausgelesenen Nachweis- und Charakterisierungsmethoden und zu Multiplexing- und Barcoding-Strategien in der Materialanalytik und Bioanalytik. Im Bereich der Entwicklung und Anwendung von optisch-analytischen Methoden werden Laserplasmen und die in

ihnen ablaufenden physikalischen Prozesse und chemischen Reaktionen modelliert und das Design, die Konstruktion und der Einsatz von Laserinduzierter Plasmaspektroskopie (LIBS), LIBS-Raman und anderen optischen Methodenkopplungen vorangetrieben.

Im Bereich der Prozess-Spektroskopie und multispektralen Sensorik liegt der Forschungsschwerpunkt auf der Automatisierung der (Niederfeld-) NMR-Spektroskopie in Kombination mit weiteren optisch spektroskopischen Techniken, wie NIR- oder Raman-Spektroskopie und der Weiterentwicklung von kalibrierfreien Datenauswertungsmethoden, die im Kontext der Digitalisierung der Prozessindustrie derzeit sehr stark an Bedeutung zunehmen.

Zur Archäometrie von Schriftgut und Graphik werden verschiedene naturwissenschaftliche Analysemethoden (bildgebende Verfahren, Elementanalyse, Schwingungsspektroskopie) eingesetzt, die die Untersuchung von Schreib- und Zeichenmaterialien ermöglichen. Der Schwerpunkt liegt auf zerstörungsfreien, also nicht-invasiven Methoden.

Strukturanalytik und Materialographie

Bei der Strukturanalytik steht der Zusammenhang zwischen Struktur und Eigenschaft von Materialien im Vordergrund. Die Materialographie ist meist bildgebend und konzentriert sich auf Verfahren mit analytischen Instrumenten wie optische und Elektronen-Mikroskopien, Röntgenmethoden und rasterkraftmikroskopische Verfahren. Die BAM unterstützt Forscherinnen und Forscher sowie Anwenderinnen und Anwender, den Zusammenhang zwischen Strukturen und Eigenschaften zu verstehen und die zugrundeliegenden Werkstoffe weiterzuentwickeln, um den Einsatz von strukturbasierten Werkstoffen zuverlässiger und sicherer zu gestalten. Dazu gehört auch die Entwicklung von Referenzmaterialien.

Zur Charakterisierung von Materialien mittels Röntgenstrahlung werden in situ Untersuchungen von Kristallisations- und Partikelbildungsprozessen mittels Synchrotron-Röntgenbeugung und -streuung durchgeführt. Neben der Strukturlösung und Verfeinerung aus Röntgenpulverbeugungsdaten wird Röntgenbeugung und -kleinwinkelstreuung zur Untersuchung von Materialien auf verschiedenen Größenskalen

verwendet. Lokale Geometrien werden mittels Röntgenabsorptionsspektroskopie untersucht und Elementzusammensetzungen mittels Röntgenfluoreszenz am Synchrotron bestimmt. Der Schwerpunkt der Referenzmaterialentwicklung in der Strukturanalytik liegt im Gebiet der Gasadsorption und Quecksilberintrusion.

Die qualitative und quantitative Materialographie mit Struktur-, Textur- und Gefügeanalyse wird an metallischen und keramischen Werkstoffen durchgeführt. Dazu werden 3D-Gefügedarstellungen von Fehlstellen und Gefügen aus FIB-Serienschnitten mit einer Fläche von $15\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$ oder Serienschnittanalysen über optischen Aufnahmen und Röntgendiffraktometrie erstellt.

Die Rheologie mineralischer Baustoffe ist ein weiterer Forschungsaspekt. Der Formgebungsprozess von Massenbaustoffen erfolgt in vielen Fällen an fließfähigen dispersen Systemen. Insofern ist das Verständnis der Einflussparameter, die Modellierung sowie die gezielte Steuerung der flüssigen und festen Phasen der Schlüssel für die sichere und nachhaltige Nutzung bekannter und neuer Baustoffsysteme und Verarbeitungstechniken, z. B. auch dem 3-D Druck.

