



Fraunhofer

MATERIALS

FRAUNHOFER-VERBUND WERKSTOFFE, BAUTEILE – MATERIALS

... FOR TOMORROW.







Liebe Leserinnen und Leser, sehr geehrte Damen und Herren,

in dieser Broschüre möchten wir Ihnen mit ausgewählten Arbeitsbeispielen einen Eindruck vom FuE-Spektrum des Fraunhofer-Verbunds Werkstoffe, Bauteile – MATERIALS vermitteln. Wir hoffen, damit Ihr Interesse für einen intensiveren Austausch zu dem einen oder anderen Thema zu wecken.

Die Verfügbarkeit passender Werkstoffe und die Beherrschung der entsprechenden Werkstofftechnologien prägen den technischen, wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Fortschritt in Industriegesellschaften seit jeher maßgeblich mit und stellen starke Wettbewerbsfaktoren dar. Das belegen einschlägige Analysen immer wieder. So bewirkt in Deutschland das verarbeitende Gewerbe aktuell rund 20 Prozent des Bruttoinlandproduktes. Der Materialkostenanteil beträgt dabei 35-55 Prozent der Gesamtkosten. Durch Forschung und Entwicklung können wir beträchtliche Effizienzgewinne erzielen, durch neue Werkstoffe und Substitutionslösungen Innovationen anstoßen und damit nicht nur die Wettbewerbsfähigkeit unseres Industriestandorts erhalten, sondern zugleich auch dazu beitragen, global begrenzte Ressourcen sinnvoller und nachhaltiger zu nutzen. Die Bedeutung der Materialforschung wird künftig weiter steigen, denn auf globaler Ebene wandelt sich der Produktionswettbewerb zunehmend zu einem Einkaufswettbewerb, in dem große, rohstofffördernde Länder ihren strategischen Vorteil preislich nutzen, wie dies bereits bei Seltenen Erden oder Rohöl offenbar wurde.

Im Fraunhofer-Verbund MATERIALS setzen wir, basierend auf kontinuierlichem Erkenntnisgewinn aus der klassischen Materialforschung und Werkstofftechnik, auf den verstärkten Einsatz digitaler Verfahren, sowohl zur Entwicklung neuer Werkstoffe als auch zur Effizienzsteigerung von ganzen Wertschöpfungsketten. Dafür steht auch unsere Initiative Materials Data Space®. Unser Ziel ist es, globale Maßstäbe bei der Digitalisierung von Werkstoffen zu setzen und damit deutschen Unternehmen eine exzellente Position im Wettbewerb zu ermöglichen. Wir freuen uns auf den kritischen Austausch zu vielen spannenden Werkstoffthemen mit Ihnen. Sprechen Sie uns jederzeit an!

Prof. Dr. Ralf B. Wehrspohn

Vorsitzender Fraunhofer-Verbund MATERIALS

INHALT

MATERIALS	6	
■ Fraunhofer MATERIALS – Stark im Verbund		
■ Fraunhofer MATERIALS – Mehrwert im Netzwerk		
■ Materialien für eine erfolgreiche Energiewende		
■ Materials Data Space®		
■ Materialien für die Additive Fertigung		
UNSERE KERNKOMPETENZEN	12	
■ Materialentwicklung		
■ Technologieentwicklung		
■ Einsatzverhalten		
■ Modellierung und Simulation		
UNSERE GESCHÄFTSFELDER	14	
ENERGIE UND UMWELT	16	
■ Recycling von großformatigen Compositebauteilen		
■ Recycling von Balsaholz aus Rotorblättern zur Herstellung von Dämmstoffen		
■ Recycling von Seltenerdmetallen und Produktionsabfällen		
■ Effizientes Recycling und optimierte Wertstoffkreisläufe für nachhaltige Wettbewerbsfähigkeit		
■ Sicherheit der Rohstoffversorgung bewerten und verbessern		
■ Dynamische Modellierung anthropogener Stoffkreisläufe		
■ Substitution kritischer Rohstoffe – Neue Permanentmagnete für die Energiewende		
■ Molecular Sorting für das Recycling von Altholz		
■ BauCycle		
■ Pilotanlage CarbonDemonstration: Aus Abfall wird Rohstoff		
■ Vollständige Beseitigung von Spurenstoffen aus Abwässern		
■ Energiespeicher – von der Materialentwicklung bis zur Wiederverwertung		
■ Materialeigenschaften-Vorhersage mithilfe Maschinellen Lernen		
■ cerenergy® – Umweltfreundliche und kostengünstige stationäre Energiespeicher		
■ Redox-Flow-Batterien zur Speicherung erneuerbarer Energie		
■ Höchsteffiziente Solarzellen auf Silicium- oder III-V Basis		
■ Organische Solarzellen und Perowskitsolarzellen		
■ Schnelltestentwicklung für die potenzial-induzierte Degradation von Solarmodulen		
■ Hocheffiziente, cadmiumfreie Quantenpunkte für QD-LEDs und Solarzellen		
■ Umweltfreundlichere protonenleitende Membran		
■ Herstellung von Biodiesel im überkritischen Prozess – Effizienzsteigerung, Umweltvorteile und Kostenreduktion		
■ Regenerationsprüfstand: Vorderkantenschutz für Rotorblätter		
■ Das Meer und der Rost: Beschichtungen für maritime Technologien		
■ Membranadsorber für die Abtrennung von Mikroschadstoffen und Metallionen		
■ Farben und Lacke auf Basis von Kartoffelstärke		
■ Wachse aus Biogas für die Kosmetikindustrie		
■ Anti-Eis-Schichten		
■ Ein-Tank-Salzsäurespeicher spart Platz und Kosten		
MOBILITÄT	36	
■ Vogelschlagsimulationen für den neuen Hochgeschwindigkeitshubschrauber »Racer«		
■ Gestensteuerung – intelligente Mensch-Maschine-Schnittstellen		
■ TRANSFORMERS: konfigurierbare Lastkraftwagen für effizienten Transport.		
■ Mit Siliziumkarbid-Halbleitern Material einsparen		
■ »RoboCT«: Mit Robotern zum kognitiven Sensorsystem		
■ 3D-SmartInspect – Intelligence in Inspection and Quality Control		
■ Röntgendiagnostik bei Crashtests		
■ Mechanisches Verhalten von Batterien unter dynamischer Last / Batterieprüfstand		
■ Simulationssoftware beschleunigt Entwicklung von Batteriesystemen		
■ Leichtbaulösungen mit definierten Eigenschaften		
■ Kostengünstige Carbonfasern für den Leichtbau		
■ Thermal Test Bench		
■ Synthetisierung von nachhaltigen Kraftstoffen und Chemikalien aus CO ₂ und H ₂		
■ Thermoplastbasierter Leichtbau für die Großserie		
■ Neue naturfaserverstärkte Hybridwerkstoffe		
■ Prozessentwicklung zum sequenziellen Preforming textiler Halbzeuge		
■ Funktionale Polymerkomposite für innovative		

Funktionsintegration

- Photovoltaik auf Nutzfahrzeugen
- Mikrostrukturelle Bewertung energiesparender und verschleißresistenter Reifenwerkstoffe
- Risiko »Wasserstoffversprödung« bewerten: Kaltrissbildung bei hochfesten Stählen

GESUNDHEIT..... 54

- Vorbeugender Wundschutz – Druckmessstrumpf für Diabetiker
- Nanopartikel für frühzeitige Malariadiagnose
- Wie Balsam auf die Wunde: Biobasierte Verbundmaterialien für die Haut
- Keine Chance für resistente Keime
- Infektionsschutz durch antibakterielle Knochenimplantate
- Abbaubare, lasttragende Implantate
- Keramische Werkstoffe für die additive Fertigung
- 3D-Bioprinting: Materialien für die Implantate der Zukunft
- Materialwissenschaftliche Bewertung des Einsatzverhaltens von Mund- und Zahnpflegeprodukten
- Regioselektiv ausgerüstete Hohlfasermembran für die Blutreinigung
- Schwer heilbare Hornhautentzündung schonend behandeln

MASCHINEN- UND ANLAGENBAU..... 60

- Modellbildung und Parametrierung eines servohydraulischen Prüfstands
- Intelligente Sensoren überwachen und optimieren Industrieprozesse 4.0
- Suspensionsspritzen für robuste und funktionelle Oberflächenveredelungen
- Winzigen Rissen auf der Spur – Aktive Thermographie mit induktiver Anregung
- Modularer Hochtemperatur Reaktor für die kontinuierliche Synthese von Nanopartikeln
- Superharte Diamantkeramiken für den Tiefseebergbau und die Offshoreförderung
- Digitalisierung von Materialien für bessere Produkte und Verfahren
- Programmierbare Materialien für Funktionsintegrierte

Systeme der Zukunft

- Kontaminationsfreie FVK-Bauteilfertigung mit der Flex^{PLAS®}-Trennfolie
- Simulation der Schmelz- und Erstarrungsdynamik bei additiven Fertigungsverfahren
- Komplexe Hartmetallwerkzeuge aus dem 3D-Drucker
- Fahrende Roboter bearbeiten große Leichtbauteile kostengünstiger, flexibler und hochpräzise
- Tonnenmaßstab und Serienproduktion – Polymersynthese und -verarbeitung im Industriemaßstab

BAUEN UND WOHNEN 70

- Kognitive Sensorplattform
- Farbige Solarmodule nach Vorbild des Morpho-Schmetterlings
- Adsorberentwicklung
- Flammgeschützte Wood-Polymer Composites (WPC)
- Hochporöse Beschichtungen für thermische Kühlanlagen und Wärmepumpen
- Holzschaum - Vom Baum zum Schaum

MIKROSYSTEMTECHNIK..... 74

- Sensormaterialien für flexible und leichte Touchscreen Displays
- Neue Fehleranalytikverfahren für die 3D-Integration mikroelektronischer Systeme
- Edelmetalltinten für die Mikroelektronik
- Röntgenblick auf Halbleiterstrukturen

SICHERHEIT 77

- Den richtigen Fluchtweg finden mit neuer Sensorplattform
- Die lizenzierte Software »VITRUV«
- Transparentkeramik für den Ballistiksenschutz
- InnoSolTEX® – funktionalisierte Textilien
- DUCON: Ein leistungsfähiger Werkstoff bei dynamischen Einwirkungen
- Satelliten-Verwundbarkeitsanalyse-Software »PIRAT«

FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT 84

- Impressum



FRAUNHOFER MATERIALS – STARK IM VERBUND

Die Institute der Fraunhofer-Gesellschaft haben sich in acht thematisch orientierten Forschungsverbünden organisiert, um die fachliche Kooperation zu verstärken und eine gemeinsame, koordinierte Leistung anbieten zu können.

Der Fraunhofer-Verbund MATERIALS bündelt die Kompetenzen von 16 materialwissenschaftlich orientierten Instituten der Fraunhofer-Gesellschaft, ergänzt um die Kompetenzen von 4 Gastinstituten.

Der Verbund setzt sein Know-how schwerpunktmäßig in folgenden volkswirtschaftlich bedeutenden **Geschäftsfeldern** ein und realisiert über maßgeschneiderte Werkstoff- und Bauteilentwicklungen Systeminnovationen:

- Energie und Umwelt
- Mobilität
- Gesundheit
- Maschinen- und Anlagenbau
- Bauen und Wohnen
- Mikrosystemtechnik
- Sicherheit

Die **Kernkompetenzen** der Fraunhofer-Materialforschung umfassen die gesamte Wertschöpfungskette:

- Materialentwicklung
- Technologieentwicklung
- Bewertung des Einsatzverhaltens
- Werkstoffmodellierung und Simulation

Dabei deckt der Verbund den gesamten Bereich der metallischen, anorganisch-nichtmetallischen, polymeren und aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellten Werkstoffe ab.

Das Gesamtbudget des Verbunds MATERIALS betrug im Jahr 2018 über 473,5 Millionen Euro. Über 4400 Mitarbeitende sind im Verbund tätig, davon etwa 2255 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler.

Ihre Ansprechpartner:

Verbundvorsitzender

Prof. Dr. Ralf B. Wehrspohn
Fraunhofer-Institut für Mikrostruktur von
Werkstoffen und Systemen IMWS
Telefon +49 345 5589-100
vorsitz@materials.fraunhofer.de



Stv. Verbundvorsitzender

Prof. Dr. Bernd Mayer
Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und
Angewandte Materialforschung IFAM
Telefon +49 421 2246-401
vorsitz@materials.fraunhofer.de



Geschäftsführung:

Dr. phil. nat. Ursula Eul
Telefon +49 6151 705-262
ursula.eul@materials.fraunhofer.de
c/o Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit
und Systemzuverlässigkeit LBF
Bartningstraße 47
64289 Darmstadt
www.materials.fraunhofer.de



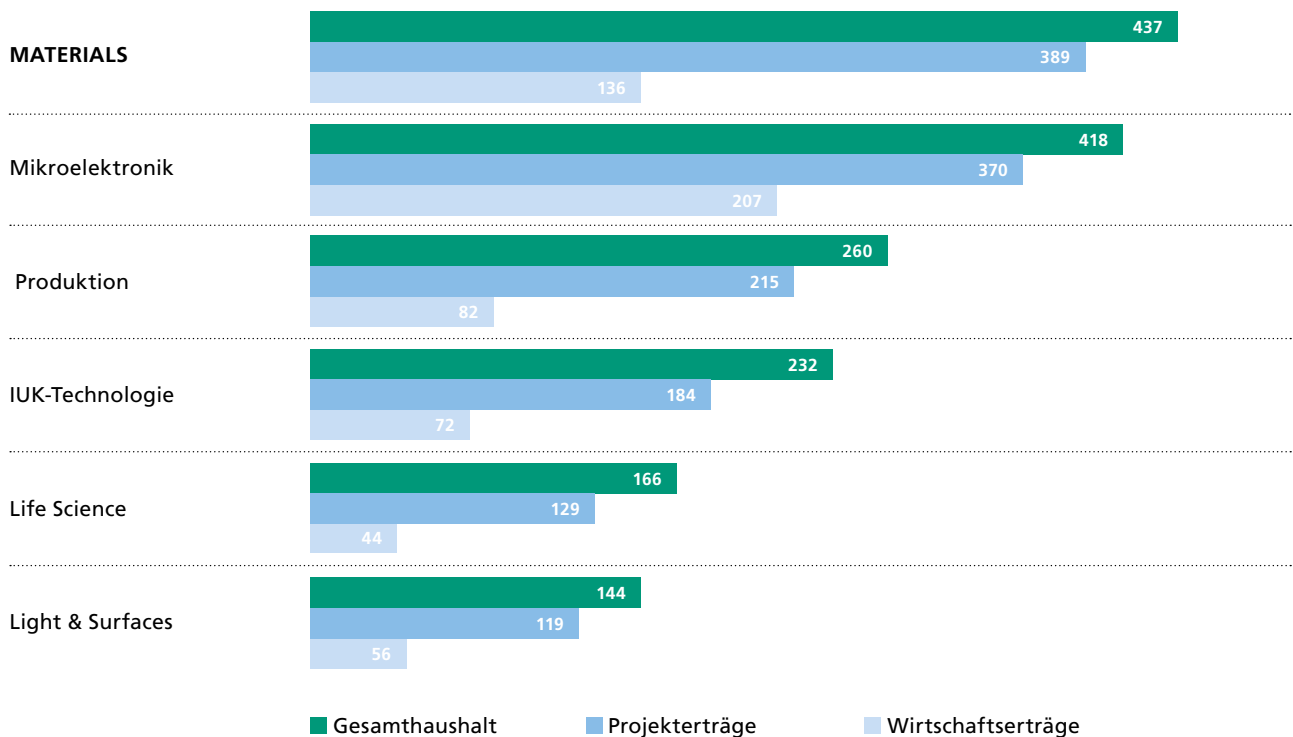


■ Aufgaben und Funktionen

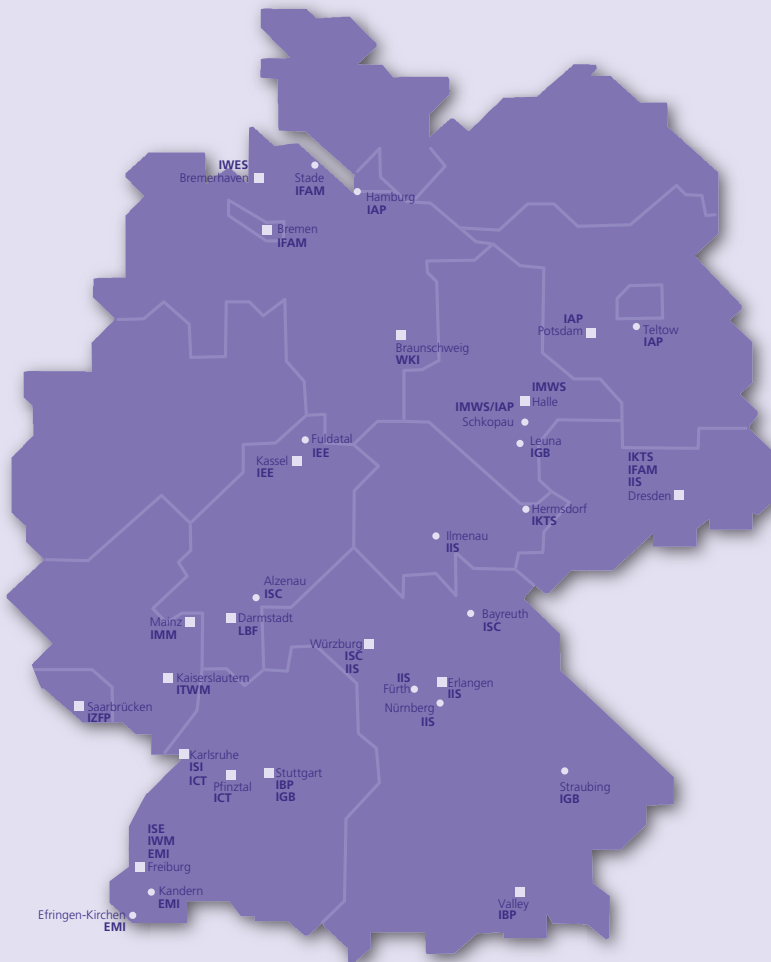
Materialforschung bei Fraunhofer umfasst die gesamte Wertschöpfungskette, von der Entwicklung neuer und der Verbesserung bestehender Materialien über die Herstelltechnologien im industrienahen Maßstab, die Charakterisierung der Eigenschaften und die Bewertung des Einsatzverhaltens in Bauteilen und Systemen bis hin zu Recycling- und Substitutionskonzepten.

- Korporative Kontaktplattform zum Markt
- Initiierung und Durchführung von Verbundprojekten und FuE-Kooperationen
- Strategische Bündelung und Weiterentwicklung der Fraunhofer-Kompetenzen
- Koordination von Fraunhofer-internen Forschungsprogrammen
- Koordination der strategischen Investitionsplanung der Verbundinstitute
- Unterstützung für nationale und internationale FuE-Politik
- Unterstützung und Mitwirkung an Entscheidungen des Fraunhofer-Vorstands
- Implementierung der Vorstandsentscheidungen im Verbund
- Langfristige gemeinschaftliche Planungs- und Handlungsplattform

Aufwendungen und Erträge der Fraunhofer-Verbünde im Leistungsbereich Vertragsforschung 2017 (in Mio €)



FRAUNHOFER MATERIALS – MEHRWERT IM NETZWERK



■ Hauptstandorte

Fraunhofer EMI

Institut für Kurzzeitdynamik,
Ernst-Mach-Institut
www.emi.fraunhofer.de

Fraunhofer IAP

Institut für Angewandte
Polymerforschung
www.iap.fraunhofer.de

Fraunhofer IBP

Institut für Bauphysik
www.ibp.fraunhofer.de

Fraunhofer ICT

Institut für Chemische Technologie
www.ict.fraunhofer.de

Fraunhofer IEE

Institut für Energiewirtschaft und
Energiesystemtechnik
www.iee.fraunhofer.de

Fraunhofer IFAM

Institut für Fertigungstechnik und
Angewandte Materialforschung
www.ifam.fraunhofer.de

Fraunhofer IKTS

Institut für Keramische Technologien
und Systeme
www.ikts.fraunhofer.de

Fraunhofer IMM

Institut für Mikrotechnik
und Mikrosysteme
www.imm.fraunhofer.de

Fraunhofer IMWS

Institut für Mikrostruktur von Werkstoffen und
Systemen
www.imws.fraunhofer.de

Fraunhofer ISC

Institut für Silicatforschung
www.isc.fraunhofer.de

Fraunhofer ISE

Institut für Solare Energiesysteme
www.ise.fraunhofer.de

Fraunhofer IWES

Institut für Windenergiesysteme
www.iwes.fraunhofer.de

Fraunhofer IWM

Institut für Werkstoffmechanik
www.iwm.fraunhofer.de

Fraunhofer IZFP

Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren
www.izfp.fraunhofer.de

Fraunhofer LBF

Institut für Betriebsfestigkeit und
Systemzuverlässigkeit
www.lbf.fraunhofer.de

Fraunhofer WKI

Institut für Holzforschung,
Wilhelm-Klauditz-Institut
www.wki.fraunhofer.de

Gastinstitute:

Fraunhofer IGB

Institut für Grenzflächen- und
Bioverfahrenstechnik
www.igb.fraunhofer.de

Fraunhofer IIS

Institut für Integrierte Schaltungen
www.iis.fraunhofer.de

Fraunhofer ITWM

Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik
www.itwm.fraunhofer.de

Fraunhofer ISI

Institut für System- und Innovationsforschung
www.isi.fraunhofer.de



*Veränderungen der Energiesysteme: Zunehmende Elektrifizierung durch neue Stromanwendungen im Wärme- und Verkehrssektor.
© shutterstock / ArtisticPhoto;
Collage: Fraunhofer-Allianz Energie*

MATERIALIEN FÜR EINE ERFOLGREICHE ENERGIEWENDE

Energiesysteme befinden sich weltweit in einer Umbruchphase. Erneuerbare Energien – allen voran Solar- und Windenergie – gewinnen eine dominante Bedeutung und werden aller Voraussicht nach zur Mitte des Jahrhunderts die größten Beiträge zur Stromerzeugung, aber auch zur Energieversorgung insgesamt liefern. Der große Anteil volatiler, nicht regelbarer erneuerbarer Energien für die Stromerzeugung bedingt einen Paradigmenwechsel des heute immer noch stark auf zentralen Kraftwerken basierenden Versorgungsmodells. Die bedarfsgerechte Energiebereitstellung durch Großkraftwerke wird dabei zunehmend ersetzt werden durch ein System, in dem fortwährend ein Ausgleich zwischen (volatiler) Bereitstellung und flexibler Nutzung erfolgt. Hieraus entsteht ein komplexes Zusammenspiel aus zeitlich angepasster Energienutzung, der stärkeren Kopplung der Sektoren Strom, Wärme und Verkehr, dem temporären Einsatz flexibler Erzeugungsanlagen und dem Einsatz von Speichern verschiedener Bauformen. Aus all dem ergeben sich nicht nur wesentliche Anforderungen an den Betrieb des Energiesystems, sondern auch an Komponenten und die bei deren Herstellung zum Einsatz kommenden Funktionsmaterialien – von der primären Energiewandlung über Transport und Verteilung sowie Speicherung bis hin zur Nachfrageseite. Beispiele aus der Photovoltaik sind neue Fertigungsverfahren für Siliziumwafer aber auch neue Materialklassen wie Perowskite oder Kombinationen aus Materialien mit verschiedenen Bandabständen für Mehrfachsolarzellen. Eine große Bedeutung bekommen Materialfragen im Bereich der Energiespeicher. In Lithium-Ionen-Batteriezellen geht es um neue Anodenmaterialien mit höherer Energiedichte, um Ersatzstoffe für Kobalt auf der Kathodenseite und mittelfristig um den Ersatz flüssiger Elektrolyte durch Ionen-leitende Feststoffe. Im Bereich der Leistungselektronik können weiter entwickelte Halbleiterwerkstoffe zu signifikanten Sprüngen in der Taktfrequenz und damit der Leistungsdichte führen. Metall-organische

Gerüstmaterialien können als hoch-poröse Materialien mit gut einstellbaren Mikrostrukturen in unterschiedlichsten Einsatzgebieten zur Anwendung gelangen – von Gas-Wärmepumpen über selektive Adsorber zur Gastrennung, z.B. zur selektiven CO₂-Anlagerung, bis hin zu Feststoffspeichern zur reversiblen Einlagerung unterschiedlichster Moleküle wie solche synthetischer Energieträger. Dies sind nur einige Beispiele für eine Vielzahl vielversprechender Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, die nahezu alle Aspekte der Energiewandlungsketten umfassen.

Hinzu kommt eine weitere Anforderung: Während das klassische Energieversorgungssystem vor allem auf der Nutzung fossiler Energieträger basiert(e) und alle anderen Materialien in Kraftwerken und Anlagen aus Ressourcensicht eine verglichen damit nachrangige Rolle gespielt haben, basiert das zukünftige Energiesystem in erster Linie auf erneuerbaren Energien, die nach menschlichem Ermessen unerschöpflich sind. Allerdings bedarf es eines massiv höheren Einsatzes einer Vielzahl von Materialien – von Kupfer, Stahl und Beton bis hin zu Seltenen Erden – für die vielen Millionen Anlagen zur Wandlung und Speicherung. Deshalb wird zukünftig Fragen der Ressourcenverfügbarkeit und der Schaffung geschlossener Ressourcenkreisläufe für diese Anlagen und Komponenten eine Schlüsselrolle zukommen.

Diese und zahlreiche weitere Forschungsfragen stehen im Fokus der angewandten Materialforschung einer Vielzahl von Fraunhofer-Instituten des Materialverbunds. Neben einer exzellenten Ausstattung im Bereich der experimentellen Methoden zur Materialsynthese und -charakterisierung sowie Expertise in der grundlegenden Werkstoffsimulation zeichnet es uns aus, dass wir frühzeitig Fragen der industriellen Umsetzbarkeit und der Kostenanalysen mit einbeziehen.



Der Fraunhofer-Verbund
MATERIALS schafft eine Plattform für Industrie-4.0-fähige Materialien. © Fraunhofer-Verbund MATERIALS

MATERIALS DATA SPACE®

Industrie 4.0 ist auf die passenden Materialien und Werkstoffe angewiesen. Der Fraunhofer-Verbund MATERIALS schafft dazu eine Plattform: Der Materials Data Space® will unternehmensübergreifend digitale Daten zu Materialien und Werkstoffen entlang der gesamten Wertschöpfungskette bereit stellen. Durch die Vernetzung werden kürzere Entwicklungszeiten, lernende Fertigungsverfahren und neue Geschäftsmodelle möglich. Dies eröffnet enorme Potenziale für Materialeffizienz, Produktionseffizienz und Recycling.

Materials Data Space® bündelt alle relevanten Informationen zu Werkstoffen und Bauteilen digitalisiert und unternehmensübergreifend. Mit diesem »digitalen Werkstoffzwilling« wird es Entwicklern und Ingenieuren möglich, die eingesetzten Werkstoffe in den jeweiligen Entwicklungsschritten als variable Systeme mit einstellbaren Eigenschaften zu begreifen und zu nutzen.

Daten zu einem Werkstoff oder Bauteil will Materials Data Space® durchgängig über den gesamten Lebenszyklus zur Verfügung stellen. Darauf zugreifen können bei entsprechender Rechtevergabe alle Prozessverantwortlichen, vom Materialentwickler über den Werkstoff-, Halbzeug- und Bauteilhersteller bis hin zum Endnutzer und dem Recycler. An jedem Schritt des Prozesses können in Echtzeit die dynamischen Materialeigenschaften erfasst und in den Materials Data Space® eingespeist werden. Durch die Vernetzung können sich selbst organisierende, unternehmensübergreifende Wertschöpfungsnetzwerke etablieren, die sich nach unterschiedlichen Kriterien wie Kosten, Verfügbarkeit und Ressourcenverbrauch optimieren lassen. Informationstechnisches Fundament des Materials Data Space® ist der sichere Datenraum des Industrial Data Space.

Die Kenntnis der Mikrostruktur von Werkstoffen wird dabei in digitale Materialmodelle umgesetzt, die zu Startpunkten

für durchgängige Prozesskettensimulationen werden. Zugleich wird der Datenbestand des Materials Data Space® zum »Gedächtnis des Werkstoffs«. Neben den Angaben zur Mikrostruktur fließen in den Materials Data Space® auch Informationen von Werkstoffen und Bauteilen ein, die mit sensorischen Eigenschaften versehen sind. Sie können ihren aktuellen Zustand selbst erfassen, etwa zum Abnutzungs- oder Beanspruchungsgrad. Diese Daten geben die Werkstoffe nach vorgegebenen Regeln eigenständig an Herstellungs-, Bearbeitungs- und Montagemaschinen weiter, die dann darauf reagieren können. Zugleich berücksichtigt der Materials Data Space® die Daten von adaptiven Bauteilen, die sich aufgrund der eigenermittelten oder der vom Gesamtsystem signalisierten Belastungssituation anpassen. So entstehen lernende Fertigungsverfahren, in denen die Prozesse stets optimal auf die Eigenschaften der jeweils eingesetzten Materialien zugeschnitten sind. Nicht zuletzt können die Daten selbst zur Grundlage neuer Geschäftsmodelle werden.

In mehreren Use Cases weisen die Institute aus dem Verbund MATERIALS gemeinsam mit Partnern derzeit die Potenziale dieses Ansatzes nach und entwickeln den Materials Data Space® weiter. Dazu gehören Projekte im Bereich Faserverbundwerkstoffe/Faserverbundbauteile, Metallverarbeitung/Metallformgebung sowie Funktionswerkstoffe und intelligentes Recycling. Bereits geplant sind weitere Use Cases am Beispiel der Wertschöpfungsketten von Aluminium und Kupfer. Am Center for Economics of Materials CEM, das vom Fraunhofer IMWS und der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg getragen wird, erfolgt die Analyse der ökonomischen Auswirkungen von Digitalisierungsprozessen in der gesamten Wertschöpfungskette der sich etablierenden Industrie 4.0 unter den Gesichtspunkten der Kreislaufökonomie und Werkstoffökonomik.



Unser Ziel ist es Maßstäbe bei der Digitalisierung von Werkstoffen zu setzen und mit unserer FuE maßgeblich zur Wettbewerbsfähigkeit der Wirtschaft beizutragen.



Prof. Dr. Ralf B. Wehrspohn
Vorsitzender des Fraunhofer-Verbunds MATERIALS
Institutsleiter Fraunhofer-Institut für Mikrostruktur von Werkstoffen und Systemen IMWS

MATERIALIEN FÜR DIE ADDITIVE FERTIGUNG

Die Notwendigkeit zur Ressourceneffizienz auf der einen Seite und der Verbraucherwunsch nach individualisierten Produkten auf der anderen Seite stellen das produzierende Gewerbe in zahlreichen Branchen vor neue Herausforderungen.

Aufgrund der wachsenden ökonomischen Bedeutung fortschrittlicher Materialien, Fertigungs- und Produktionsmethoden für das produzierende Gewerbe und ganz konkret auch aufgrund der Möglichkeit, mit Methoden der Additiven Fertigung neuartige Bauteilgeometrien und Funktionalitäten zu erzeugen sowie Prototypen und Kleinserien ohne hohe Werkzeugkosten zu fertigen, rückten in den vergangenen Jahren Verfahren der Additiven Fertigung verstärkt in das Interesse der Industrie.

Inzwischen existieren eine Vielfalt sehr gut entwickelter Verfahren (SLA, DLP, SLS, SLM, EBM, FFF und viele mehr) und ein entsprechend breites Angebot an leistungsfähigen Anlagen für die Additive Fertigung am Markt. Dabei sind die Verfahren und Anlagen jeweils auf ein meist enges Spektrum an verwendbaren Materialien spezialisiert. Jedoch werden Bauteil- und Produkteigenschaften nicht nur durch das Fertigungsverfahren sondern maßgeblich auch durch die verwendeten Materialien definiert. Im Zusammenspiel von maßgeschneiderten Materialien und Verfahren liegt daher ein großes, bislang aber noch kaum ausgeschöpftes technologisches und wirtschaftliches Potenzial. Die Erschließung und Entwicklung von (neuen) Materialien für die Additive Fertigung sind daher ein Ziel des Fraunhofer-Verbunds MATERIALS. Die zunehmende Digitalisierung sowohl in der Produktion (Industrie 4.0) als auch bei der Werkstoffentwicklung (Werkstoffe 4.0, Materials Data Space®) bietet gerade für die Additive Fertigung ausgezeichnete Voraussetzungen. Aufgrund der mit ihr einhergehenden Optionen zur dezentralen Fertigung, zur kosteneffizienten Fertigung auch in geringen Stückzahlen (bis Losgröße 1) und zur Individualisierung von Produkten sind diese Chancen für innovative KMU und Start Up-Unternehmen sehr gut nutzbar.

Für eine stärkere Durchdringung der verarbeitenden Industrie mit Additiven Fertigungsverfahren insbesondere in den Branchen Elektronik, Energie-, Medizin- und Verfahrenstechnik, aber auch in der Luft- und Raumfahrt, im Maschinen- und Fahrzeugbau sowie in der Sicherheitstechnik ist die Entwicklung eines breiten Portfolios an Materialien und Halbzeugen entscheidend, Materialien, mit denen die Möglichkeiten der AM-Anlagentechnik voll ausgeschöpft werden können. Dies wird durch eine Verbreiterung des bekannten Werkstoffportfolios erreicht. In Ergänzung dazu ist die Weiterentwicklung bestehender additiver Fertigungstechnologien zu einem integrierten Multi-Material-Ansatz vielversprechend. Erst auf dieser Basis lassen sich maßgeschneiderte hybride Bauteilkonzepte realisieren, die sich exakt am lokalen Anforderungsprofil eines Bauteils orientieren und diesem durch eine funktionsangepasste Variation der Werkstoffeigenschaften (z. B. Steifigkeit, elektrische und thermische Leitfähigkeit, etc.) in allen drei Bauteildimensionen gerecht werden.

Mit der Weiterentwicklung der Additiven Fertigung sowie insbesondere mit der Weiterentwicklung der dafür notwendigen Werkstoffkombinationen könnten künftig konventionell vorgelagerte und nachgelagerte Fertigungsschritte (etwa Formgebung, Funktionalisierung und Montage) in einen einzigen Prozess integriert werden. Damit kann sich in einer Vielzahl von Branchen eine überdurchschnittliche ökonomische Hebelwirkung durch verkürzte Entwicklungs- und Produktionszeiten, höhere Produktionsflexibilität sowie effizienteren Ressourceneinsatz entfalten.

Der Fraunhofer-Verbund MATERIALS arbeitet in zahlreichen FuE-Projekten an geeigneten Materialien und Prozessen für einen breiteren Einsatz Additiver Fertigungsverfahren in der verarbeitenden Industrie.

UNSERE KERNKOMPETENZEN

Im Fraunhofer-Verbund MATERIALS haben sich die vorwiegend materialwissenschaftlich ausgerichteten Institute der Fraunhofer-Gesellschaft zusammengeschlossen. Weitere Institute wirken als Gäste mit und bringen zusätzliches, die Materialwissenschaft und Werkstofftechnik ergänzendes System- und Verfahrenswissen aus ihren jeweiligen Anwendungsfeldern mit ein. Somit bündelt der Verbund sehr weit gefächerte Kompetenzen und Erfahrung entlang der gesamten Wertschöpfungskette, über alle Werkstoffklassen hinweg.



MATERIALENTWICKLUNG

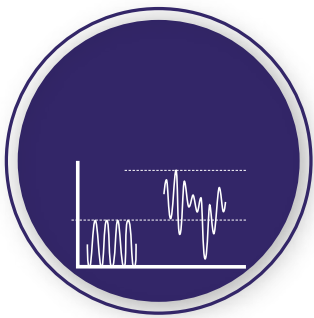
Bei der überwiegenden Zahl aller Produktinnovationen spielen Werkstoffe eine entscheidende Rolle. Entweder sind Werkstoffinnovationen impulsgebend für die Entwicklung eines neuen Produktes oder die Produktentwicklung definiert konkrete Anforderungsprofile für neu zu entwickelnde bzw. zu verbessernde Werkstoffe. Studien zufolge basieren ca. 70 Prozent aller neuen Erzeugnisse auf neuen Werkstoffen. Auch unter Kostenaspekten gewinnen Materialien zunehmend an Bedeutung.

Die Institute des Fraunhofer-Verbunds MATERIALS tragen auf dem Gebiet der Materialentwicklung in einer großen Spannweite zu Innovationsprozessen bei. Einige Beispiele für erfolgreiche Materialentwicklung bei Fraunhofer sind etwa polymere Hochleistungsfasern für den Leichtbau, keramische Fasern für Hochtemperaturanwendungen, für Spezialanwendungen optimierte Matrixharze oder Faserverbunde. Weitere Entwicklungen finden im Bereich nanoskaliger Materialien, Halbleitermaterialien, Phasenwechselmaterialien oder »smarter« Materialien statt. Spezialkeramiken gehören ebenso in das FuE-Spektrum wie funktionale Polymere mit spezifischen (elektrischen, elektrooptischen, optischen und mechanischen) Eigenschaften oder die gezielte Einstellung von Eigenschaftsprofilen durch neue Additive. Ein spezielles Augenmerk gilt der Werkstoffentwicklung aus biobasierten Materialien und aus Rezyklaten sowie der Entwicklung von Werkstoffen für die Additive Fertigung.