Sensorik

Sensorik bezeichnet die Wissenschaft und die Anwendung von Sensoren zur Messung und Kontrolle von Eigenschaften und Veränderungen technischer und biologischer Systeme. Dies reicht von der Reaktion von Brücken auf die Verkehrsbelastung über Verfahren zur Bestimmung der Luftverschmutzung bis zur Bestimmung der Ausbreitung brennbarer Gase nach Havarien in Verkehr und Industrie. Zusammen mit einfachen, nahezu in jeder relevanten Situation anwendbaren Schnelltests werden Sensoren in Zukunft in immer mehr Bereichen des täglichen Lebens, der Umweltüberwachung und der Prozesssteuerung eine herausragende Rolle spielen.

Die BAM arbeitet im Bereich der Reporter und Sensoren an der Erforschung und Entwicklung von Reportern, optischen Sonden und Sensoren. Dazu gehört die Entwicklung von Sensoren für die Echtzeit-Korrosionsüberwachung. Multielektrodenbasierte elektrochemische Sensoren bieten eine hohe Sensitivität und Selektivität für die Detektion und Ortung von lokalen Korrosionsprozessen. Eine effiziente Echtzeit-Korrosionsüberwa-

chung integriert in die Prozesskontrolle eröffnet neue Möglichkeiten in sicherer Anlagen- und Prozessführung.

Für die Bereiche Zustandsüberwachung sicherheitskritischer Anlagen, Bauwerke und Szenarien, das Umwelt- und Emissionsmonitoring sowie die Prozessüberwachung und -steuerung werden autonome und smarte Sensorsysteme entwickelt, validiert und angewendet. Ein Teilbereich ist die Entwicklung von Algorithmen für die Sensordatenauswertung und für die Steuerung bzw. das adaptive und autonome Agieren von mobilen Sensorsystemen. Zur zerstörungsfreien Untersuchung von neuen und komplexen Werkstoffen und Komponenten werden an die Aufgabe angepasste Prüfsysteme benötigt. Die Entwicklung neuer sensorischer und gerätetechnischer Grundlagen steht im Rahmen der angewandten und grundlagenorientierten Forschung sowie der Verfahrensentwicklung von akustischen und magnetischen Sensoren und Messsystemen im Fokus.

Zur Detektion und Quantifizierung von Gasen und Gasfeuchte werden Sensoren und Messsysteme ent-

wickelt und validiert, mit denen anhand ihrer elektrischen Signale oder Signaländerungen auf die Konzentration von Gasen bzw. von Wasserdampf in einem gasförmigen, nichtexplosiven Medium bei definierter Temperatur geschlossen werden kann. Die BAM charakterisiert Gas- und Feuchtesensoren hinsichtlich Umgebungsbedingungen und Störgrößen.

Zur Prozessüberwachung mittels faseroptischer Sensorik entwickelt und nutzt die BAM faseroptische Sensoren zur Detektion u.a. von Temperatur, Durchfluss, Flüssigkeitspegel und pH-Wert in der Prozesstechnik (z.B. in Bioreaktoren der Pharma- und Lebensmittelindustrie) sowie zur Überwachung von Fertigungsprozessen von Bauteilen mit integrierter faseroptischer Sensorik (z.B. während des 3D-Drucks).

Um die unikalen Eigenschaften keramischer Multi-layer-Schaltungsträger auch für zukünftige Applikationen im Hochfrequenz-Bereich (z. B. 5G-Mobilfunk, Nahfeldradar für Fahrassistenzsysteme) zu nutzen, werden Sintertechnologien weiterentwickelt und prozessbegleitende Prüfverfahren adaptiert.



Mobiler Öl-Schnelltest

©BAM

Darüber hinaus wird das thermomechanische Langzeitverhalten keramischer Federn analysiert, um das Potenzial neuartiger kapazitiver Federsensoren für Gravimeter und Waagen zu bewerten.

Sensormaterialien und Sensoren werden designt und charakterisiert. Dazu gehört die Synthese und Charakterisierung von Indikator-molekülen und Erkennungsmatrizes und die Entwicklung von Signalverstärkungsstrategien für einfache Sensoren ebenso wie die Adaption auf Teststreifen, Küvetten und mikrofluidischen Plattformen sowie der Nachweischemie auf Partikel- und Dünnschicht-basierten Assays. Darüber hinaus werden chemische und optische Technologien für Schnelltests und Sensoren für analytische Anwendungen entwickelt.