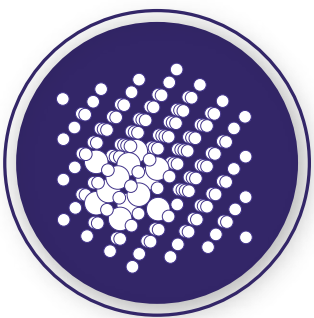
TECHNOLOGIEENTWICKLUNG

Moderne Werkstoffe müssen anspruchsvollen Eigenschaftsprofilen genügen. Sie sollen nicht nur leicht, belastbar, biokompatibel, langlebig und »smart« sein, auch ihre Herstellung, Verarbeitung und Entsorgung soll ökonomisch, ressourcen- und materialeffizient sein. Um diese und ähnlich komplexe Anforderungen zu realisieren, bedarf es neben der reinen Materialentwicklung einer breiten Palette an ausgefeilten Werkstofftechnologien. Oft entscheiden die Herstellungs-, Be- und Verarbeitungsprozesse darüber, wie leistungs- und wettbewerbsfähig ein Werkstoff und damit letztlich die daraus hergestellten Produkte in der Praxis tatsächlich sind. Mit der Entwicklung fortschrittlicher Werkstofftechnologien leisten die Institute des Fraunhofer-Verbunds MATERIALS signifikante Beiträge zur Lösung wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Herausforderungen. Zu den Arbeitsgebieten der Institute zählen die Entwicklung und der Einsatz von ausgewählten Technologien zur Oberflächenveredelung, Beschichtung und Funktionalisierung von Materialien ebenso wie die Weiterentwicklung und Optimierung von Füge- und Bearbeitungsverfahren oder die Entwicklung ganz neuer Prozesse und Verfahren, zum Beispiel im Bereich der Polymersynthese, Mikroformung oder Rapid Prototyping bis hin zum Recycling.



EINSATZVERHALTEN

Fraunhofer-Wissenschaftler entwickeln im Auftrag ihrer Kunden Werkstoffe und Technologien passend für den jeweiligen Einsatzzweck, ob für den Fahrzeugbau, die Medizintechnik oder die Energieerzeugung, ob für statische oder hoch dynamische Beanspruchungen. Damit die Werkstoffe bzw. die daraus hergestellten Bauteile und Produkte im Praxiseinsatz tatsächlich bestehen können, wird der Entwicklungsprozess in seinen verschiedenen Stufen durch jeweils passende Methoden der Analyse, Charakterisierung und Prüfung bis hin zur Qualitätskontrolle und Einsatzerprobung begleitet. Die Fraunhofer-Institute im Verbund MATERIALS bieten ein umfassendes Spektrum an Methoden und Verfahren zur Prüfung und Bewertung von Funktionalität einerseits sowie von Sicherheit, Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit andererseits. Dafür stehen über den gesamten Werkstoff- bzw. Produktlebenszyklus auf der Mikro- wie auf der Makroskala zahlreiche numerische wie experimentelle Verfahren, hier zerstörende wie auch nicht-zerstörende Verfahren, zur Verfügung. Dazu zählen auch »intelligente« Methoden des Structural Health Monitoring oder des in-line Monitoring von Fertigungsprozessen, z. B. mittels Computertomographie. In dem Maße, in dem Werkstoffe und Produkte weiter entwickelt werden, durchleben auch Prüfverfahren und Bewertungsmethoden Innovationsprozesse.



MODELLIERUNG UND SIMULATION

Moderne Werkstoffentwicklung findet mit Blick auf den späteren Einsatzzweck in Produkten, auf Basis einer klaren Definition von Zieleigenschaften für den Werkstoff statt. Idealerweise können diese Zieleigenschaften bis auf die Mikrostrukturebene heruntergebrochen werden. Mit Simulationstechniken entwerfen Fraunhofer-Wissenschaftler neue Materialien am Rechner und testen deren Eigenschaften virtuell, über viele Skalen hinweg. Sie erheben Materialdaten, erarbeiten entsprechende Materialmodelle und sagen etwa voraus, wie sich ein Kunststoff-Compound im Spritzgussprozess verhält. Sie untersuchen am Rechner, ob die maßgeschneiderte Antireflexbeschichtung für Solarzellen die gewünschten Eigenschaften im Einsatz beibehält oder wie sich sicherheitskritische Zonen einer Leichtbaukarosserie beim Zusammenprall mit einem Hindernis verhalten. Mit Methoden der Werkstoffmodellierung, passenden Simulationstechniken und dem entsprechenden Expertenwissen lassen sich kosten- und zeitintensive Versuchsreihen im Umfang reduzieren und Entwicklungszeiten deutlich verkürzen. In den Instituten des Fraunhofer-Verbunds MATERIALS werden Modellierungs- und Simulationstechniken eingesetzt und anwendungsspezifisch weiterentwickelt.

UNSERE GESCHÄFTSFELDER

Fortschritte in der Materialwissenschaft und Werkstofftechnik sind essenziell für Innovationen in allen Technologiebereichen und geben oft die entscheidenden Impulse. Die Verfügbarkeit optimierter Werkstoffe und der zugehörigen Herstellungs- und Verarbeitungstechnologien ist ein für die Wettbewerbsfähigkeit von Wirtschaftsräumen entscheidender Faktor.

Der Fraunhofer-Verbund MATERIALS befasst sich mit vielfältigen Herausforderungen in den folgenden Schlüsselfeldern und erarbeitet maßgeschneiderte Lösungen.



ENERGIE UND UMWELT

Energie- und Ressourceneffizienz zur Sicherstellung einer bezahlbaren, zuverlässigen und zugleich umweltschonenden Energieversorgung einer wachsenden Weltbevölkerung sind ohne Materialinnovationen nicht denkbar. Die Anforderungen der Energiewende an Energieerzeugung, -transport, -versorgung und -speicherung definieren besondere Herausforderungen für Werkstoffe und Werkstofftechnologien. Parallel spielt die Verfügbarkeit bestimmter Rohstoffe für zahlreiche Hightech-Anwendungen eine Schlüsselrolle. Die Entwicklung von effizienten Recyclingkonzepten und verfügbaren, leistungsfähigen Substitutwerkstoffen sind drängende Forschungsaufgaben.



MOBILITÄT

Ein leistungsfähiges Verkehrssystem ist essenziell für eine moderne Gesellschaft, für Wirtschaftswachstum, Beschäftigung und Wohlstand. Für Mobilität und Verkehr sind Werkstoffe neben der Elektronik die wesentlichen Innovationstreiber. Wettbewerbsfähige Material- und Systemlösungen für straßengebundene wie schienengebundene Fahrzeuge, in der Luftfahrt wie im Schiffsbau müssen jeweils spezifische Anforderungsprofile aus Ressourcen- und Energieeffizienz, aus Leichtbau, Sicherheit, Systemzuverlässigkeit und Komfort erfüllen. Dies gilt für Elektroantriebe ebenso wie für Verbrennungsmotoren oder Hybride, für personengeführte ebenso wie für autonome Fahrzeuge.



GESUNDHEIT

Der demografische Wandel, die Verbreitung neuartiger Erkrankungen sowie ein zunehmendes individuelles Gesundheitsbewusstsein stellen hohe Anforderungen an ein leistungsfähiges und bezahlbares Gesundheitssystem. Daraus resultiert ein wachsender Bedarf an innovativen Materialsystemen für Prävention, Diagnose und Therapie. Material- und Werkstoffinnovationen ermöglichen neue Ansätze in der Arzneimittelforschung und erhöhen die Langlebigkeit und Biokompatibilität von Medizinprodukten. Sie tragen zur Verbesserung der Lebensqualität bei.



MASCHINEN- UND ANLAGENBAU

Der Materialkostenanteil im verarbeitenden Gewerbe ist in Deutschland erheblich. Werkstoff, Prozess- und Fertigungstechnik sind eng miteinander verzahnt. Abgestimmte Modifizierungen von Werkstoffeigenschaften, Bearbeitungs- und Fertigungsverfahren sind Schlüssel zur Verbesserung der Leistungsfähigkeit von Produkten. Optimierter Werkstoffeinsatz einerseits und fertigungsgerechte Entwicklung von neuen Werkstoffen andererseits können die Produktvielfalt und -qualität erheblich steigern. Modellierung und integrierte Simulation von Werkstoff und Verarbeitungsprozess, verbunden mit einem durchgängigen Materialdatenfluss, beschleunigen den Innovationsprozess.



BAUEN UND WOHNEN

Wohnen gehört zu den Grundbedürfnissen des Menschen. Zur Schaffung einer hohen Lebensqualität in bezahlbarem Wohnraum bei gleichzeitiger Realisierung energieeffizienter, nachhaltiger Bauweisen ist ein strategisch kluger Einsatz von Werkstoffen und Werkstoffsystemen gefordert, sowohl für Neubauten als auch für die Sanierung von Altbauten. Bei der Entwicklung neuer Werkstoffe und Fertigungsverfahren sind Energie- und CO₂-Einsparung sowie Recycling und Rückgewinnung von Rohstoffen wichtige Ziele.



MIKROSYSTEMTECHNIK

Der Markt der Mikroelektronik und Mikrosystemtechnik ist hochdynamisch. Innovationszyklen sind ausgesprochen kurz, die auf den Materialeinsatz bezogene Wertschöpfung ist außerordentlich hoch. Die weitere Erhöhung der Integrationsdichte einerseits und der Einsatz knapper, teurer oder auch toxischer Rohstoffe andererseits sind zentrale Themen und erfordern eine sehr hohe Funktions- und Leistungsfähigkeit der eingesetzten Materialsysteme. Ausschlaggebend dafür ist in vielen Fällen ihre Struktur und Zusammensetzung auf atomarer Ebene.



SICHERHEIT

Der Schutz von Menschen, Gebäuden und Infrastruktur vor Naturkatastrophen, Unfällen oder Terroranschlägen stellt eine wachsende Herausforderung dar. Leistungsfähige Werkstoffe in spezifischen Schutzkonzepten können maßgeblich zur Erhöhung der Sicherheit und zur Schadensbegrenzung beitragen. Voraussetzung für deren Entwicklung ist ein tiefgehendes Verständnis des Verhaltens von Materialien, Bauteilen und Strukturen unter extremen Belastungen wie z. B. bei Impakt- und Explosionsereignissen.



*Rotorblattcomposite im Verbund
als Querschnitt (oben) und
zerkleinert (unten).
© Fraunhofer ICT*

ENERGIE UND UMWELT

■ Recycling von großformatigen Compositebauteilen – Rotorblättern

Composite aus Verstärkungsfasern mit duroplastischen Kunststoffen als Matrixmaterial stehen seit einigen Jahren durch ihr enormes Leichtbaupotential und hoher Wirtschaftlichkeit im Fokus neuer Materialentwicklungen. Sie finden derzeit verstärkt Eingang in neue Produkte und werden somit zukünftig in großen Mengen zum Recycling anstehen. Bei Rotorblättern von Windkraftanlagen werden neben faserverstärkten Kunststoffen auch Füllstoffe wie Balsaholz oder Kunststoffschaum in Sandwichbauweise eingesetzt, um zusätzlich Gewicht zu sparen. Der Vorteil von Hybridwerkstoffen, die sich durch einen geeigneten Mix von Materialien als Verbund an die jeweiligen Anforderungen anpassen lassen, erweist sich im Hinblick auf die Entsorgung bislang als Nachteil. Das Recycling dieser Verbundmaterialien, insbesondere die Trennung der Komponenten unter Beibehaltung der Qualitätsmerkmale, ist noch ungelöst.

Zur Entwicklung einer ökonomischen und ökologischen Recyclinglösung für Composite muss die gesamte Recyclingkette von der Demontage über die Aufbereitung bis hin zur Bereitstellung von verarbeitungsfähigen Sekundärrohstoffen betrachtet werden. Besonders bei großformatigen Bauteilen wie Rotorblättern gestalten sich diese Arbeitsschritte jedoch schwierig. Eine Demontage dient hier nach dem Stand der Technik lediglich der Bereitstellung transportfähiger genehmigungsfreier Rotorblattsegmente und weniger der Separierung in die einzelnen Fraktionen. Die aktuell zur Entsorgung anfallenden Rotorblätter bestehen aus glasfaserverstärktem Kunststoff in Sandwichbauweise mit Kunststoffschaum oder Balsaholz als Füllstoff. Am Flansch, der Verbindung zum Rotor, befinden sich große Metallbolzen und im inneren des Blattes meist Kupferleitungen als Blitzableiter. In Rotor-

blättern der neueren Generation sind zusätzlich vereinzelt und je nach Hersteller auch noch kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe in den besonders belasteten Bereichen verbaut. Aktuelle Forschungsarbeiten beschäftigen sich unter anderem mit dem Einsatz von thermoplastischen Strukturen in Rotorblättern, wodurch der bestehende Materialmix noch weiter erhöht wird. Eine Trennung der einzelnen Fraktionen bereits vor Ort an der Anfallstelle würde die darauffolgenden Prozesse der Aufbereitung und Materialrückgewinnung effizienter werden lassen. Das Recycling von Rotorblattmaterialien wird bislang durch eine mechanische Zerkleinerung des gesamten Verbunds und anschließenden Einsatz als Brennstoff und Sandsubstitut in der Zementindustrie verwendet oder eine thermische Verwertung in Müllverbrennungsanlagen durchgeführt.

Im Rahmen des ForCycle Projektes »Recycling von Kompositbauteilen aus Kunststoffen als Matrixmaterial« wird am Fraunhofer ICT die energetische Demontage von Rotorblättern und damit die Bereitstellung der unterschiedlichen Fraktionen und die anschließende materialspezifische Aufbereitung untersucht. Ziel des Projektes ist die Rückgewinnung von Sekundärrohstoffen zum erneuten hochwertigen Einsatz. Die technologischen Möglichkeiten zur Rückgewinnung des Fasermaterials umfassen dabei mechanische, thermische und auch chemische Prozesse. In Zusammenarbeit mit der Technischen Hochschule Nürnberg wird neben der Freilegung der Fasern aus dem Matrixmaterial auch die Rückgewinnung von diesem Harzmaterial und den Füllstoffen untersucht, um einen ökologisch und ökonomisch effizienten Recyclingprozess darzustellen. Mit einer abschließenden Bilanzierung der neuen Prozesse und Materialien sowie einem Vergleich zum Stand der Technik beim Recycling von Rotorblättern wird die Nachhaltigkeit der neuen Entwicklungen aufgezeigt.



*Stück aus einem Rotorblatt
(oben) und nach der sortenreinen
Trennung des Balsaholzes (unten)*
© Fraunhofer WKI / M. Lingnau.

*Die Rotorblätter von Windenergie-
anlagen enthalten große Volumina
sehr leichten Balsaholzes, die nach
dem Recyceln z. B. für Dämmstoffe
wiederverwertet werden können.*
© Fraunhofer WKI / P. Meinschmidt



■ Recycling von Balsaholz aus Rotorblättern zur Herstellung von Dämmstoffen

Rotorblätter von Windenergieanlagen haben eine Lebensdauer von 10 - 20 Jahren (Abbildung 1). Danach werden sie üblicherweise der Verbrennung im Zementwerk zugeführt. Eine erneute stoffliche Nutzung der Bestandteile findet nicht statt.

Ein Rotorblatt besteht bei einer Länge von 40 m und einer Masse von ca. 26 t aus etwa 24 t Glasfaserverstärktem Kunststoff (GfK), 1,3 t Balsaholz sowie 0,5 t Metall. Bei einer mittleren Dichte des Balsaholzes mit 150 kg/m^3 enthält solch ein Blatt etwa $8,5 \text{ m}^3$ wertvolles Balsaholz, das für Recyclingprozesse zur Verfügung steht. Die herausragenden stofflichen Eigenschaften des Balsaholzes sollen nach dem ersten Einsatz im Rotorblatt möglichst durch eine Kaskadennutzung einer zweiten Verwendung als Dämmstoff zugeführt werden. In einem KMU-Innovativ-Projekt des Fraunhofer-Instituts für Holzforschung WKI zusammen mit der Technischen Hochschule Nürnberg (TH Nürnberg) und sieben kleinen und mittelständischen Partnerunternehmen sollen geeignete Recycling- und Verwertungsverfahren für die anfallenden großen Balsaholzvolumina ermittelt werden.

Die Projektpartner fokussieren sich auf eine ganzheitliche Betrachtung der Recyclingkette für das Balsaholz. Dabei bearbeiten sie die Rotorblattdemontage auf dem Feld, die mechanische Materialaufbereitung und die sortenreine Trennung auf dem Recyclinghof sowie als Schwerpunkt des Projekts die Entwicklung von Verwertungsverfahren.

Demontage und Zerkleinerung der Rotorblätter

Die erneute Nutzung des Balsaholzes benötigt eine effiziente Demontage und die gezielte Heraustrennung des Sandwichmaterials. Im Rahmen des Projekts soll Wasserstrahlschneiden als das Verfahren untersucht werden, bei dem der Verschleiß am Schneidmaterial sowie die Staubentwicklung minimiert wird.

Trennung des Balsaholzes vom Glasfaserverstärkten Kunststoff (GfK)

Die Partner an der TH Nürnberg führten erste Zerkleinerungsversuche an Rotorblättern durch, bei denen die Parameter Zerkleinerungsart, Massenstrom, Partikelgrößenverteilung und Energieverbrauch genauer untersucht wurden. Erste erfolgreiche Versuche zur Trennung von Balsaholz und GfK erreichten sie mit Hilfe von Dichteunterschieden (Abbildung 2). Im weiteren Projektverlauf validieren die Forscher diese Ergebnisse großtechnisch und vergleichen sie mit anderen Verfahren, wie dem Zick-Zack-Sichter. Das zurückgewonnene Balsaholz unterzogen sie anschließend verschiedenen Siebanalysen zur Bestimmung der Partikelgröße.

Herstellung von Dämmstoffen aus Balsaholz

Für die Herstellung von Holzfaserdämmstoffen wurde das recycelte Balsaholz in einem Refiner durch einen thermomechanischen Aufschluss optimal zerfasert. Unter Verwendung konventioneller und auch neuerer Bindemittel stellten die Wissenschaftler damit verschiedene Holzfaserdämmstoffe mit Dichten von 20 bis 250 kg/m^3 her. Über den Aufschluss des Balsaholzes in einem atmosphärischen Refiner lässt sich außerdem ein Holzfaser-Wassergemisch gewinnen, das durch einen Aufschäum- und anschließenden Trocknungsprozess als druckfester Holzschaum ohne synthetische Bindemittel genutzt werden kann.

Ausblick

In weiteren geplanten Arbeiten wollen die Forscher das Balsaholz zur Herstellung leichter »Wood Polymer Composites« (WPC) nutzen, um dadurch die üblicherweise sehr hohen Dichten des WPC von ca. $1\,100 \text{ kg/m}^3$ auf die Hälfte zu reduzieren.

Eine ökologische Bilanzierung der Aufarbeitungsschritte und der Herstellungsprozesse der verschiedenen Dämmstoffe soll letztendlich zu optimalen Recyclingprozessen führen.



Beispiel für magnetisches Altmaterial.

© Fraunhofer IFAM

■ Recycling von Seltenerdmetallen und Produktionsabfällen

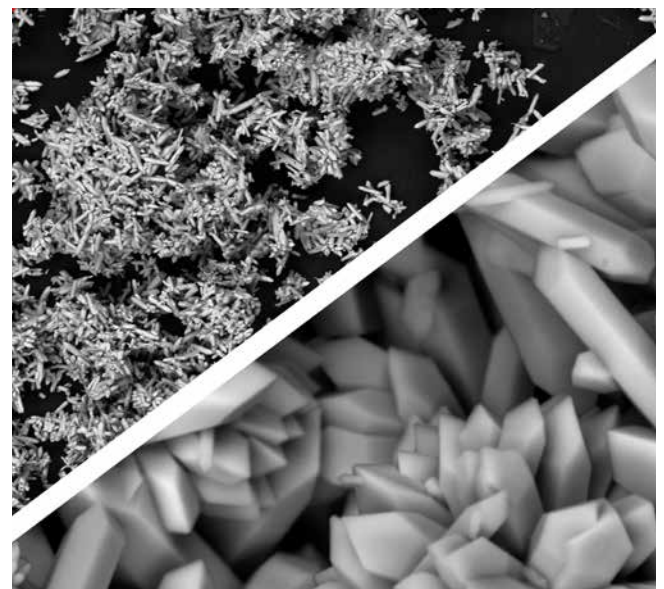
Seit der Verhängung von Ausfuhrzöllen durch China für bestimmte Rohstoffe in den Jahren 2010 und 2011 ist eine größere Unabhängigkeit von Seltenerdimporten ein wichtiges wirtschaftsstrategisches Ziel der Bundesregierung. Die drei wichtigsten Optionen zum Erreichen dieses Ziels sind die Erschließung eigener Primärlagerstätten, die Reduktion bzw. Substitution bestimmter Seltenerdelemente und die Rückgewinnung von Sekundärrohstoffen durch Recycling.

Obwohl Neodym, Praseodym und Dysprosium aufgrund ihrer Wichtigkeit zur Herstellung leistungsfähiger NdFeB-Magnete bereits heute die größte wirtschaftliche Bedeutung aller Seltenerden haben, waren die Anstrengungen für eine gezielte Rückgewinnung dieser Elemente bislang nicht ausreichend. Insbesondere existieren nur wenige vielversprechende Ansätze für eine Aufbereitung von Altmagneten und Magnetabfällen, die einerseits das volle Potenzial der bereits vorhandenen Trennung der darin enthaltenen Seltenerdelemente ausschöpfen und andererseits störende Verunreinigungen (z. B. Oxide, organische Verbindungen) abtrennen können.

An dieser Stelle setzt das am Fraunhofer IFAM Dresden entwickelte Recyclingverfahren auf hydrometallurgischer Basis für die gezielte Rückgewinnung der Elemente Neodym, Praseodym und Dysprosium aus Materialgemischen an. Dem Verfahren liegt die Idee zugrunde, dass sich durch das geschickte Ausnutzen physikalischer Zusammenhänge und durch eine optimierte Prozesssteuerung eine so hohe Gesamtselektivität erreichen lässt, dass auf eine aufwendige und teure Feintrennung der Seltenerden durch Ionentauscher oder

Flüssig-Flüssig-Extraktionsanlagen verzichtet werden kann. Für die Produktion neuer hochwertiger NdFeB-Magnete ist es jedoch unerlässlich, dass insbesondere Samarium, welches in Magnetmaterialgemischen vorhanden ist, aber auch Oxide und organische Verunreinigung abgetrennt werden.

Im Rahmen von Entwicklungsprojekten konnte gezeigt werden, dass sich diese notwendige Selektivität beim Recycling von Magnetwerkstoffgemischen im Labormaßstab insbesondere durch eine geeignete physikalische Vorbehandlung und Vorseparation sowie durch einen gesteuerten hydrometallurgischen Aufschluss realisieren lässt. Ein entsprechender Recyclingprozess wurde bereits zum Patent angemeldet.



Neodymhaltiges Produkt beim Recyclingprozess.

© Fraunhofer IFAM

Auch die Projektgruppe IWKS des Fraunhofer ISC forscht und arbeitet mit Methoden des werkstofflichen Recyclings, bei dem das Material in seiner Zusammensetzung erhalten bleibt und als wiederaufbereitetes Rezyklat zur Herstellung neuer Magnete eingesetzt wird. Eine in Deutschland einzigartige Pilotanlage zur Fertigung von Permanentmagneten im Techniksmaßstab ist im Aufbau.



Wertvolle Rohstoffe lassen sich aus verschiedensten Abfallstoffen zurückgewinnen (Beispiele: Elektroaltgeräte, Kupferschlacken, Teefasern).

© Fraunhofer-Projektgruppe IWKS



■ Effizientes Recycling und optimierte Wertstoffkreisläufe für nachhaltige Wettbewerbsfähigkeit

Ressourcenknappheit ist ein zentrales Thema für die globale wirtschaftliche und gesellschaftliche Entwicklung geworden. Eine Verbesserung des Rohstoffrecyclings und eine Optimierung des Wertstoffkreislaufes dienen deshalb nicht nur dem Schutz der Umwelt. Steigerung der Ressourceneffizienz, Recycling und Wiederverwertung von Rohstoffen nach der Nutzung sowie Substitution seltener bzw. kritischer Stoffe sind Voraussetzungen, um die Produktivität und Wettbewerbsfähigkeit des Wirtschaftsstandorts Deutschland zu erhalten.

Wertvolle Materialien wiederverwerten, kritische Rohstoffe ersetzen

Im Verbund Materials erforscht und entwickelt die Fraunhofer-Projektgruppe für Wertstoffkreisläufe und Ressourcenstrategie IWKS neue Recyclingtechnologien sowie Substitute für Roh- und Werkstoffe. Vor allem für versorgungskritische Elemente und Werkstoffsysteme soll so ein geschlossener Kreislauf im Stoffstrommanagement erzielt werden. Hierfür werden Konzepte zur nachhaltigen Nutzung von Wert- und Reststoffen aus der Glasherstellung, der Müllverbrennung sowie der industriellen Produktion entwickelt und umgesetzt. Im Fokus der Forschungsarbeiten stehen Glas, Schlacken und Aschen, Biowerkstoffe und Lebensmittel sowie die Wiederverwertung sonstiger Materialien aus Produktionsrückständen und ehemaligen Konsumgütern.

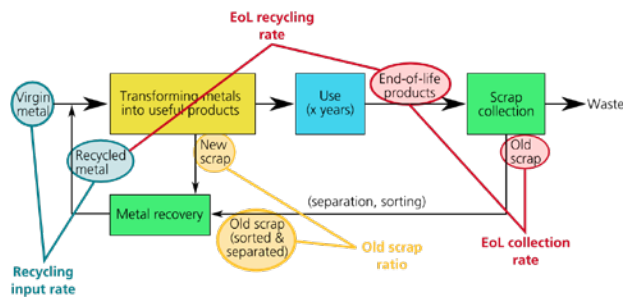
Ein weiterer Schwerpunkt ist die Verfügbarkeit, das Recycling sowie die Substitution von Rohstoffen in elektronischen Bauteilen, Komponenten und Geräten. Im Fokus stehen Stoffstromanalysen von Recyclingprozessen, Analysen und Bewertung elektronischer Geräte sowie die Entwicklung neuartiger Zerkleinerungs- und Sortierverfahren. Das Hauptaugenmerk liegt hierbei auf der Entwicklung von innovativen Prozessketten und der Schließung von Wertstoffkreisläufen, beispielsweise von Elektroschrott.

Im Bereich der Biowerkstoffe und Lebensmittel sind besonders Kompositwerkstoffe, Cellulosefasern, die Verwertung von Lebensmittelresten und Nachhaltigkeitszertifizierungen von Bedeutung. In Forschungsk Kooperationen werden Analyse-, Vorbehandlungs- und Recyclingverfahren für Naturfasern entwickelt, Wertschöpfungsketten zu Biophenolen untersucht und die Ressourceneffizienz von kleinen und mittleren Unternehmen der Lebensmittelbranche verbessert.

Konkrete Strategien entwickeln und umsetzen

Die Fraunhofer-Projektgruppe IWKS unterstützt Unternehmen mit einem umfassenden Know-how zu Kritikalitätsanalysen, zu Märkten, Trends und Technologien, die wichtig für sinnvolles Recycling und einen erfolgreich funktionierenden Wertstoffkreislauf sind. Methodisch erstreckt sich das Beratungskonzept von der Situationsanalyse über die Strategieentwicklung bis hin zu Maßnahmen- und Umsetzungskonzepten. Der Nutzen für die beauftragenden Unternehmen besteht darin, gemeinsam mit den Wissenschaftlern sowohl strategische wie auch technologische oder organisatorische Empfehlungen zu erarbeiten und umzusetzen. Grundlagen sind unter anderem Konzept- und Machbarkeitsstudien, Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen, Systemanalysen zur Steigerung der Rohstoff- und Energieeffizienz, Optimierung des Abfall- und Ressourcenmanagements und Verbesserung aller relevanten Prozessschritte entlang der Wertschöpfungskette. Neue Wertstoffkreisläufe können so definiert und umgesetzt werden.





Vereinfachter Kreislauf für Metalle und Qualität (grün-gelb-rot)
von Recycling-Indikatoren ohne dynamisches Stoffflussmodell.
© Fraunhofer ISI / Projekt POLINARES

■ Sicherheit der Rohstoffversorgung bewerten und verbessern

Eine verlässliche Rohstoffversorgung ist unabdingbar für die EU und insbesondere für den Industriestandort Deutschland. Um angemessen auf die Herausforderungen der internationalen Rohstoffmärkte reagieren zu können, sind ein umfassender Überblick sowie eine Bewertung potenzieller Lösungen notwendig. Ein wichtiger Schritt bei der Erfassung und Bewertung der Herausforderungen ist die Identifikation kritischer Rohstoffe, bei denen sowohl die Versorgungsrisiken als auch die Folgen einer mangelnden Versorgung als hoch angesehen werden. Insbesondere auf EU-Ebene hat das Fraunhofer ISI diesen Identifikationsprozess unterstützt, indem es 2010 und 2014 entscheidend an der Erstellung der Listen kritischer Rohstoffe für die EU mitwirkte. Diese Analysen hatten – und haben noch – nicht zuletzt über die EU-Forschungsförderung einen wichtigen Einfluss auf das Handeln der EU zur Verbesserung der Rohstoffversorgung.

Auch zukünftige Entwicklungen sind wichtig für eine erfolgreiche Positionierung am Markt. Das Fraunhofer ISI unterstützt diese Positionierung mit Studien zu Rohstoffbedarfen von Zukunftstechnologien, mit der Erstellung von (Technologie-) Roadmaps sowie mit Modellierungswerkzeugen, die Effizienzsteigerungen, Substitution, Recycling und den Beitrag primärer Rohstoffe berücksichtigen. Damit lassen sich nicht nur die Wirkungen einzelner Entwicklungen abschätzen, sondern auch multiple Facetten der Rohstoffgewinnung und -nutzung betrachten. Dazu zählen beispielsweise Miniaturisierung und Recyclingtechnologien sowie neue Materialien und Produkte, die teilweise der Substitution dienen, weiterhin die dazugehörigen politischen Vorgaben. Indem das Fraunhofer ISI mit seinen Auftraggebern für jedes Projekt die wichtigsten Forschungsfragen festlegt, kann es Regierungen, Industrieverbänden und einzelnen Unternehmen die jeweils relevanten Informationen und darauf aufbauende Analysen bereitstellen.

■ Dynamische Modellierung anthropogener Stoffkreisläufe

Mit der dynamischen Stoffflussmodellierung, angewandt auf globale sowie regionale und nationale Stoffflüsse, lässt sich die materielle Basis moderner Volkswirtschaften besser verstehen, bewerten und optimieren. Insbesondere im Hinblick auf die Erhaltung endlicher Ressourcen können dynamische Stoffflussmodelle auf der Basis historischer Daten helfen, lohnende Ansätze für Verbesserungen von Recyclingsystemen zu identifizieren. Für den Fall Kupfer hat das Fraunhofer ISI im Auftrag der Industrie sowohl ein globales als auch regionale Modelle entwickelt, mit denen fundierte Aussagen zu Kupferbeständen und -recycling weltweit und in ausgewählten Regionen möglich sind. Die Ergebnisse aus dem globalen Modell werden jährlich von der International Copper Study Group (ICSG) im Standardwerk »World Copper Factbook« veröffentlicht.

Mit ihrer soliden Systembeschreibung und plausiblen Zukunftsszenarien sind dynamische Stoffflussmodelle auch eine wichtige Informationsquelle für strategische Entscheidungen. Im Fraunhofer-Leitprojekt »Kritikalität Seltener Erden« beispielsweise schätzen die Forscher mit einem globalen und einem deutschen Modell sowohl die erwartete Nachfrage nach Neodym und Dysprosium differenziert nach Sektoren und Produktgruppen als auch ihr zukünftiges Aufkommen in Produktionsabfällen und Altprodukten ab. Diese Abschätzungen unterstützen Entscheidungen für Technologieentwicklung (In welchen Bereichen können größere Einsparungen durch effizientere Technologien oder alternative Materialien erzielt werden?), notwendige Erfassungssysteme (Welche Altprodukte sollen zukünftig in welchen Mengen gesammelt werden?) sowie Investitionen in (Recycling-)Anlagen (Welche Anlagentypen und -kapazitäten werden benötigt?).

Herstellung einer neuen Magnetlegierung im Lichtbogenofen.

@ Fraunhofer-Projektgruppe IWKS



■ Substitution kritischer Rohstoffe – Neue Permanentmagnete für die Energiewende

Die Fraunhofer-Projektgruppe für Wertstoffkreisläufe und Ressourcenstrategie IWKS des Fraunhofer ISC hat sich zum Ziel gesetzt, mit ihren Forschungsarbeiten zur Sicherung wirtschaftsstrategisch bedeutender Rohstoffe für Deutschland beizutragen. Die Verfügbarkeit von strategischen Metallen wie zum Beispiel die Metalle der Seltenen Erden rückt immer mehr in den Mittelpunkt von Politik und Industrie. Mithilfe von neuen Ansätzen zu Rohstoffstrategien, zum Recycling und zu möglichen Substitutionsmaterialien können die Kosten in der Produktion verringert, die Versorgungssicherheit verbessert und auch ein entscheidender Beitrag zur Schonung der Umwelt geleistet werden.

Insbesondere in Hochleistungsmagneten spielen Metalle der Seltenen Erden eine bedeutende Rolle. Neodym-Eisen-Bor-Magnete haben die mit Abstand höchste Energiedichte aller derzeit bekannten Dauermagnete und machen weltweit zwei Drittel des Marktumsatzes aus. Sie werden beispielsweise in kleinsten Mengen in Lautsprechern und Festplatten sowie in Windkraftanlagen (> 600 kg/MW) eingesetzt. Im Automobilsektor steigt der Bedarf insbesondere im Hinblick auf die zunehmende Zahl an Hybrid- und Elektrofahrzeugen. Daher bilden diese Magnetsysteme einen wesentlichen Arbeitsschwerpunkt der Projektgruppe IWKS. Ein Hauptfokus liegt in der Substitution der als kritisch eingestufteten Metalle. Auf Basis von Simulationen werden theoretische Vorhersagen und Vorschläge neuartiger, ferromagnetischer Phasen ohne Neodym (Nd) und Dysprosium (Dy) bei gleichwertigen magnetischen Eigenschaften erstellt. Die Vorhersagen dienen als Grundlage

zur Synthese neuer Magnetwerkstoffe. Hierzu kann die Fraunhofer-Projektgruppe IWKS auf einen modernen Gerätepark und unterschiedlichste Syntheserouten zurückgreifen; dazu zählen der Lichtbogenofen, das Verfahren der Rascherstarrung und das Sintern. Neueste Verfahren zur Herstellung von Hochleistungsmagneten zielen u. a. auf nanokristalline Gefüge ab, z. B. durch Heißpressen und Heißumformen.

Neben der reinen Substitution von Werkstoffen spielt der effiziente Einsatz von Rohstoffen eine ebenso große Rolle. Durch Entwicklung von Herstellungsverfahren zur endkonturnahen Formgebung kann auf aufwendige und damit materialintensive Nachbearbeitung verzichtet und damit effektiv Material eingespart werden. Zudem wird in der Projektgruppe IWKS an der Optimierung der Mikrostruktur gearbeitet, um besonders kritische Elemente wie Dy im Gefüge gezielter zu verteilen, vor allem an den Stellen, wo es die Eigenschaften des Magneten optimal beeinflusst. Durch diese Maßnahmen kann der Einsatz von Dy auf bis zu 50 Prozent reduziert werden.

Welche Branchen profitieren?

Hochleistungsmagnete spielen vor allem im Bereich der Generatoren und Elektromotoren eine herausragende Rolle. So profitieren insbesondere Elektromobilität, Automobilindustrie sowie Windkraftanlagen von besser verfügbaren Ersatzmaterialien. Für diese Technologien wird zukünftig ein großes Wachstum prognostiziert, wodurch auch eine enorme Steigerung des Bedarfs an Nd und Dy zu erwarten ist. Auch in der Elektro- und Computerindustrie sowie in der Medizin sind Hochleistungsmagnete von großer Bedeutung. Unsicherheiten in der Rohstoffversorgung könnten den Ausbau von Zukunftstechnologien bremsen.



Abbildung 1: NIR-Sortieranlage zur Bestimmung von organischen Holzschutzmitteln.

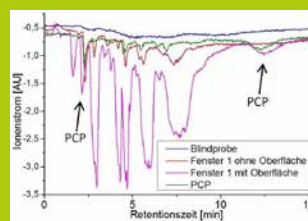
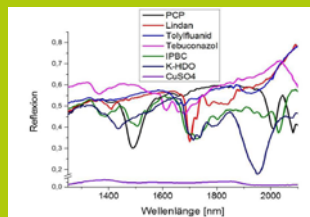


Abbildung 2: GC-FAIMS und dazugehöriges Spektrum, das die Detektion von PCP in behandelten Holzfenstern vor und nach der Oberflächendeckung zeigt.



■ Molecular Sorting für das Recycling von Altholz

Die steigende Nachfrage nach Frischholz sowie die vermehrte Nutzung von Brennholz führen derzeit zu abnehmenden Holz-mengen in ganz Europa. Daher wird die Nutzung von »Altholz« für die europäische Holzwerkstoffindustrie immer wichtiger.

Die stoffliche Nutzung von ca. 8 t/a Altholz findet in Deutschland derzeit fast ausschließlich in der Spanplattenindustrie statt. Länder wie Italien erhöhten ihren Altholzanteil in Spanplatten inzwischen bis über 90 Prozent.

Gründe für die geringe Nutzung in Deutschland sind Einschränkungen durch die Altholzverordnung sowie die vorhandenen hohen Verbrennungskapazitäten für die Erzeugung von Energie. Im Rahmen des Projekts »Molecular Sorting« entwickelte das Fraunhofer WKI gemeinsam mit Partnern Verfahren und Technologien, um die abtrennbare und stofflich nutzbare Menge der reinen Holzfraktion zukünftig deutlich zu steigern. Die entwickelten Detektions- wie auch Zerkleinerungs-, Trenn-, Sortier- und Aufreinigungsverfahren helfen dabei, die Sortenreinheit der gewonnenen Produkte deutlich zu verbessern.