Für die vor-Ort-Analytik werden immunanalytische Verfahren und Sensorplattformen entwickelt. Diese umfassen immunchemische Labormethoden wie mikro-titerplattenbasierte Immunoassays (ELISA), aber auch chip-basierte Immunoarrays. Der Schwerpunkt der Entwicklungen liegt auf portablen Plattformen, die in der Umweltanalytik für die vor-Ort-Analytik eingesetzt werden können. Hierzu zählen homogene Immunoassays wie der Fluoreszenz-polarisationsimmunoassay, der Dipstick-Schnelltest (Lateral-flow Immunoassay), aber auch mikrofluidische Immunsensoren. Forschung findet auch in der Antikörperentwicklung für Umweltschadstoffe statt. Darüber hinaus werden für alle relevanten Sprengstoffklassen geeignete Antikörper oder andere Affinitätsreagenzien entwickelt, da die Sprengstoffanalytik für die zivile Sicherheit, Forensik und Umweltanalytik eine große Rolle spielt.

Qualitätssicherung

Messdaten aus den verschiedensten Anwendungen der Analytik sind nur dann hilfreich, wenn sie richtig, präzise und vergleichbar sind. Erst dann sind auf Basis dieser Daten getroffene Aussagen oder Entscheidungen belastbar. Die Entwicklung der hierfür benötigten Verfahren ist Aufgabe der BAM. Die Qualität dieser Verfahren zu sichern ist dabei ein sehr wichtiger Aspekt. Dafür hat die BAM Kompetenzen

im Bereich der metrologischen Rückführung aufgebaut, entwickelt Referenzmaterialien und wendet verschiedenste statistische Methoden zur optimalen Datenauswertung einschließlich der Ermittlung von Messunsicherheitsbilanzen an. In fachübergreifenden Forschungsprojekten die richtigen Schnittstellen für eine lückenlose und trotzdem effiziente Datensicherung zu bestimmen, ist dabei genauso eine Herausforderung, wie die Strukturierung der gesamten Daten.

Die Entwicklung von Referenzmaterialien ist ein wesentliches Element der Forschung im Bereich der Qualitätssicherung. Unter anderem werden Referenzmaterialien entwickelt, die in der Umweltanalytik benötigt werden, z. B. für die forensische Analytik (Kalibrierstandard für Atemalkohol-Meßgeräte). Nanopartikel, für die bislang keine oder unzureichend verfügbare Referenzmaterialien existieren, wie z. B. Metalle, Metalloxide und Polymere, werden synthetisiert und mit Blick auf ihre Eigenschaften, Homogenität und Stabilität untersucht mit dem Ziel, sie als Referenzmaterialien anzubieten. In diesem Rahmen erfolgen internationale Ringversuche.

Oberflächenmess- und Prüfverfahren für Materialkenngrößen werden an der BAM validiert. Die Bestimmung von Materialkenngrößen von Oberflächen/Beschichtungen erfordert im Mikro- und Nanobereich Mess- und Prüfverfahren, deren Validierung einerseits über Standards, Referenzmaterialien und Ringversuche (DIN EN ISO/IEC 17025) nachgewiesen, andererseits aber auch auf reale und effektive Materialien angewendet werden kann.

Zur Untersuchung der Effizienz, Wirkung und von Wechselbeziehungen von Elementen der Qualitätsinfrastruktur (Normung, Prüfung, Kalibrierung, Inspektion, Zertifizierung, Akkreditierung und Marktüberwachung) werden wirtschaftswissenschaftliche Untersuchungen durchgeführt. Ziel dieser Forschungsarbeiten ist es, die Einflüsse aktueller Entwicklungen (z. B. Digitalisierung oder aktuelle Gesetzgebungsvorhaben) besser zu verstehen und damit die ökonomische Wirkung dieser Elemente fundierter bewerten zu können.

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 Unab-

hängigkeit in der Forschung. Damit auch zukünftig qualifizierte Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter 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.