Techniken zur Detektion und Sortierung auf molekularer Ebene

Am Fraunhofer WKI entwickelten die Mitarbeitenden für den »Demonstrator Altholzkaskade« verschiedene Detektionstechniken auf molekularer Ebene weiter und testeten diese. Zu den Detektionstechniken gehören die Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA), die Nahinfrarotspektroskopie (NIRS) und die Field Asymmetric Ion Mobility Spectrometry (GC-FAIMS).

Mit der RFA können schnell und zuverlässig Aussagen über Art und Menge anorganischer Holzschutzmittel wie auch über verschiedene Beschichtungen gemacht werden. Mit der Nahinfrarotspektroskopie (NIRS) werden die Molekülschwingungen nach der Absorption der einfallenden Infrarotstrahlung erfasst

(Abbildung 1). So lassen sich einfach und sicher verschiedenste Kunststoffe und viele organische Holzschutzmittel detektieren.

Die Ionenmobilitätsspektrometrie (IMS) kann zur Analyse verdampfbarer ionisierbarer Stoffe eingesetzt werden (Abbildung 2). Reicht der IMS-Trenneffekt nicht aus, um komplexe organische Holz- oder auch Holzschutzmittelstoffe ausreichend zu trennen, so lässt sich die Methode mit der Gaschromatographie koppeln (GC-FAIMS).

Erkennung von Holzschutzmitteln

Viele organische Holzschutzmittel ließen sich sowohl mit der NIRS wie auch mit der GC-FAIMS-Technologie detektieren. Insbesondere bei NIRS wurden die Wirkstoffe oft nicht direkt analysiert, sondern die geänderte Struktur der Cellulose, Hemicellulose und des Lignins. Ebenso konnten die Wissenschaftler den Einfluss der Holzfeuchte und des bei der Behandlung verwendeten Lösemittels nachweisen.

Die mit GC-FAIMS untersuchten Holzschutzmittelwirkstoffe zählen zur Gruppe der SVOC und besitzen vergleichsweise niedrige Dampfdrücke. Sie verdampfen bereits bei 80 °C in ausreichenden Mengen, um sie nachweisen zu können. Basierend auf dieser Grundlage konnten Holzschutzmittel wie PCB (Abbildung 2), Dichlofluorid und Lindan detektiert werden. Darüber hinaus konnten die Projektbeteiligten zeigen, dass durch das Abtragen einer 5 mm starken Oberflächenschicht von Holzfensterrahmen die Holzschutzmittelwirkstoffe entfernt werden konnten.

Ausblick

Mithilfe der drei beschriebenen Detektionstechniken, die auf molekularer Ebene chemische Verbindungen detektieren, konnten die Wissenschaftler sowohl anorganische als auch organische Holzschutzmittel, Biozide und auch verschiedene Kunststoffe nachweisen. Eine deutlich höhere Altholz-Recyclingquote ist damit auch in Deutschland denkbar.



Fraunhofer-Expertise zur Sortierung von heterogenem Bauschutt, um homogene Bauprodukte und Sekundärrohstoffe herzustellen.
© Fraunhofer IBP

■ BauCycle

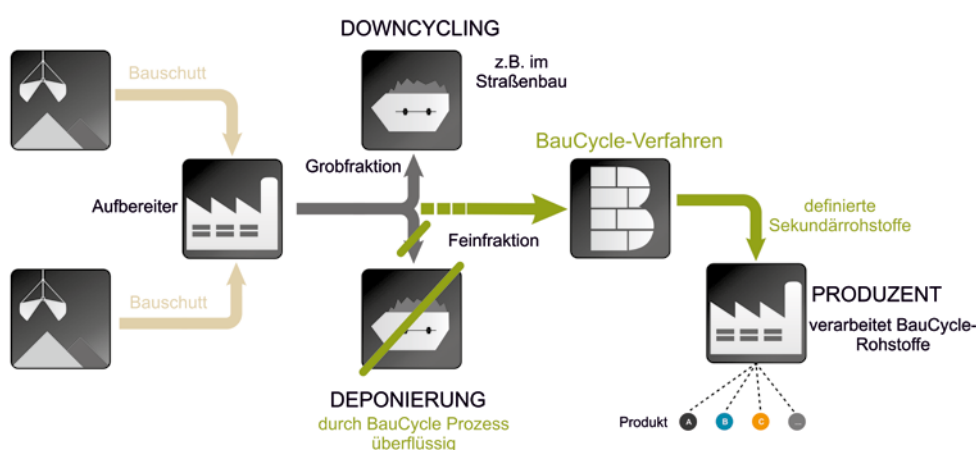
Wie Sand am Meer. Diese Redewendung hat ihre Gültigkeit verloren, denn der wertvolle Rohstoff schwindet in vielen Ländern dieser Erde. Ein Grund dafür ist der Bauboom. Hierfür werden Unmengen an Beton benötigt werden, welche zum Großteil aus Sand und Kies bestehen. Der weltweite jährliche Verbrauch an Sand und Kies liegt bei 40 Milliarden Tonnen. In Deutschland fallen jährlich fünf Millionen an feinkörnigem Bauschutt an. Bislang landet dieser auf Deponien oder wird im Straßenbau verwendet. Im Projekt »BauCycle« haben es sich daher verschiedene Fraunhofer-Institute (IBP, IML, UMSICHT, IOSB) zur Aufgabe gemacht, den Bauschutt wieder aufzubereiten und aus dem Sand-Kies-Gemisch einen nachhaltigen Wertstoff zu generieren. Ziel ist es, Partikel mineralischer Bauabfälle wiederzuverwerten, die kleiner als zwei Millimeter sind. Im Projekt behandeln die Forscherinnen und Forscher die komplette Wertschöpfungskette – von der Entwicklung innovativer Sortierverfahren über die Entwicklung hochwertiger Baustoffe bis hin zum Aufbau einer dynamischen Marktplattform, einer Rohstoffbörse.

Im Idealfall lassen sich vier reine Mischungen wiederverwerten und beispielsweise für die Herstellung von Porenbeton nutzen, einem leichten Baustoff mit guter Wärmedämmung. Dieser eignet sich für den Bau zweistöckiger Häuser, aber

auch als Isoliermaterial in Innenräumen. Tests ergaben, dass Mischungen aus Beton und Kalksandstein ebenfalls wiederverwertbar sind und sich als sekundärer Rohstoff für die Produktion von Porenbeton eignen. Beste Ergebnisse erzielten die Experten mit einem Mix aus 80 Prozent Kalksandstein und 20 Prozent Altbeton. Ein weiteres Ergebnis des Projekts: Aus den Komponenten Ziegel und Altbeton lassen sich Geopolymere herstellen, ein zementfreier Baustoff mit betonähnlichen Eigenschaften hinsichtlich der Festigkeit und Säureresistenz. Zudem zeichnen sich die Geopolymere durch eine sehr gute CO₂-Bilanz aus.

Neben Proben aus unterschiedlichen Porenbetonmischungen konnten die Forscherinnen und Forscher Fassadenplatten aus Geopolymeren sowie den Prototyp einer schallabsorbierenden Platte mit einer offenen Porosität herstellen, die aus Granulaten gefertigt wurden. In Tests wies die Lärmschutzwand aus sekundären Rohstoffen die gleichen schallabsorbierenden Eigenschaften wie am Markt verfügbare Produkte auf.

Das Fraunhofer IBP zeigt sich im Projekt »BauCycle« verantwortlich für die Verwertung des sortierten Bauschutts. Dabei werden neben klassischen Betonanwendungen auch funktionale Bauteile, wie Schallschutzelemente sowie zementfreie Bindemittel entwickelt.

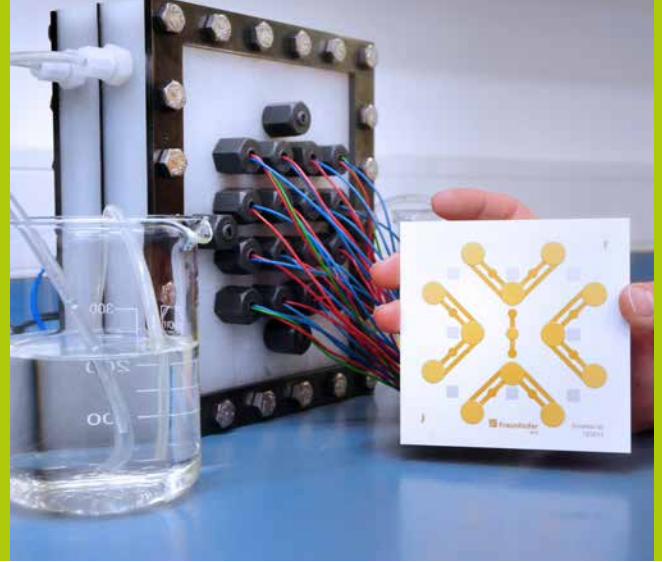


BauCycle-Prozess
© Fraunhofer IBP



Aufbereitungsmodul mit integrierten Ultraschallsensoren zur vollständigen Entfernung von Medikamentenrückständen.
© Fraunhofer IKTS

Prof. Bernd Meyer entwickelt einen neuen Vergasungsreaktor, der kohlenstoffhaltige Abfälle sauber verwertet und daraus Synthesegas erzeugt.
© TU Bergakademie Freiberg/IEC



■ Pilotanlage CarbonDemonstration: Aus Abfall wird Rohstoff

Klimaschutz und Energiewende bedeuten für die deutsche Industrie einen Strukturwandel, der weit mehr umfasst als das Ende der Verstromung fossiler Energieträger. So besteht ebenfalls das Ziel, die gesamte Rohstoffversorgung der Industrie so weit wie möglich aus nachhaltigen Quellen zu bestreiten. Das Fraunhofer IMWS arbeitet deshalb gemeinsam mit Partnern daran, eine Aufarbeitungsanlage für kohlenstoffhaltige Reststoffe und Kunststoffabfälle aufzubauen, deren Produkte als Rohstoff für die chemische Industrie zur Verfügung stehen. Damit wird eine emissionsarme Kohlenstoff-Kreislaufwirtschaft möglich.

Die Fraunhofer-Pilotanlage CarbonDemonstration soll nach einer Planungsphase ab 2021 inmitten des mitteldeutschen Chemiedreiecks am Standort Leuna entstehen. Sie produziert Synthesegase aus Plastikmüll und ersetzt damit Erdöl als Ausgangsstoff der chemischen Industrie. Kern der zugrundeliegenden Konversionstechnik ist ein Prozess, in dem kohlenstoffhaltige Roh- und Reststoffe mit Sauerstoff und Wasserdampf unter Wärmeentwicklung bei Temperaturen über 1000 °C behandelt werden. Durch das zusätzliche Hinzufügen von Wasserstoff kann nach weiterer Aufbereitung und Aufreinigung ein nachhaltiges Synthesegas gewonnen werden. Die Versorgung mit Wasserstoff und Sauerstoff erfolgt durch die derzeit ebenfalls in Leuna entstehende Elektrolyseplattform: Dort werden diese Elemente unter Einsatz von Strom aus erneuerbaren Energien mittels Elektrolyse erzeugt.

Die Pilotanlage leistet damit letztlich chemisches Recycling und schließt den Kohlenstoffkreislauf: Kohlenstoff wird nicht verbrannt, um dann als CO₂ die Umwelt zu belasten, sondern für andere Stoffverbindungen genutzt. Planung und Betrieb des Projekts werden vom Fraunhofer-Leistungszentrum Chemie- und Biosystemtechnik koordiniert.

■ Vollständige Beseitigung von Spurenstoffen aus Abwässern

Medikamentenrückstände in Abwässern stellen die kommunale Wasseraufbereitung vor neue Herausforderungen. Sie können mit konventioneller Klärwerks- und Wasseraufbereitungstechnik meist nur schwer entfernt werden. Mit Hilfe elektrochemischer Verfahren lassen sich Medikamentenrückstände allerdings vollständig abbauen. Diese werden dabei an der Anode einer Elektrolysezelle elektrochemisch umgesetzt, so dass am Ende nur noch Kohlendioxid übrig bleibt. Allerdings sind die bisher verwendeten Anoden aus bordotiertem Diamant extrem teuer.

Um die Elektroden deutlich preiswerter zu fertigen und die Abbauraten zu steigern, verfolgt das Fraunhofer IKTS zwei Ansätze. Zum einen wurden edelmetallfreie halbleitende Mischoxidphasen als alternatives Anodenmaterial entwickelt. Zum anderen wird das Abwasser mittels Ultraschall zum Schwingen angeregt, um den Stofftransport an der Elektrode zu intensivieren und somit noch größere Abbauraten zu realisieren. Das wird erreicht, indem durch den Ultraschall die Dicke der sogenannten Diffusionsschicht auf der Anode minimiert wird. Die Schicht wirkt als eine Art Reaktionsbarriere und verlangsamt somit deren Zerstörung.

Nicht nur die Verfahrenskombination ist raffiniert, sondern auch der Aufbau des entsprechenden Elektroden-Sonotroden-Moduls. Der innovative Ansatz besteht darin, die Ultraschallsensoren direkt auf die keramische Elektrode zu drucken, so dass diese selbst wie eine Feder in Schwingung versetzt wird. Damit verbessert sich der Stofftransport zur Elektrode enorm.

Das Elektroden-Sonotroden-Modul soll künftig auch in anderen Sektoren eingesetzt werden, wie zur Zerstörung von Nitroaromaten, Weichmachern, Herbizidrückständen oder anderen toxischen Stoffen in gewerblichen Abwässern.



Elektrochemisches Prozesslabor.
© Fraunhofer ISC



Elektrohydraulische Zerkleinerungsanlage im Technikum der Projektgruppe IWKS zur phasenselektiven Auftrennung von Recyclinggut.
© ImpulsTec GmbH

■ Energiespeicher – von der Materialentwicklung bis zur Wiederverwertung

Die effiziente und sichere Speicherung von elektrischer Energie ist eine große technische Herausforderung und eine wichtige Voraussetzung für den nachhaltigen Erfolg portabler und stationärer Energieversorgungssysteme, wie sie beispielsweise für den Ausbau der regenerativen Energienutzung und der Elektromobilität benötigt werden. Dabei spielen die Entwicklung neuer Materialien für Hochleistungsbatterien und die Erarbeitung leistungsfähiger Batteriekonzepte eine wichtige Rolle. Darüber hinaus gibt es bei etablierten kostengünstigen Systemen wie der Blei-Säure-Batterie großes Potenzial für die stationäre Energiespeicherung und Automotive (Start-Stop-Automatik und Mild-Hybrid-Fahrzeuge) durch Verbesserung der Langlebigkeit und Leistungsfähigkeit, z. B. bei dynamischer Lastaufnahme und im teilgeladenen Zustand. Zusätzlich gewinnen im Sinne einer effizienten Rohstoffnutzung intelligente Recyclingverfahren bzw. die Weiterverwendung bestimmter Komponenten (»second life«) an Bedeutung. Mit dem Zentrum für Angewandte Elektrochemie ZfAE und der Projektgruppe für Wertstoffkreisläufe und Ressourcenstrategie IWKS des Fraunhofer ISC stehen im Fraunhofer-Verbund Materials kompetente Ansprechpartner rund um die Aspekte der Energiespeicher zur Verfügung.

Batteriematerialien und -komponenten

Im Bereich der Materialforschung liegen die Schwerpunkte in der Entwicklung von Komponenten für Energiespeicher der aktuellen und der nächsten Generation sowie Verfahren zu deren Herstellung und Verarbeitung bis zum Technikumsmaßstab für elektrochemische Energiespeichersysteme wie:

- Lithium-Ionen-Batterien (LIB) – u. a. Modifizierung von Hochenergiekathoden (Lithium-reiche Schichtoxide)
- und -anoden (Silizium-basiert), Festelektrolyte
- Metall-Luft-Batterien – u. a. Katalysatorentwicklung, Grenzflächendesign

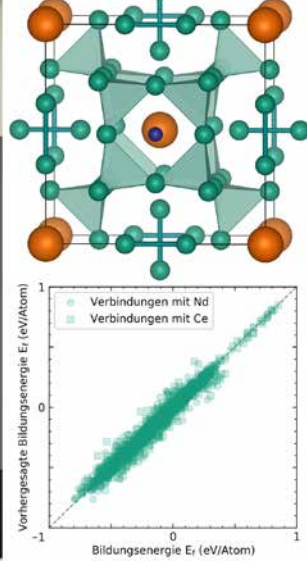
- Blei-Säure-Batterien – u. a. Additive für die Elektrodenmassen
- Festkörperbatterien
- Doppelschichtkondensatoren – LIB-Superkondensator
- Natrium-basierte Technologien – u. a. Natrium-Luft-Zellen

Materialcharakterisierung und Test

Die Leistungsfähigkeit und Beständigkeit der Batteriekomponenten und -systeme wird in einer hervorragend ausgestatteten elektrochemischen Testumgebung untersucht. So können unter anderem an über 200 Kanälen Batterielade- und -entladezyklen vom Femto- bis in den Kiloampere-Bereich bei kontrollierten Klimabedingungen durchgeführt werden. Alterungsprozesse, die zu einer Verringerung der Leistungsfähigkeit führen, können so unter definierten Bedingungen nachgestellt und für die Materialoptimierung genutzt werden. Eine spezialisierte Post-mortem-Analytik sowie die nach DIN EN ISO / IEC 17025-2005 akkreditierte Elektronenmikroskopie mit einem einzigartigen Mikrolabor im Rasterelektronenmikroskop ermöglichen präzise Analysen auf Mikro- und Nanoebene.

Batterierecycling

Für das materialgerechte und energieeffiziente Recycling von elektrochemischen Energiespeichern, insbesondere von Lithium-Ionen-Batterien, werden im Verbund Materials bei der Projektgruppe IWKS neue intelligente Verfahren entwickelt. Dabei kommt einer sicheren und effizienten Zerkleinerung und Trennung in die einzelnen Komponenten eine besondere Bedeutung zu. Die Materialien sollen dabei nicht nur elementar, sondern möglichst in Form der bereits synthetisierten Verbindungen wiedergewonnen werden. Anforderungen an die Verfahren sind die gleichwertige oder sogar verbesserte Funktion der recycelten Materialien, die Kostenneutralität gegenüber herkömmlichen Ausgangsmaterialien sowie höhere Umweltfreundlichkeit und Wirtschaftlichkeit gegenüber gängigen metallurgischen Verfahren.



cerenergy® – Umweltfreundliche und kostengünstige Hochtemperaturbatterien zur stationären Energiespeicherung.
© Fraunhofer IKTS

Mithilfe des Tools »MagnetPredictor« können magnetische Materialeigenschaften von Kombinationen aus Seltenerd-Elementen, Übergangsmetallen und anderen Elementen vorhergesagt werden. © Fraunhofer IWM



■ Materialeigenschaften-Vorhersage mithilfe Maschinellen Lernen

Es sind unendlich viele Möglichkeiten: Wird ein winziger Bestandteil eines Materials mit einem anderen Element ausgetauscht, kann dies die Materialeigenschaften grundlegend verändern. Dennoch gehorchen die resultierenden Eigenschaften physikalischen Zusammenhängen die es ermöglichen, Materialien auf gesuchte Eigenschaften hin »abzuklopfen« – mit dem bisher üblichen »Trial and Error«-Verfahren ein ungeheuer aufwändiges Unterfangen.

Ein vom Fraunhofer IWM entwickeltes Machine-Learning-Tool eröffnet nun die Möglichkeit, beispielsweise zur Magnetentwicklung ferromagnetische Kristalleigenschaften von Materialzusammensetzungen einfach und schnell vorherzusagen. Gesucht werden Permanentmagnet-Materialien für Elektroautos und Windräder mit weniger Seltenerdmetall-Anteilen. Die Hochdurchsatz-Simulationsmethode »MagnetPredictor« überprüft systematisch eine Vielzahl denkbarer Material-Varianten auf Fragen wie »Eignen sich diese Materialien für Permanentmagnete?« Der Ansatz liefert vielversprechende Zusammensetzungen und verringert so die Anzahl experimenteller Untersuchungen. Die dazu benötigten Informationen sind überschaubar: Die Kristallstruktur des Materials sowie enthaltene chemische Elemente. Die Ergebnisse wurden an bekannten Magnetmaterialien überprüft: Die Simulation bestimmt die Magnetisierung und die magnetische Anisotropie eines neuen Materials treffsicher. Das Verfahren funktioniert nicht nur für magnetische, sondern prinzipiell auch für andere Materialeigenschaften.

Darüber hinaus ist es möglich, das Vorgehen quasi rückwärts einzusetzen und Mindestanforderungen an ein Wunschmaterial anzugeben. Zum Beispiel Magnetisierung und »lieber preisgünstiges Kupfer als kritisches Kobalt«. Ein Optimierungsalgorithmus liefert dann die bestmögliche elementare Zusammensetzung des Materials im Rahmen des »maschinell gelernten« Materialmodells.

■ cerenergy® – Umweltfreundliche und kostengünstige stationäre Energiespeicher

Der Übergang zu einer modernen und nachhaltigen Energieversorgung ist eine der zentralen Aufgaben im 21. Jahrhundert. Dabei erfordern der weltweit wachsende Energiebedarf und die stetige Zunahme von Spitzenlasten zuverlässige Lösungen. Klassische und erneuerbare Stromerzeugung werden durch kostengünstige Energiespeicher zusammenwachsen und langfristig bezahlbare Versorgungssicherheit bieten. Die am Fraunhofer IKTS entwickelte Hochtemperaturbatterie cerenergy® wurde durch modernste keramische Verfahren auf niedrige Kosten und gute Herstellbarkeit in Serie optimiert.

Batterien auf Basis von Natrium-Nickelchlorid tauchten bereits in den 1980er Jahren für Anwendungen in Elektrofahrzeugen auf. Wissenschaftler des Fraunhofer IKTS haben diese Technologie nun wieder aufgegriffen und im Kontext einer stationären Energieversorgung, die nach kostengünstigen, langlebigen und zuverlässigen Lösungen sucht, neu bewertet. Auszeichnend für Batterien dieser Art ist der ausschließliche Einsatz einheimischer Rohstoffe und Metalle wie Nickel, Aluminiumoxid und Kochsalz. Damit sind diese Batterien ökologisch nachhaltig. Den Forschern ist es zudem gelungen, die Kosten erheblich zu senken. Der Schlüssel für diese bemerkenswerte Entwicklung liegt im Kern der Hochtemperaturbatterien, den keramischen Elektrolyten aus Beta-Aluminat, deren Design und Herstellung maßgeblich Kosten und Funktion der Technologie bestimmen. Mit der am Fraunhofer IKTS verfügbaren keramischen Fertigungs- und Syntheseroute wird die Aufbereitung des keramischen Pulvers bis hin zur Prozessierung des Beta-Aluminats realisiert und eine vollkeramische Großserientechnologie für die zeitgemäße Energiespeicherung geboten.



Redox-Flow-Batterie.

© Fraunhofer ICT

■ Redox-Flow-Batterien zur Speicherung erneuerbarer Energie

Die Energie, die Sonne und Wind liefern, korrespondiert zeitlich häufig nicht mit dem benötigten Verbrauch. Deswegen ist besonders bei Großanwendungen die Speicherung elektrischer Energie zu einer der großen Herausforderungen der Energietechnik geworden. Eine bessere Anpassung vorzuhaltender Reserven an die Bedarfsentwicklung wird besonders dann wirtschaftlich möglich, wenn dezentrale Speicher eingesetzt werden, die kostengünstige Batteriekapazität bereitstellen können.

Redox-Flow-Batterien besitzen eine individuelle Skalierbarkeit von Leistung und Energie und ermöglichen die dezentrale Energiespeicherung im Bereich von einigen Kilowatt bis mehreren Megawatt. Die Vorteile dieses Batterietyps sind die große und flexible Speicherkapazität, potenziell niedrige Speicherkosten sowie eine lange Lebensdauer. Als Stand der Technik speichern heute Bleiakkus die überschüssige Energie. Diese halten jedoch nur eine begrenzte Zyklenzahl und müssen meist nach drei bis fünf Jahren ausgetauscht werden. Redox-Flow-Batterien haben je nach Batteriechemie eine vergleichbare Energiedichte, ihre Lebensdauer beträgt jedoch ein Mehrfaches der eines Bleiakкумуляtors.

Das Verfahren der Redox-Flow-Batterien beruht auf dem Prinzip der Speicherung von chemischer Energie in Form von gelösten Redox-Paaren in externen Tanks. Die Stromwandlung erfolgt in einem getrennten Leistungsmodul. Den Elektroden wird während der Entladung kontinuierlich der umzusetzende gelöste Stoff aus den Vorrattanks zugeführt und das entstehende Produkt in den gleichen Behälter wieder abgeführt. Zum Laden wird nur die Stromrichtung umgedreht. Da die Speicherkapazität im Wesentlichen von der Menge an Elektrolytlösung bestimmt wird und der Wirkungsgrad bei über 75 Prozent liegt, ist dieser Speichertyp interessant für einen Stundenspeicher in einer Großanwendung von einigen Megawatt.

Am Fraunhofer ICT werden seit 2006 Redox-Flow-Batterien entwickelt und erforscht. Im Bereich Materialien konzentriert

sich die Forschung auf die Wirkmaterialien wie Elektrolytformulierungen sowie die Modifikation von Elektroden- und Membranmaterialien. Um Zellstapel günstiger herstellen zu können, werden am Fraunhofer ICT Hochleistungs-Kohlenstoff-Polymer-Komposite für elektrische Stromableiter, sogenannte Bipolarplatten, entwickelt. Diese Materialien sind neben den Membranen die derzeitigen Kostentreiber einer Flow-Batterie. Zusätzlich werden Verfahren entwickelt, Materialien zu charakterisieren und zu klassifizieren. Damit lassen sich unterschiedliche Redox-Flow-Batterien und deren Materialien in einem Aufbau vergleichen, um so die Vor- und Nachteile der jeweiligen Systeme herausarbeiten zu können.

Die praktische Einbindung einer Redox-Flow-Batterie als Speicher fluktuierender Energien aus Wind- oder Photovoltaikparks in ein existierendes Stromnetz ist die Zielsetzung des Großprojektes RedoxWind. Hierzu wird auf dem Instituts-Campus eine Redox-Flow-Batterie mit einer Leistung von 2 Megawatt und einer Speicherkapazität von 20 MWh entwickelt. Als Stromlieferant wird ein 2 Megawatt Windrad mit 100 Meter Nabenhöhe direkt neben der Großbatterie aufgebaut. Dieses System wird ins Netz des Campus integriert und dient der Versorgung von verschiedensten Verbrauchern.

Erreichte Fortschritte des Fraunhofer ICT gegenüber dem Stand der Technik:

- Modulareres Konzept eines Großspeichers im Megawatt / Megawattstunden-Bereich
- Massentaugliches Zellrahmendesign und Fertigung im Polymer-Spritzguss
- Kostenoptimierte hochleitfähige Polymer-Kohlenstoff-Komposite als Bipolarplatten-Materialien für neue Fertigungstechnologien (z. B. 2K-Spritzguss)
- Flow-Batterie Zertifizierung nach IEC-Norm
- Optimierte Elektrolyt-Formulierung für Vanadium- und Brom-Systeme, Entwicklung von Spezifikationen und spezieller Analytik
- Demonstrator-Entwicklung für spezielle Einsatzzwecke, z. B. Hybridspeicher als Unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) mit geringer Selbstentladung



Mehrfachsolarzelle aus III-V-Halbleitern und Silicium, die 33,3 Prozent des Sonnenlichts in Strom wandelt.
© Fraunhofer ISE/Dirk Mahler

■ **Höchsteffiziente Solarzellen auf Silicium- oder III-V-Basis sowie als Tandemzellen**

Siliciumsolarzellen

Siliciumsolarzellen dominieren heute den Photovoltaikmarkt. Forschung und Industrie arbeiten kontinuierlich an der Optimierung des Wirkungsgrads und kommen dabei dem physikalisch möglichen Limit des Materials immer näher. Den Weltrekord für multikristalline Solarzellen hält das Fraunhofer ISE mit einem Wert von 22,3 Prozent. Um diesen zu ermöglichen, stand die gesamtheitliche Betrachtung und Optimierung aller Schritte von der Kristallisation bis hin zu den einzelnen Solarzellenprozessschritten im Fokus. Eine wichtige Rolle spielten dabei eine optimierte Plasmatextur sowie die am Fraunhofer ISE entwickelte Tunnel Oxide Passivated Contact-Technologie (TOPCon) für die Rückseitenkontaktierung. Bei diesem Verfahren werden die elektrischen Kontakte strukturierungsfrei auf einer leitfähig passivierten Oberfläche der Solarzelle angebracht. Dadurch lassen sich Ladungsverluste reduzieren und Strom deutlich effizienter gewinnen. Damit stellt TOPCon einen möglichen Ansatz dar, um die Leistungsverluste der heutigen Standard-PERC-Solarzellen zu reduzieren.

Für monokristalline Siliciumsolarzellen erzielte das Fraunhofer ISE dank der TOPCon Technologie erstmals einen Effizienzwert von 25,7 Prozent für eine beidseitig kontaktierte Siliciumsolarzelle.

III-V Solarzellen

Auch den absoluten internationalen Photovoltaik-Wirkungsgrad Rekord von 46,1 Prozent hält das Fraunhofer ISE mit III-V-Konzentrator-Mehrfachzellen. Diese basieren auf einer Kombination verschiedener III-V Halbleiterverbindungen, z. B. Galliumindiumphosphid (GaInP), Galliumindiumarsenid (GaInAs) oder Germanium (Ge). Jeder dieser Halbleiter wandelt einen anderen Wellenlängenbereich des Sonnenlichts in Strom um. Aus dem Zusammenspiel der Teilsolarzellen ergibt sich der hohe Wirkungsgrad. Ursprünglich wurden III-V Mehrfachsolarzellen

in der Stromversorgung von Satelliten eingesetzt, auch für diese Anwendung forscht und entwickelt das Fraunhofer ISE bis heute. Für die terrestrische Nutzung, den Einsatz in Konzentratorkraftwerken, werden die III-V Mehrfachsolarzellen in Module eingebaut und schließlich in ein vollständiges Konzentratorsystem für Kraftwerke integriert.

Tandem-Solarzellen

Um noch effizientere Solarzellen herzustellen, gehen die Forscher des Fraunhofer ISE neue Wege, indem sie ihre Kompetenzen in den Materialklassen Silicium und III-V zusammenbringen. Dadurch gelang ihnen die Herstellung einer Mehrfachsolarzelle auf Silicium-Basis mit nur zwei Kontakten und einem Wirkungsgrad von 33,3 Prozent. Diese hohe Umwandlungseffizienz erreichten die Forscher durch 0.002 mm dünne Halbleiterschichten aus III-V-Verbindungshalbleitern, die auf eine Siliciumsolarzelle aufgebracht werden. Das sichtbare Licht wird effizient in einer ersten Solarzelle aus Gallium-Indium-Phosphid absorbiert, das nahe Infrarotlicht in Galliumarsenid und längerwelliges Licht schließlich in Silicium. So können die Wirkungsgrade heutiger Siliciumsolarzellen signifikant gesteigert werden.

Die Verbindung der Halbleiterschichten gelang ihnen mittels eines aus der Mikroelektronik bekannten Verfahrens, dem direkten Waferbonden. Dabei werden Oberflächen nach einer Plasmaaktivierung im Vakuum unter Druck miteinander verbunden. Es entsteht eine Einheit, indem die Atome der III-V Oberfläche Bindungen mit dem Silicium eingehen. Der Solarzelle sieht man die komplexe innere Struktur nicht an, sie besitzt wie herkömmliche Siliciumsolarzellen einen einfachen Vorder- und Rückseitenkontakt und kann wie diese in PV-Module integriert werden.



In-situ Befüllung einer gedruckten Perowskitsolarzelle am Fraunhofer ISE. Der reine Perowskit wird bei Raumtemperatur als geschmolzenes Salz eingebracht und anschließend in der Solarzelle auskristallisiert. Die abgebildete Menge der Schmelze ist ausreichend für die Herstellung von vier Quadratmetern Modulfläche.
© Fraunhofer ISE



■ Organische Solarzellen und Perowskitsolarzellen

Organische Solarzellen

Bei Organischen Solarzellen werden zur Umwandlung von (Sonnen-) Licht in elektrische Energie organische Halbleiter eingesetzt. Diese Materialien können bei niedrigen Temperaturen in kontinuierlichen Verfahren auf flexible Substrate aufgebracht werden. Damit lassen sich sehr hohe Durchsatzraten erzielen und die Herstellungskosten werden praktisch ausschließlich durch die Materialkosten bestimmt. Der Materialbedarf liegt auf Grund der geringen Dicke der einzelnen Schichten im Bereich von 100 nm in der Größenordnung von unter 1 g pro m². Bei entsprechender Aufskalierung ist für die organische Photovoltaik ein großes Kostenreduktionspotenzial zu erwarten. Trotz einer Steigerung des Wirkungsgrads auf inzwischen >11 Prozent sind weitere Fortschritte notwendig. Die Arbeiten am Fraunhofer ISE haben unter anderem zum Ziel, das für die transparente Elektrode verwendete Indium-Zinn-Oxid (ITO) durch andere Materialien zu ersetzen, die kostengünstig, langzeitstabil und zudem kompatibel zu einer Prozessierung mittels Rolle-zu-Rolle Verfahren sind.

Perowskitsolarzellen

Ein innovativer Ansatz, um Solarzellen noch ressourcenschonender herstellen zu können, besteht darin, die Anzahl an Produktionsschritten durch Umkehrung des Herstellungsablaufes drastisch zu reduzieren. Dafür entwickelte das Fraunhofer ISE das »in-situ«-Konzept für gedruckte Perowskitsolarzellen. Mit einem Rekord-Wirkungsgrad von 12,6 % wurde jetzt ein wichtiger Meilenstein für gedruckte Photovoltaik erreicht. Entscheidend für den solaren Wirkungsgrad ist die Kontrolle des Abscheideprozesses der Perowskitkristallite im Inneren der nano-porösen Elektroden, die aus Metalloxiden und mikronisiertem Graphit bestehen. Neu bei diesem Ansatz ist das Verfahren zur Befüllung der ansonsten fertigen Zelle mit dem Perowskit und dessen anschließender Kristallisation.

■ Schnelltestentwicklung für die Potential-induzierte Degradation von Solarmodulen

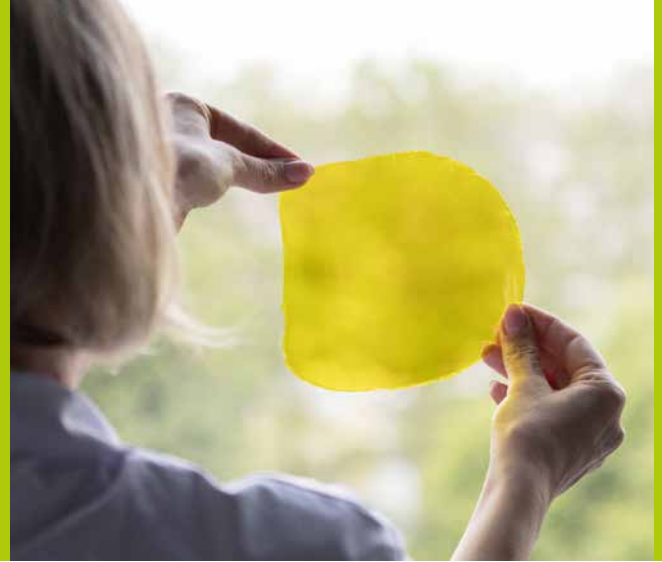
Potential-induzierte Degradation (PID) ist eine der häufigsten Ursachen für Leistungseinbußen in Photovoltaikmodulen mit kristallinen Siliziumsolarzellen. Dieser schwerwiegende Moduldefekt tritt vor allem auf, wenn Solarmodule bei hohen Systemspannungen und in feuchter Umgebung betrieben werden. Am Fraunhofer IMWS gelang es, die physikalischen Grundlagen des Defektmechanismus aufzuklären. Wie die Forscherinnen und Forscher erkannten, geht PID auf Kristalldefekte im Silizium zurück. Diese Kristalldefekte werden als Stapelfehler bezeichnet und haben Längen von nur wenigen Mikrometern und eine Dicke von nur einer Atom-Lage. Sie werden durch das Eindringen von Natriumatomen elektrisch leitend, sodass Kurzschlüsse (Shunts) entstehen. Auf Basis dieses grundlegenden Verständnisses des PID-Effekts wurde ein Prüfverfahren auf Zellebene entwickelt und patentiert.

Das Fraunhofer CSP entwickelte ein Verfahren und eine Testapparatur, um PID im Labor erzeugen und Materialeinflüsse an Solarzellen und Verkapselungsmaterialien studieren zu können. Der Partner Freiberg Instruments GmbH entwickelte das Gerät »PIDcon« bis zur Marktreife weiter. Die Kosten für die Untersuchung von Solarzellen auf PID-Anfälligkeit verringern sich damit im Vergleich zu herkömmlichen PID-Tests an Solarmodulen in Klimakammern auf einen Bruchteil. Ebenfalls mit Freiberg Instruments wurde das mobile Gerät »PIDcheck« auf den Markt gebracht, das die Überprüfung bereits im Feld installierter Solarmodule auf ihre PID-Anfälligkeit hin ermöglicht. Mit dem Ziel, mögliche Leistungsverluste unter dem Einfluss der Potentialbelastung für die Betreiber von Freifeldanlagen berechenbarer zu machen, arbeitet das Fraunhofer IMWS am Einsatz von »PIDcheck« im Feld zur Vorhersage künftiger Degradation sowie zur Evaluation von Gegenmaßnahmen.