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 Kompe-

tenz 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 BAM arbeitet nach den Grundlagen der guten wissenschaftlichen Praxis der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) und verfügt über ein flächendeckend eingeführtes Qualitätsmanagement. Weitere interne Maßnahmen sind sowohl die Festlegung von Zielvereinbarungen als auch ein regelmäßiges Controlling.

Die Etablierung der wissenschaftlichen Beiräte zu den Themenfeldern im Jahr 2015 hat sich bewährt. So wurde eine Struktur zur externen Evaluation der fachlichen Themen der BAM geschaffen. Die Diskussion der Themen der BAM mit einem Kreis externer Stakeholder und Spezialistinnen und Spezialisten 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 hausinterne strategische Ausrichtung

zu motivieren 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 zwei unterschiedliche Instrumente, sogenannte Themenfeldprojekte und das Innovationsprogramm „Menschen und Ideen“.

Themenfeldprojekte

Eine Fokussierung auf aktuelle Fragestellungen und aufkeimende Schlüsselfragestellungen erfolgt an der BAM in den Themenfeldprojekten. Die Projekte werden abteilungsübergreifend in interdisziplinären Forscherverbänden bearbeitet. Als Anreiz wird eine monetäre Beteiligung von zentraler Stelle gewährt. Die individuellen Projekte werden von den Forschergruppen, die sich initiativ zur Teilnahme am Bewerbungsprozess zusammenfinden, erarbeitet. Die Förderung erfolgt in einer vergleichenden Auswahl. Die Auswahlkriterien dieses kompetitiven Verfahrens richten sich nach strategischer Ausrichtung, fachlicher Passung und Innovativität der vorgeschlagenen Projekte. Da es sich um strategisch gewollte Entwicklung kofinanziert durch interne Mittel handelt, wird der Aufwand für die Antragstellerinnen und Antragsteller und das Bewilligungsverfahren möglichst geringgehalten. So können möglichst viele mögliche Ideen zu Verbundprojekten gesammelt werden, die gegebenenfalls auch die Grundlage für extern finanzierte Projekte bilden können.

Die voranschreitende Globalisierung und Digitalisierung haben den Innovationszyklus moderner Entwicklungsprozesse maßgeblich beschleunigt. Die BAM steht daher vor der Herausforderung, der externen Geschwindigkeit dieser Prozesse standzuhalten. Dies erfordert ein agiles Anpassungsvermögen und zeitnahe Kurskorrekturen in den Forschungsstrategien. Das Instrument der Themenfeldprojekte ist hervorragend geeignet, um dynamisch innerhalb von wenigen Jahren Expertise auf aufkommenden Fachgebieten zu erlangen. Um fachlich strategische Neuausrichtungen mit diesem Instrument zu erzielen, erfolgt die Bewerbung nicht themenoffen, sondern jeder Förderaufruf enthält eine von der Leitungsebene der BAM vorgegebene thematische Ausrichtung. Die aktuellen Themenfeldprojekte zielen daher auf ausgewählte Schwerpunktthemen, die im Vorfeld von der Leitungsebene und den Themenfeldteams als besonders zukunfts-trächtig und vielversprechend identifiziert wurden.

Innovationsprogramm „Menschen und Ideen“

Innovative Projekte verbinden Konzepte, entwickeln neue Methoden und Instrumente und stellen neue kognitive Bezüge her. Das Programm „Menschen und Ideen“ fördert Qualität durch internen Wettbewerb und trägt dazu bei, das gesamte multi-disziplinäre Potential der BAM zur Förderung von Innovationen zu nutzen. Gleichzeitig haben alle Forschungsaktivitäten einen Bezug zum Auftrag und den Zielen der BAM. Das Programm ist mehr als ein simples monetäres Anreizsystem, es setzt auf Vorschläge der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter und damit auf deren eigene Motivation als zentrale Voraussetzung für kreative Arbeit. Der Aufwand für die Antragstellerinnen und Antragsteller und das Bewilligungsverfahren werden auch hier vergleichsweise geringgehalten. Im Vergleich zum Förderinstrument der Themenfeldprojekte werden über das Programm Menschen und Ideen individuelle Ideen gefördert. Die Ideenfindung findet daher bottom-up statt.