Quantenpunkte leuchten in
äußerst brillanten Farben.
© Fraunhofer IAP / Till Budde

Die neuartigen protonenleitenden Membranen können beispielsweise für die dezentrale, elektrochemische Herstellung von Wasserstoffperoxid eingesetzt werden. © Fraunhofer IAP



■ Hocheffiziente cadmiumfreie Quantenpunkte für QD-LEDs und Solarzellen

Quantum Dots (QD) und Quantum Rods (QR) sind eine Klasse von Nanomaterialien, die aufgrund von Quanteneffekten Licht emittieren können und sich somit zur effizienten Erzeugung äußerst brillanter Farben nutzen lassen. Ihre Absorptions- und Emissionseigenschaften können in einzigartiger Weise über die Partikelgröße oder -form eingestellt werden. Mit der Modifikation der Oberfläche der Partikel erfolgt die gezielte Anpassung an die chemische Umgebung. Diese Materialien können so hergestellt werden, dass Sie sowohl im sichtbaren als auch im infraroten Spektralbereich emittieren. Diese außergewöhnlichen Eigenschaften ermöglichen den Einsatz in verschiedensten Anwendungsbereichen, etwa als Leuchtstoffe in der Displaytechnologie, für die Konversion von Licht zu höheren Wellenlängen in der Photovoltaik, als Sensormaterialien oder als Sicherheitsmerkmal auf Banknoten.

Bisher enthielten QDs jedoch das giftige Schwermetall Cadmium. Am Fraunhofer IAP werden daher cadmiumfreie QDs synthetisiert, die genauso leistungsfähig wie die Cd-haltigen QDs sind und u.a. auch hohe Quantenausbeuten erreichen. Sie basieren z. B. auf umweltfreundlichem Indiumphosphid oder Zinksulfid und können als fluoreszierendes Material für LEDs, als Emittiermaterial in QD-LEDs, als Colorfilter in Displays und für die LED-Hinterleuchtung von LCDs eingesetzt werden. Infrarot-aktive QDs auf Basis von Kupferindiumphosphid können zudem als Solarkonzentratoren für die Effizienzsteigerung in Solarzellen bereitgestellt werden.

Mit Hilfe von Durchflussreaktoren, die kontinuierlich arbeiten, können bis zu einigen Gramm QDs pro Stunde hergestellt werden. Diese können dann durch Tintenformulierungen im Inkjet-Verfahren auf feste und flexible Trägermaterialien gedruckt werden. Hierzu stehen am Fraunhofer IAP sowohl eine »Druckerfarm« als auch eine Pilotanlage zur Herstellung von QD-LEDs und Solarzellen zur Verfügung.

■ Umweltfreundlichere protonenleitende Membran für Elektrolyse und Brennstoffzellen

Werden elektrochemische Verfahren für die Produktion von Basischemikalien eingesetzt, können langfristig Kosten gesenkt und das Energiesystem an die chemische Produktion gekoppelt werden. Ein wichtiger Bestandteil bei Elektrolysen und Brennstoffzellen sind ionenleitende Polymermembranen. Bisher dafür eingesetzte perfluorierte Polymere, wie Nafion®, haben Nachteile: hohe Kosten, Verlust der Protonenleitfähigkeit mit der Zeit oberhalb von 80 °C, Probleme mit der Oxidations- und Thermostabilität und Fluor kann in die Umwelt gelangen.

Am Fraunhofer-Institut für Angewandte Polymerforschung IAP wurde ein völlig neues Entwicklungskonzept zur Herstellung von preiswerten und umweltverträglichen ionenleitenden Membranen für den Einsatz in Elektrolysen und Brennstoffzellen entwickelt. Die Membranen können z. B. für die dezentrale, elektrochemische Herstellung von Wasserstoffperoxid eingesetzt werden.

Auf Basis von Polyphenylquinoxalinen wurden durch Polykondensation neue Blockcopolyphenylquinoxaline (BPPQs) hergestellt, die anschließend sulfoniert wurden. Die sulfonierten BPPQs weisen eine ausgezeichnete Löslichkeit in organischen Lösungsmitteln auf und zeigen eine hervorragende Thermostabilität. Die Membranen können im Labormaßstab hergestellt werden und sind mechanisch sehr stabil. Sie weisen zudem eine hohe Oxidationsstabilität auf und haben mit 1mS/cm vergleichbare Protonenleitfähigkeiten zum Stand der Technik. Der Fluorgehalt konnte gegenüber Nafion® (über 70 Prozent Fluor) drastisch auf etwa 5 Prozent Fluor reduziert werden.

Die Membran entwickelten die IAP-Forscher im Rahmen des Fraunhofer-Leitprojektes »Strom als Rohstoff«, in dem neue elektrochemische Verfahren zur Herstellung wichtiger Basischemikalien entwickelt und bestehende Verfahren optimiert werden sollen.



Reaktor für die Biodieselsynthese unter überkritischen Reaktionsbedingungen.
© Fraunhofer IMM

■ **Herstellung von Biodiesel im überkritischen Prozess – Neues Verfahren verspricht Effizienzsteigerung, Umweltvorteile und Kostenreduktion – Laboranlage soll Nachweis erbringen**

In dem Projekt aus Mitteln des Energie- und Klimafonds der Bundesregierung über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe soll die bei der Biodieselherstellung übliche Umesterung des Pflanzenöls mit überkritischem Methanol erfolgen. An Stelle der sonst eingesetzten flüssigen Reaktionsbeschleuniger verwendet das Fraunhofer IMM innovative heterogene Katalysatoren, die als Beschichtung in mikroskaligen Reaktoren aufgebracht werden.

Überkritisch – das ist jener thermodynamische Zustand, den Stoffe ab einer bestimmten Konstellation von Temperatur und Druck annehmen und bei dem die Eigenschaften von Flüssigkeiten und Gasen ohne Phasentrennung ineinander übergehen.

Getestet wird eine Labor-Kleinanlage, die bei deutlich höheren Reaktionsgeschwindigkeiten Biodiesel aus verschiedenen Pflanzenölen herstellen soll. Durch die überkritische Prozessführung verkürzt sich die Reaktionszeit und es entfallen mehrere Prozessschritte, wie z. B. die Rückgewinnung des Katalysators. Mittels der vorliegenden Konzeption erhöhen sich die Umesterungsraten, die Baugröße des Reaktors sowie der Wasserverbrauch verringern sich, gleichzeitig sinkt die Empfindlichkeit des Prozesses gegen Wasserpuren im Rohmaterial.

Auch der geringere Bedarf an Methanol, die höhere Reinheit des Nebenproduktes Glycerin und die große Langzeitstabilität des Katalysators sind weitere Vorzüge. Der Prozess erfordert zwar hohe Drücke und Temperaturen, dennoch liegt der Gesamtenergieverbrauch aufgrund der Prozessoptimierung unter dem herkömmlicher Verfahren. Wirtschaftlich bietet das überkritische Verfahren großes Potenzial.



Demonstrationsanlage. © Fraunhofer IMM

■ Regenerosionsprüfstand: Vorderkantenschutz für Rotorblätter

Die Rotorblattspitzen einer Windenergieanlage erreichen im Volllastbetrieb eine Geschwindigkeit von über 300 km/h. Regentropfen wirken bei dieser Geschwindigkeit wie Schmirgelpapier auf der Oberfläche. Bereits kleine Schäden verursachen durch die punktuelle Aufrauung der Oberflächen eine Ertragsminderung. Die Wirtschaftlichkeit beziehungsweise die Lebensdauer der gesamten Anlage werden beeinträchtigt.

Die besonders stark beanspruchten Teile wie die Flügelvorderkanten sind daher mit speziellen Schutzsystemen wie Folien oder Lacken ausgestattet – Vorderkantenschutz oder Leading Edge Protection (LEP) genannt. Doch noch gibt es keine Beschichtung, die Regen, Hagel, Temperaturschwankungen, UV-Licht und Luftfeuchte über die gesamte Lebensdauer einer Anlage standhalten kann (20 bis 25 Jahre).

Aus diesem Grund betreibt das Fraunhofer IWES seit 2015 einen Regenerosionsprüfstand, um Schadenverläufe nachvollziehbar zu machen und wirkungsvolle Schutzmaßnahmen abzuleiten. Im Regenerosionsprüfstand werden Substrate mit unterschiedlichen Beschichtungen unter verschiedenen Bedingungen getestet. Dabei sind die Menge und Größe der Tropfen, der Zeitpunkt und die Häufigkeit des Aufschlags, die Temperatur und die UV-Einstrahlung exakt regulierbar.

Der gesamte Prüfstand wurde zudem mit einer CFD-Simulation nachgebildet. Die Schäden werden mit einer Highspeed-Kamera dokumentiert und anschließend validiert. Die Entwicklung eines adäquaten Material- und Schadensmodells macht die Vorgänge auf Materialebene besser nachvollziehbar. Die Ergebnisse helfen Materialzulieferern

für die Rotorblattproduktion, ihre Produkte den praktischen Anforderungen bestmöglich anzupassen. 2018 wurde der Erosionsprüfstand so erweitert, dass darin auch Vereisungstests zuverlässig durchgeführt werden können.

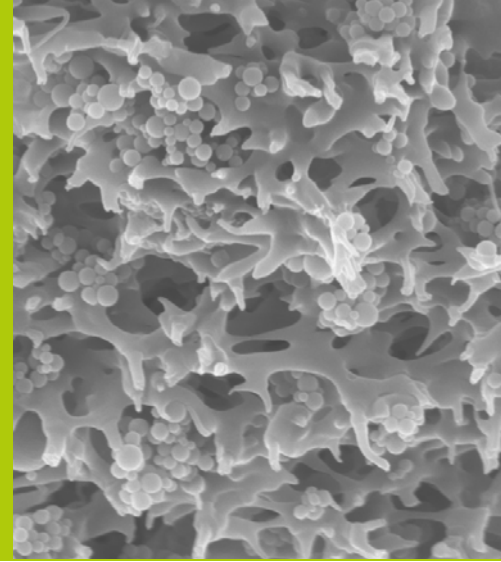


Im Regenerosionsprüfstand werden Materialproben bei variabler Drehgeschwindigkeit, Tropfengröße, Wassermenge und Temperatur getestet. © Jan Meier



Prüfstand Leuchtturm »Alte Weser« mit Korrosionsproben im küstennahen Schifffahrtsbereich. © Fraunhofer IFAM

*Mixed-Matrix-Membranadsorber.
© Fraunhofer IGB (Gastinstitut)*



■ Das Meer und der Rost: Beschichtungen für maritime Technologien

Die maritime Umgebung stellt hohe Anforderungen an technische Oberflächen. Ständige Feuchte in Kombination mit hohem Salzgehalt, intensiver UV-Strahlung und wechselnden Temperaturen stellt eine besonders aggressive Korrosionsbelastung für alle Schutzsysteme dar. Mangelhafter Korrosionsschutz führt zu eingeschränkter Nutzungsdauer oder frühzeitigem Ausfall des Bauteils bzw. Bauwerks und eine kostenintensive Instandsetzung ist die Folge. Basierend auf langjähriger Entwicklungstätigkeit besitzen die Experten am Fraunhofer IFAM fundiertes Wissen sowie praktische Erfahrungen auf dem Gebiet des Korrosionsschutzes.

Das Know-how umfasst nicht nur besondere Fachkenntnis über Korrosionsarten und -erscheinungen, sondern auch über die Anwendung geeigneter, vorbeugender Schutzmaßnahmen. Dabei werden an diese Korrosionsschutzmaßnahmen hohe Anforderungen gestellt, hinsichtlich derer die Spezialisten am Fraunhofer IFAM umfassend beraten sowie durch technische Dienstleistungen und anwendungsnahe Forschung praktisch unterstützen. Die Fachansprechpartner sind gemäß FROSIO bzw. DIN CERTCO zertifiziert und ihre Expertise ist national sowie international anerkannt.

Neben der Korrosion führt auch die Besiedelung von Oberflächen durch marine Organismen wie Bakterien, Algen, Muscheln und Seepocken zu weiteren Funktionseinschränkungen von Oberflächen und zur Zerstörung von Materialien. Um diesen Herausforderungen kompetent begegnen zu können, bietet das Fraunhofer IFAM umfangreiche Möglichkeiten für Untersuchungen und Prüfungen im Labor und im Feld an. Hierzu zählen u.a. die atmosphärische Freibewitterung und ein statischer Fouling-Prüfstand zur Auslagerung von Proben im Meer zur Prüfung der Bewuchsschutz-Eigenschaften von Beschichtungen.

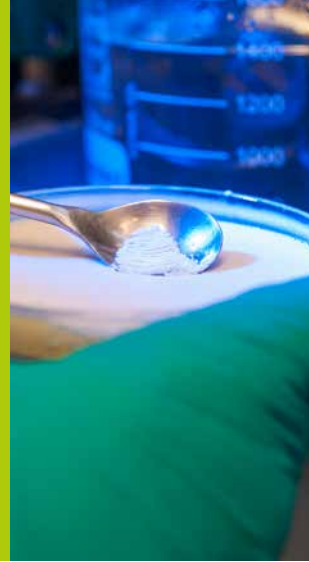
■ Membranadsorber für die Abtrennung von Mikroschadstoffen und Metallionen

Mithilfe sogenannter Membranadsorber können Filtration und Adsorption in einem einzigen Prozess miteinander kombiniert werden. Das Konzept wird vor allem im Downstream Processing in der Biotechnologie verwendet, um niedrige Konzentrationen von kleinen Molekülen durch Mikrofiltration abzutrennen. Am Fraunhofer IGB wird das Konzept auf die Wasserbehandlung übertragen. So lassen sich kleinste Konzentrationen von Mikroschadstoffen abtrennen und Materialkreisläufe in Produktionsprozessen schließen. Dabei werden Sub-Mikropartikel mit speziellen Bindungsstellen für verschiedene Substanzen entwickelt. Durch die Einbettung solcher Partikel in Membranen können maßgeschneiderte Membranadsorber hergestellt werden. Die Herstellung der Partikel erfolgt mittels Emulsionspolymerisation. Für die Abtrennung von Metallionen wurden Partikel mit Ionenaustausch-, schwefelhaltige Thioharnstoff- und Chelatgruppen entwickelt. Mit solchen Adsorbentien können wertvolle Metalle wie Silber, Kupfer oder Seltene Erden getrennt werden.

Adsorptionsexperimente mit Mikroschadstoffen zeigten, dass partikelbeladene Membranen eine hohe spezifische Adsorptionskapazität aufweisen und z.B. durch eine pH-Verschiebung vollständig regeneriert und mehrfach verwendet werden können. Bei der Mikrofiltration zeigen die behandelten Membranen eine hohe Permeationsleistung. Durch das Einbringen unterschiedlicher Partikel in eine Membran können Stoffe mit unterschiedlichen physikalisch-chemischen Eigenschaften in einem einzigen Schritt selektiv abgetrennt werden. Das Konzept wird weiterentwickelt und mit einer zusätzlichen Beschichtung der porösen Membranstruktur kombiniert, um die Flexibilität und die Selektivität zu erhöhen. Diese Forschungsarbeit erfolgt im Rahmen des BMBF-geförderten Projekts POLINOM.



Aluminium-Flächen in Innenräumen können kostengünstig mit Lacken auf Basis von Kartoffelstärke beschichtet werden.
© Fraunhofer IAP



Herstellung hochwertiger Biowachse aus Biogas mittels Fischer-Tropsch-Synthese.
© Fraunhofer IKTS

■ Farben und Lacke auf Basis von Kartoffelstärke

Bisher waren Lacke und Farben mit biobasiertem Bindemittel oder Filmbildner meist zu teuer oder konnten den anwendungstechnischen Anforderungen nicht standhalten. Forschende des Fraunhofer-Instituts für Angewandte Polymerforschung IAP entwickelten gemeinsam mit dem Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA eine kostengünstige Beschichtung auf Basis von Kartoffelstärke. Im Fokus der Forschung steht die Beschichtung von Metallen zur Anwendung im Innenraum, beispielsweise von Aluminium, das etwa für Feuertüren, Computergehäuse oder Fensterrahmen genutzt wird.

In ihrer natürlichen Form weist Stärke jedoch einige Eigenschaften auf, die der Verwendung als Filmbildner entgegenstehen: z. B. ist sie weder kaltwasserlöslich, noch bildet sie zusammenhängende, nicht brüchige Filme aus. Die Stärke musste daher modifiziert werden. Dazu wurde sie zunächst abgebaut, um so ihre Wasserlöslichkeit und den damit später verbundenen Feststoffgehalt der Stärke in Wasser sowie ihr Filmbildevermögen zu verbessern.

In einem weiteren Schritt wurde die Stärke verestert. Die Stärkeester sind wasserdispergierbar, bilden geschlossene Filme und weisen eine sehr gute Haftfestigkeit auf Glas- und Aluminiumflächen auf. In Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IPA wurde die veresterte Stärke dann chemisch vernetzt, wodurch die Sensitivität der Beschichtung gegenüber Wasser weiter reduziert wird. Am Fraunhofer IPA wurden zudem Stabilitätstests durchgeführt, in denen die Langzeitstabilität überprüft wird.

Die Untersuchungen zeigten, dass Stärkeester mit ihren guten Filmbildungs- und sehr guten Haftungseigenschaften auf verschiedenen Materialien das Potenzial besitzen, zukünftig eine Alternative zu erdölbasierten Filmbildnern in der Beschichtungsindustrie darzustellen.

■ Wachse aus Biogas für die Kosmetikindustrie

Biogas wird bislang verstromt oder in Biomethan umgewandelt und in die entsprechenden Netze eingespeist. Da die Einspeisevergütungen stark von den förderpolitischen Rahmenbedingungen abhängen, sind Ansätze für einen förderunabhängigen, wirtschaftlichen Betrieb der aktuell 8000 deutschen Biogasanlagen von Bedeutung.

Ein mögliches Konzept ist die alternative Nutzung des Biogases zur Herstellung hochwertiger chemischer Produkte. Biogas besteht aus Methan und Kohlenstoffdioxid. Kohlenstoffdioxid ist bislang ein Abfallprodukt, welches allerdings auch zur Synthese von Wachsen genutzt werden kann. Dabei wird zunächst Synthesegas bei sehr hohen Temperaturen und mit Hilfe von keramikbasierten Katalysatoren in einem Biogasreformer erzeugt. Anschließend wird daraus über eine Fischer-Tropsch-Synthese hochwertiges Wachs synthetisiert – und das in Bioqualität.

Diese Wachse sind aufgrund ihrer Reinheit insbesondere für die Kosmetikindustrie geeignet. Sie eröffnen vor allem in der Naturkosmetikbranche lukrative Anwendungsmöglichkeiten. Darüber hinaus sind Biowachse auch als Schmierstoffe einsetzbar. Die Reinheit der Wachse garantiert stets eine definierte Produktzusammensetzung und somit verlässliche Eigenschaften, die mit erdölbasierten Schmierstoffen nicht vollumfänglich erreichbar sind.