Förderlinie Ideen

Die Förderlinie „Ideen“ unterstützt vorrangig Forschungsprojekte in zwei Varianten, benannt in Typ 1 und 3. Die Förderung nach Typ 2 wurde in die Themenfeldprojekte überführt.

- Die Typ 1-Förderung finanziert Promotionen im Rahmen von BAM-Forschungsprojekten für einen Förderzeitraum von maximal 36 Monaten. Die Themenauswahl erfolgt durch ein Begutachtungsverfahren durch Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der BAM nach folgenden Kriterien: Originalität und Bedeutung des Antrages, Risiko des Antrages und bisherige Forschungsleistungen. Die Endauswahl erfolgt entsprechend der zur Verfügung stehenden Haushaltsmittel und der Bewertung. Die Ergebnisse der Bewertung werden den Antragstellerinnen und Antragstellern mitgeteilt. Die geförderten Projekte werden BAM-intern veröffentlicht.
- Die Typ 3-Förderung finanziert ausschließlich solche Entwicklungsarbeiten, die einen konkreten Technologietransfer zur Folge haben. Das Förderinstrument gewährleistet so die Anschlussfähigkeit von Erfindungen, die an der BAM getätigt wurden, an interessierte Unternehmen. Zur Antragsberechtigung sind daher bereits abgeschlossene Grundlagenforschung sowie die schriftliche Interessenbekundung und ein

Kooperationsvertrag mit einem Industriepartner erforderlich.

Förderlinie Menschen

Diese Förderlinie unterstützt individuelle Leistungen und Talente und macht sie für Aufgaben und Ziele der BAM sichtbar. Im Einzelnen gehören dazu neben bewährten Elementen wie dem Adolf-Martens-Postdoc-Programm auch neue Elemente. Die Maßnahmen werden zumeist aus zentralen Mitteln der BAM kompetitiv finanziert und begutachtet.

- MenschenAM bezeichnet das internationale Adolf-Martens-Postdoc-Programm, das seit 2006 jungen ausländischen Nachwuchswissenschaftlerinnen und -wissenschaftlern aus zentralen Mitteln einen kurzen Forschungsaufenthalt an der BAM ermöglicht, um neues Wissen in die Themenfelder der BAM zu integrieren, und Möglichkeiten zur Weiterqualifikation und Vernetzung bietet.
- MenschenJP umfasst das Ziel, neue Arbeitsgebiete an der BAM durch eine gemeinsam mit einer Universität etablierte Juniorprofessur aufzubauen. Dazu werden Juniorprofessuren in der BAM zentral als zeitlich befristete Nachwuchsgruppen etabliert. Die Berufung erfolgt durch ein „non-tenure“-Verfahren, die Karriereentwicklung der Nachwuchskräfte wird aktiv durch die BAM gefördert.
- MenschenOF bezeichnet die Wilhelm-Ostwald-Fellowships der BAM. Die Fellowships bieten renommierten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern die Möglichkeit, die Zusammenarbeit mit der BAM durch einen freien Zugang zu den experimentellen Möglichkeiten der BAM zu intensivieren.
- MenschenNetzwerke steht für ein Programm, welches fest angestellten und erfahrenen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern der BAM ermöglicht, einen Forschungsaufenthalt an anderen international renommierten Einrichtungen zu verbringen. Der Aufenthalt ist eingebunden in laufende Arbeiten der BAM und soll einen Know-how-Transfer ermöglichen und das fachliche Netzwerk der BAM dauerhaft stärken.
- MenschenAlumni umfasst alle Maßnahmen für ein professionelles Management von ehemaligen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der BAM, die in einem externen professionellen Netzwerk zur Erfüllung der Aufgaben der BAM beitragen können.
- MenschenPotentiale ist ein neues Programm zur Förderung der Personalentwicklung im wissenschaftlichen Kontext und der abteilungsübergreifenden Vernetzung, das sich in der Startphase an Doktorandinnen und Doktoranden und junge Postdocs der BAM richtet und ab 2020 auch Angebote für (angehende) Führungskräfte und Mentoringelemente umfassen wird.

4.3 Doktorandenprogramm der BAM

In dem 1996 begonnenen Doktorandenprogramm wurde zunächst maximal 30 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern die Möglichkeit zur Promotion gegeben. Aufgrund der sehr positiven Erfahrungen wurde die Zahl der Doktorandinnen und Doktoranden bis zum Jahr 2014 auf etwa 150 Personen erweitert. Auch in den Folgejahren wurden etwa 150 Doktorandinnen und Doktoranden beschäftigt. Dafür werden zentrale Haushaltsmittel über die Förderlinie Ideen bereitgestellt bzw. dezentrale Finanzierungen aus Mitteln der Abteilungen und externen Fördermitteln eingesetzt.

Die Promotionsverfahren erfolgen durch Zusammenarbeit mit einer Vielzahl von Universitäten. Nur wenige sehr gute Wissenschaftlerinnen und Wis-

senschaftler werden nach ihrer Promotion von der BAM übernommen. Die BAM leistet damit einen wichtigen Ausbildungsbeitrag für den wissenschaftlichen Nachwuchs in fachlichen Themen, die mit Sicherheit in Technik und Chemie verknüpft sind.

Damit die Doktorandinnen und Doktoranden 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 Doktorandinnen und Doktoranden an der BAM konkretisiert.

Zur Erweiterung der internationalen Kooperationen ist es das Ziel, in den nächsten Jahren den Anteil aus-

ländischer Doktorandinnen und Doktoranden mit Abschlüssen von renommierten Universitäten deutlich zu erhöhen und sich damit mehr an dem internationalen Wissenschaftler Austausch zu beteiligen. Dafür wird die BAM den bestehenden unmittelbaren

Dialog mit in- und ausländischen Universitäten weiter ausbauen. Auf die fachliche und organisatorische Integration ausländischen wissenschaftlichen Personals wird in der BAM besonderer Wert gelegt.

4.4 Vernetzung & Internationalisierung

Für Forschung auf hohem Qualitätsniveau ist eine gute nationale und internationale Vernetzung mit Universitäten und außeruniversitären Forschungseinrichtungen essentiell. 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.

Im außeruniversitären Bereich arbeitet die BAM natio-

nal und international mit zahlreichen Forschungsinstituten zusammen. Viele dieser Kooperationen basieren auf Verträgen oder einem entsprechenden Memorandum of Understanding. In Zukunft wird die BAM diese Kooperationen nicht nur europäisch, sondern global ausbauen und sich dadurch weiter mit renommierten Instituten weltweit vernetzen. Dabei wird die Netzwerkbildung in vielen Fällen von der BAM aktiv betrieben. Ein Beispiel ist das im Jahr 2007 in der BAM gegründete World Materials Research Institute Forum (WMRIF), ein Zusammenschluss der in den Materialwissenschaften und der Werkstofftechnik weltweit führenden Institute (<http://www.e-materials.net/network/WMRIF>).

4.5 Ressourcen

Die BAM verfügt über ein fest budgetiertes und weitgehend flexibilisiertes Haushaltsvolumen von ca. 140 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.

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.

Eine wichtige leistungsorientierte Ressource stellen eingeworbene Forschungsmittel von verschiedenen Fördermittelgebern dar. Sie sind für die BAM ein wichtiger Faktor zur Gewährleistung der wissenschaftlichen Qualität und internationalen Wettbewerbsfähigkeit. Fördermittelprojekte fördern wesentlich die nationalen und internationalen Kooperationen mit Hochschulen, anderen Forschungseinrichtungen und mit der Wirtschaft. Diese tragen wiederum erheblich zum Kompetenzerhalt, insbesondere aber zum Wissenstransfer bei und sichern so die Einbettung der BAM in das Gesamtgefüge der Scientific Community. Darüber

	2014	2015	2016	2017	2018
Drittmittel und Einnahmen (in T€)					
Umgesetzte Fördermittel (Drittmittel)	16.117	14.064	13.200	12.300	13.211
Einnahmen aus Prüfungen, Analyse, Zulassungen (PAZ)	9.708	8.930	10.663	9.984	9.563
Einnahmen Referenzmaterialverkauf	1.281	1.518	1.494	1.614	1.728
Lizenzeinnahmen	307	253	406	416	405
Output					
Veröffentlichungen (Web of Science) ²	448	424	503	523	499
Vorträge	1008	1020	858	1068	1034
Poster	275	392	300	378	439
Sonstige Veröffentlichungen	432	417	516	515	489
Patente inkl. Nationalisierungen	32	38	18	43	60
Neue zertifizierte Referenzmaterialien	243	268	323	415	506
Personal (Stand 31.12.)					
MitarbeiterInnen insgesamt	1637	1636	1655	1660	1630
StammmitarbeiterInnen	1020	1044	1056	1063	1072
Haushaltsfinanzierte Zeitangestellte (inkl. Azubis, DoktorandInnen)	367	369	404	390	369
Vorhabenfinanzierte Zeitangestellte [davon DoktorandInnen]	250 [30]	223 [35]	205 [40]	207 [46]	193 [42]
DoktorandInnen	126	118	137	181	158
Auszubildende	65	63	61	59	62
Tätigkeitsbereiche (Anteile in %)					
Forschung und Entwicklung	72 %	72 %	73 %	75 %	72 %
Prüfung, Analyse, Zulassung	10 %	11 %	11 %	10 %	13 %
Beratung und Information	18 %	17 %	16 %	15 %	15 %
Haushalt (in T€)					
Grundfinanzierung (gesamt)	141.916	136.679	133.442	142.490	144.201
Personalausgaben	74.048	76.641	78.181	80.820	83.090
Sachausgaben	37.422	40.409	37.762	39.629	41.405
Bauinvestitionen	17.116	8.541	5.693	7.400	6.200
Geräte-, IT-, sonstige Investitionen	13.330	11.088	11.807	14.641	13.507

Tabelle: Kennzahlen der BAM für die Jahre 2014-2018

² Web of science (core collection), Suchterm: BAM OR Bundesanstalt Mat Forsch* OR Fed Inst Mat Res* AND Berlin

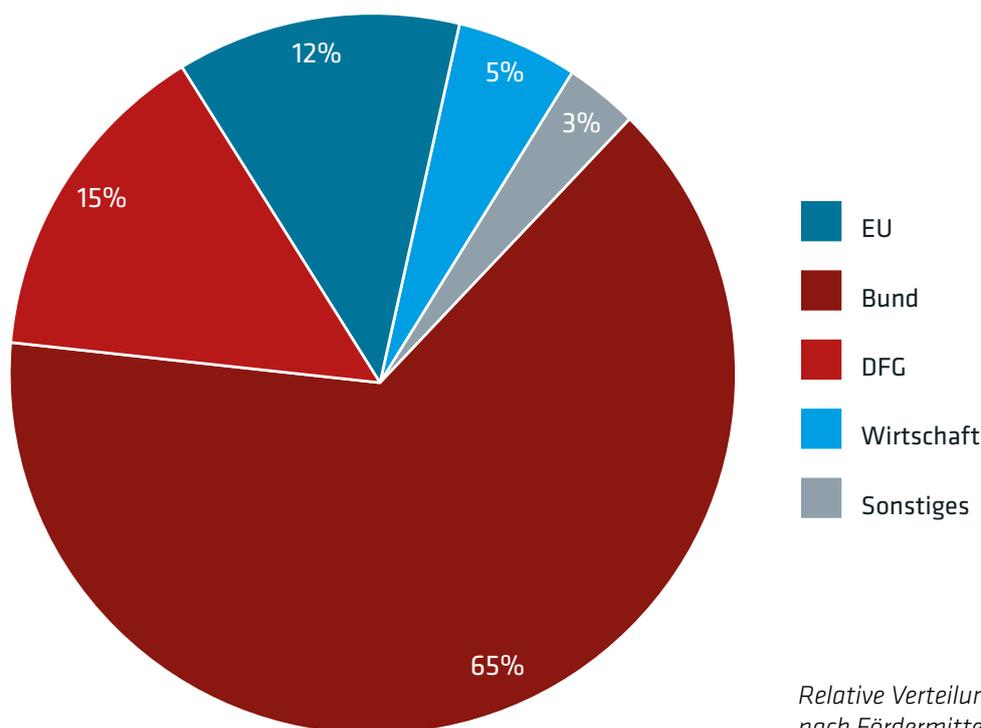
hinaus sind Fördermittel ein wichtiger Faktor bei der Bearbeitung neuer Forschungsthemen ebenso wie bei der Sicherung des wissenschaftlichen Nachwuchses.

Aus diesen Gründen erwartet die BAM von ihren Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern die Beantragung von Fördermitteln. Dabei wird die BAM auch in Zukunft gewährleisten, dass ihre Neutralität und Unabhängigkeit durch die Einwerbung von Drittmitteln nicht gefährdet wird. Dazu hat sie in einem Drittmittel-Codex Grundsätze für die Einwerbung von Drittmitteln festgeschrieben. Einer dieser Grundsätze ist es, eine Ausgewogenheit bei den Drittmittelumsätzen bezogen auf die Fördermittelgeber zu erreichen. Die Darstellung der Verteilung der Drittmittelumsätze nach Fördermittelgebern zeigt, dass eine solche Ausgewogenheit gegeben ist.

Das Kuratorium der BAM begrüßt ebenso wie die verschiedenen Evaluationskommissionen die Entwicklung im Fördermittelbereich und die sich daraus ergebenden nationalen und internationalen Kooperationen mit Hochschulen und anderen Forschungseinrichtungen außerordentlich. Um auch in Zukunft in ähnlicher Weise die Wettbewerbsfähigkeit zu erhalten und um eine gleichmäßige Verteilung der Forschungsmittel hinsichtlich ihrer Herkunft sicherzustellen, ist der uneingeschränkte Zugang der BAM zu den verschiedenen Fördermittelquellen eine wesentliche Voraussetzung.

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 BMWi und des BMBF zur Förderung von kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) beteiligen. Von Bedeutung ist in diesem Zusammenhang die Beteiligung der BAM am „Zentralen Innovationsprogramm Mittelstand“ (ZIM) und dem Programm „Industrielle Gemeinschaftsforschung“ (IGF) des BMWi 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.

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 Beispiele seien der Fallturm für die Prüfung von Transport- und Lagerbehältern radioaktiver Stoffe im Originalmaßstab und der Sprengplatz auf dem Testgelände Technische Sicherheit (BAM TTS) in Horstwalde genannt. Die experimentellen Möglichkeiten der BAM stehen im Rahmen der vertraglichen Vereinbarungen auch den Kooperationspartnern zur Verfügung.



Relative Verteilung der Fördermittel nach Fördermittelgeber

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. Etwa 70 % der eingeworbenen Fördermittel werden für Personal bereitgestellt. Der Anteil der gesamten Personalkosten, die im Bereich Forschung und Entwicklung investiert werden, liegt bei etwa 65 %. Auch in Zukunft wird die BAM, der Empfehlung des Wissenschaftsrates folgend, eine ausreichende Verschränkung der Tätigkeitsfelder sicherstellen, um ihre Kompetenz und Wettbewerbsfähigkeit weiter auszubauen. Im Jahr 2017 wurden ca. 3,5 Mio. € Haushaltsmittel BAM-intern auf laufende Themenfeldprojekte, weitere 2,3 Mio. € über das Innovationsprogramm „Ideen Typ1“ für die Bearbeitung von Forschungsthemen sowie 260 T€ für die Dissemination von Technologien über „Ideen Typ3“ im Wettbewerb vergeben.

In einem von Wissenschaft und Technologie geprägten Land wie der Bundesrepublik Deutschland stellen hervorragend qualifizierte Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler 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 Forscherinnen und Forschern.

In vielen Bereichen der BAM werden Studentinnen und Studenten verschiedener Universitäten und Fachhochschulen im Rahmen von Studien-, Bachelor-, Master- und Diplomarbeiten sowie Praxissemestern ausgebildet. Auch mit der Lehrtätigkeit ihrer Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler an Universitäten und Fachhochschulen trägt die BAM zur Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses bei, vor allem in den für die Aufgaben der BAM bedeutsamen Fachgebieten.

Titelbild (©BAM):
*Blick in den Drehrohrofen für die Herstellung
von Phosphor aus Klärschlammasche*