Im Rahmen des dreijährigen SAB-Projekts wurde dieser aussichtsreiche Verfahrensansatz umfassend betrachtet. Im Fokus standen insbesondere der Aufbau und der Betrieb einer Demonstrationsanlage zur Wachsherstellung an einer Biogasanlage. Auf Basis der erhaltenen Prozessdaten wurde so die Wirtschaftlichkeit des Konzepts bewertet und bewiesen.



Flexibel einsetzbarer Teststand zur Charakterisierung und Untersuchung von Ein-Tank-Speicher Konzepten auf Salzschmelzebasis für Temperaturen bis 550°C. © Fraunhofer ISE

Mit den Anti-Eis-Schichten lassen sich Rotorblätter und Solarmodule, aber auch Winter sportartikel ausrüsten. © Fraunhofer IGB (Gastinstitut)



■ Anti-Eis-Schichten

Die Vereisung von Oberflächen ist vielfach ein Problem. Für die effektive Anti-Eis-Ausrüstung bringt das Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik IGB wasserabweisende mikro- und nanostrukturierte Schichten mittels Plasmatechnologie auf Kunststofffolien aus schlag- und stoßfestem Polyurethan (PU) oder anderen Materialoberflächen auf.

Die nur wenige Nanometer messenden Schichten verändern die Benetzung mit Wasser, sodass dies von der Oberfläche abgestoßen wird. Auf diese Weise bleibt Wasser auch bei Temperaturen unter Null Grad auf den beschichteten Folien flüssig, denn die Schichten bieten dem Wasser keine Kristallisationskeime auf der Oberfläche und es verbleibt in einem »stark unterkühlten« Zustand.

In der Eiskammer bei Minus 30 Grad zeigte sich, dass die Anti-Eis-Ausrüstung die Haftung von Eis um mehr als 90 Prozent reduziert. Die Ausrüstung ist wetterbeständig, schmutzabweisend und leicht zu reinigen, zudem umweltfreundlich und kostengünstig in der Herstellung.

Die Ausrüstung flächiger Materialien wie Textilien und dreidimensionaler Formteile bis zu einer gewissen Größe kann als Direktbeschichtung einfach auf verschiedene Materialien wie Lacke, Metalle und Kunststoffe abgeschieden werden. Auch die eisfreie Ausrüstung von Outdoor- und Wintersportartikeln wie Skibrillen, Wintersportbekleidung und Zelten oder Rucksäcken ist mit dem Verfahren möglich.

Funktionalisierte Folien können auf Flugzeugtragflächen, Rotorblätter von Windkraftanlagen, Solarmodule, Strom-Freileitungen, auf Gebäudeteile und -fassaden, sogar auf Sportgeräte wie Ski und Snowboards aufgebracht werden. Auch auf Kühlaggregaten oder in Kühlschränken ist eine Anti-Eis-Folie einfach zu applizieren und jederzeit austauschbar.

■ Ein-Tank-Salzschnmelzespeicher spart Platz und Kosten

Hochtemperaturspeicher in solarthermischen Kraftwerken ermöglichen die Entkopplung von solarer Einstrahlung und Stromerzeugung und damit eine bedarfsgerechte Stromversorgung. So kann die tagsüber gewonnene Energie zu den Spitzenverbrauchszeiten in den Abendstunden genutzt werden - ein Vorteil gegenüber Wind- und Photovoltaikstrom.

Als Alternative zum Zwei-Tank-System, das in solarthermischen Kraftwerken aktuell Standard ist, hat das Fraunhofer ISE ein Ein-Tank-Salzschnmelzespeichersystem nach dem Schichtspeicher-Prinzip entwickelt. Dies ermöglicht Kosten- und Platzeinsparungen, wobei letzteres auch für die Abwärmespeicherung in Industrieprozessen oder in konventionellen Kraftwerken interessant ist. Salzschnmelze ist im Vergleich zu anderen Speicherfluiden, wie z.B. Thermoöl, kostengünstig und kann, je nach Mischung, bis 600 °C drucklos gespeichert werden.

Zunächst analysierten die Forscher an einem Prototyp das Schichtungsverhalten sowie unterschiedliche Einflussfaktoren wie die Einlassgeometrie. Ein großer Dichteunterschied fördert die Trennung heißer und kalter Fluidschichten. Der relative Dichteunterschied ist bei Salzschnmelzesystemen deutlich höher als bei Warmwassersystemen, was zu einem guten Speicherverhalten führen kann. Für die weitere Kostensenkung wird auch der Einsatz von sehr kostengünstigen Festkörperfüllstoffen und deren Kompatibilität mit den Salzen untersucht.

Angewandt wurde diese Technologie im neuen »MATS«-Kraftwerk in Borg El Arab (Ägypten). Das solarthermische Kraftwerk mit einer Kollektorfläche von 10.000 Quadratmetern und einer Leistung von 1 MW nutzt einen Ein-Tank-Speicher, in dem heißes und kälteres Salz (290°C) geschichtet sind. Zudem liegt der Dampferzeuger innerhalb des Speichertanks, was die Investitionskosten verringert. Der Speicher ermöglicht die Stromerzeugung für mehr als 1000 Menschen sowie die Wasserentsalzung bis zu vier Stunden nach Sonnenuntergang.



Abb.1 Darstellung des neuen Hochgeschwindigkeitshubschraubers Racér.
© Airbus Helicopters

MOBILITÄT

■ Vogelschlagsimulationen für den neuen Hochgeschwindigkeitshubschrauber »Racér«

Der im Rahmen des europäischen Luftfahrtforschungsprogramms Clean Sky 2 entstehende Demonstrator soll 2020 seinen Erstflug antreten. »Racér«, kurz für »Rapid And Cost-Effective Rotorcraft«, wird verschiedene Innovationen enthalten, wie beispielsweise eine hohe Reichweite und eine hohe Reisegeschwindigkeit von über 400 Kilometern pro Stunde bei niedrigem Treibstoffverbrauch. Dieser neue Hubschraubertyp soll insbesondere für Such- und Rettungseinsätze, notärztliche Versorgung sowie öffentliche und private Versorgungs- und Transportflüge eingesetzt werden.

Fraunhofer EMI liefert Nachweise für Flugzulassung

Damit der Demonstrator 2020 eine Flugerlaubnis erhalten kann, muss er die Anforderungen aus der EASA-Norm CS 29 erfüllen. Diese verlangt unter anderem den Nachweis, dass ein sicherer Weiterflug beziehungsweise eine sichere Landung nach einem Zusammenstoß mit einem ein Kilogramm schweren Vogel möglich ist. Die Notwendigkeit eines solchen Nachweises zeigt ein Blick in die Statistik: Mehrere 10 000 Kollisionen zwischen Flugzeugen und Vögeln treten weltweit jedes Jahr auf. Sie verursachen hohen wirtschaftlichen Schaden und können im Einzelfall – wie etwa 2009 in New York, als ein A320 auf dem Hudson River notlanden musste – zu einem Sicherheitsrisiko werden.

Insbesondere Hubschrauber sind aufgrund ihrer niedrigeren Flughöhe häufig von Vogelschlag betroffen. Die Simulationen, die zur Erbringung des Nachweises notwendig sind, hat das Fraunhofer EMI durchgeführt. Hierfür stellte Airbus Helicopters die relevanten Daten zur Verfügung, aus denen ein Finite-Elemente-Modell (FE-Modell) von Racér erstellt wurde. Mithilfe dieses Modells konnten anschließend Einschläge von Vögeln an

unterschiedlichen Stellen des Hubschraubers simuliert und deren Auswirkungen bewertet werden.

Erstellung des numerischen Modells

Für eine realistische Simulation dieser Belastungen durch Vogelschlag war es zunächst erforderlich, ein validiertes Modell eines Vogels zu erstellen. Hierbei mussten Vereinfachungen getroffen werden, da die exakte numerische Abbildung des Tiers mit erheblichem Aufwand verbunden gewesen wäre. Meist modelliert man Vögel als einfache geometrische Formen, wie

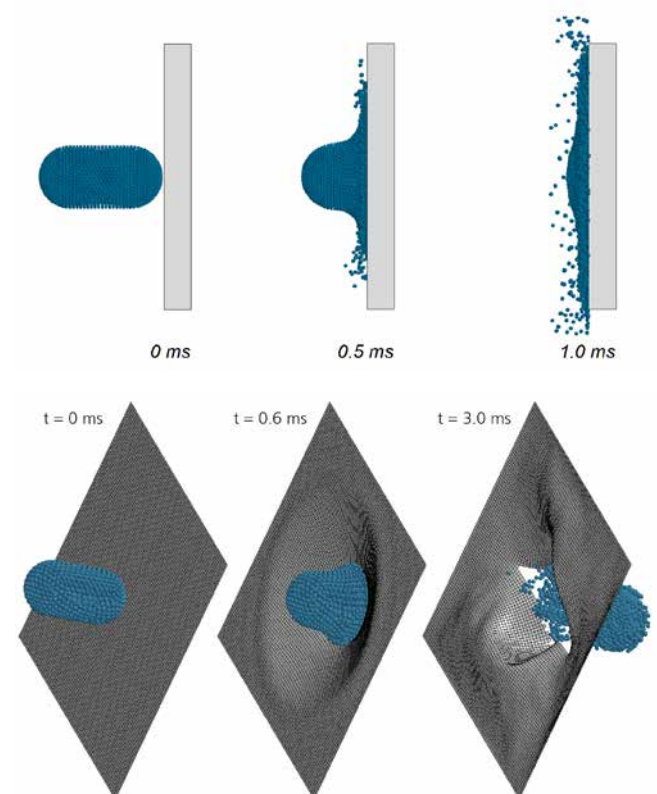


Abb.2 Simulation eines Vogelschlags auf einer Stahlplatte (oben) und eine Polycarbonatplatte (unten) zur Validierung des SPH-Vogelmodells. © Fraunhofer EMI

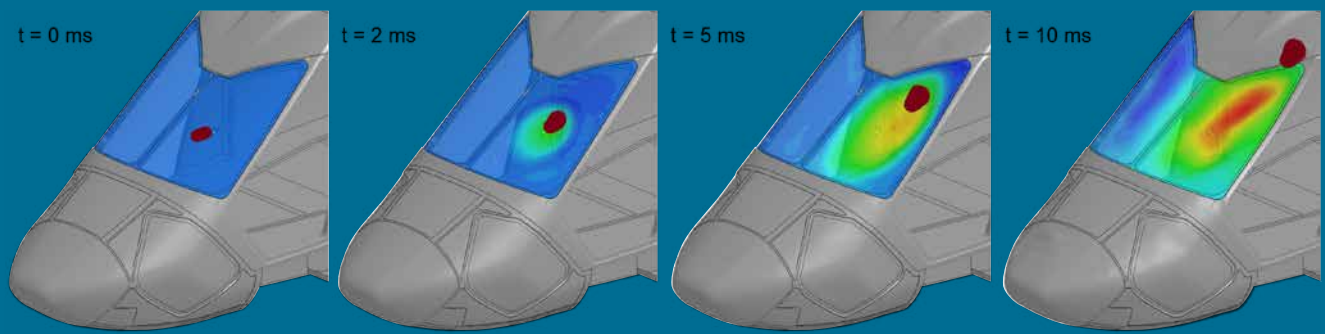


Abb.3 Simulation eines Vogelaufpralls mit 410 Kilometern pro Stunde auf die Windschutzscheibe aus Polycarbonat. Diese verformt sich im roten Bereich um bis zu 17 Zentimeter, ohne zu brechen. © Fraunhofer EMI

beispielsweise Kugeln oder Ellipsoide. Für die Simulationen am EMI wurde die ebenfalls häufig verwendete Form eines Zylinders mit halbkugelförmigen Enden gewählt. Für die Diskretisierung des Vogelmodells kam die SPH-Methode (Smoothed Particle Hydrodynamics) zum Einsatz. Diese weist bei den auftretenden hohen Verformungen deutliche Vorteile gegenüber klassischen FE-Methoden bezüglich Stabilität und Rechenzeit auf. Hinsichtlich der Materialeigenschaften lassen sich Vögel bei derart hohen Geschwindigkeiten, wie sie bei einem Vogelschlag in der Luftfahrt auftreten, vereinfacht als ein wasserähnliches Fluid modellieren, da die Festigkeiten der einzelnen Materialien weit überschritten werden.

Für die Validierung des erstellten Vogelmodells wurden zunächst frei zugängliche Daten des Air Force Materials Laboratory aus den 1970er Jahren genutzt. Bei den damaligen Versuchen schoss man sowohl echte Hühner als auch Ersatzkörper aus Gelatine gegen eine Stahlplatte und maß die auftretenden Drücke. Weiterhin konnten aktuellere Messwerte, die Airbus Helicopters zur Verfügung stellte, verwendet werden. Hier wurden Gelatinevögel gegen Polycarbonatplatten geschossen. Beide Versuchstypen wurden mit dem Vogelmodell nachsimuliert (Abbildung 2 oben: Stahlplatte, unten: Polycarbonatplatte).

Die dabei berechneten Drücke, Kräfte und Schädigungen weisen eine hohe Übereinstimmung mit den Versuchsdaten auf. Der nächste Schritt beinhaltete den Aufbau eines FE-Modells des Hubschraubers. Hierfür wurden die Geometriedaten bereinigt, vereinfacht und anschließend vernetzt. Es folgte die Modellierung der beteiligten Materialien sowie die Definition des Lagenaufbaus der Verbundmaterialien, der Kontakte und der Randbedingungen. Das fertige FE-Modell von Racer besteht aus mehr als einer halben Million Schalen- und Hexaederelementen mit Kantenlängen von circa 10 Millimetern bis 15 Millimetern. Trotz dieser hohen Anzahl an Elementen benötigt die Simulation eines Vogelschlags lediglich eine Rechenzeit von etwa ein bis zwei Stunden auf 16 CPUs (Central Processing Unit).

Bewertung der Vogelschlagsicherheit

Mithilfe der erstellten Modelle konnten virtuelle Vogelschlaguntersuchungen für den Hochgeschwindigkeits-Hubschrauber Racer durchgeführt werden. Abbildung 3 zeigt beispielsweise die Verformung der Polycarbonatwindschutzscheibe bei Aufprall und anschließendem Abgleiten eines Vogels mit einer Relativgeschwindigkeit von rund 410 Kilometern pro Stunde. Trotz starker Deformationen bleibt die Scheibe intakt. Der große Vorteil der Simulationen ist, dass sich eine Anpassung der Werkstoffe und der Wandstärke von Bauteilen oder die Änderung des Auftreffpunkts und der Geschwindigkeit des Vogels sehr einfach am Computer realisieren lassen. So konnte eine Vielzahl unterschiedlicher Szenarien hinsichtlich der Vogelschlagsicherheit analysiert werden. Bewertungskriterien waren dabei beispielsweise eine eventuelle Perforation oder ein Bruch von Komponenten, die Anzahl geschädigter Lagen von Verbundwerkstoffen, das eventuelle Versagen von Klebschichten oder die Restgeschwindigkeit und Ablenkung des Vogels in Richtung kritischer Strukturen. Mittels dieser Untersuchungen, die wesentlich für die Vorauslegung des neuen Hubschraubers sind, konnte das Fraunhofer EMI frühzeitig gefährdete Komponenten identifizieren und Vorschläge zur Verbesserung abgeben. Die durchgeführten Arbeiten am EMI lieferten somit einen wertvollen Beitrag im Entwicklungsprozess des Racers und dienen Airbus Helicopters als Nachweis für die Erfüllung der Anforderungen für die Flugzulassung.

Weitere Informationen unter www.airbus.com



This project is funded by the European Union

This project has received funding from the Clean Sky 2 Joint Undertaking under the Europeans Union Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No. CS2-Air-GAM-2016-2017-05.

Gestengesteuerter Prototyp
eines Nutzfahrzeugsitzes.

© Isringhausen GmbH & Co. KG



■ Gestensteuerung – intelligente Mensch-Maschine-Schnittstellen

Moderne Nutzfahrzeugsitze sorgen dafür, dass die Fahrer lange Strecken konzentriert und ermüdungsfrei zurücklegen und vor schädlichen Schwingungen durch pneumatische Schwingsysteme weitgehend geschützt werden können. Für den optimalen Sitzkomfort ist die ergonomische Gestaltung und Formgebung sowie die richtige Einstellung der Sitzposition von großer Relevanz. Das Center Smart Materials CeSMA des Fraunhofer ISC hat eine berührungslose Gestensteuerung für Fahrersitze in LKWs entwickelt, mit der allein durch Handbewegung die optimale Sitzposition eingestellt werden kann.

Intuitive berührungslose Kommunikation

Untersuchungen bei Berufskraftfahrern zeigten, dass die individuell richtige Sitzeinstellung nur dann korrekt vorgenommen wird, wenn dem Fahrer alle Einstellfunktionen bekannt und vertraut sind und er sie intuitiv bedienen kann. Die neuartige Gestensteuerung ermöglicht dem Fahrer zahlreiche intuitive Einstell- und Komfortfunktionen, mit denen die Sitzposition sowie Teilbereiche der Konturgebung auf die individuellen Bedürfnisse und körperlichen Voraussetzungen angepasst werden können.

Der Sitz folgt dabei einfach der natürlichen Handbewegung – spezielle Gesten müssen nicht einstudiert werden. Soll der Sitz nach oben, bewegt sich die Hand nach oben, soll er nach vorne, so macht die Hand eine Bewegung nach vorne. Weitere schräg nach oben oder nach unten gerichtete Bewegungen stellen die Lehnneigung bzw. die Oberschenkelstütze ein. Damit ist eine Lösung für die Mensch-Maschine-Kommunikation

realisiert worden, die rasch zu erlernen und sicher zu bedienen ist. Fehlbedienungen können darüber hinaus elektronisch ausgeschlossen werden.

Kostengünstige Herstellung und Designfreiheit

Ein weiteres Plus: Elemente wie Schalter und Knöpfe, die im täglichen Betrieb beschädigt werden können oder verschmutzen, entfallen. Das bedeutet eine Vereinfachung des Sitzaufbaus und somit niedrigere Produktionskosten. Zusätzlich können bei häufigem Fahrerwechsel durch wiederum einfache Bewegungen individuelle Sitzpositionierungen gespeichert und bei Bedarf jederzeit abgerufen werden. Das großflächige Bedienfeld ohne Knöpfe befindet sich in einem gut zugänglichen Bereich an der Seite des Fahrersitzes – unsichtbar unter der Abdeckung. Es ist schmutzunempfindlich, robust und handschuhtauglich. Und für den Sitz- und Fahrzeugdesigner eröffnen sich ganz neue Freiräume: Da sämtliche Komponenten hinter der Kunststoffseitenabdeckung des Sitzes angeordnet sind, kann die äußere Formgebung und Gestaltung der Seitenverschalung für die Bedienseite frei gewählt werden.

Näherung der Hand löst Schaltfunktion aus

Für die berührungslose Steuerung des Fahrzeugsitzes allein durch Gesten ist die Seitenabdeckung mit Elektroden für eine kapazitive Näherungssensorik auf Basis des Ladungstransferprinzips versehen. Nähert sich nun eine Hand oder ein Finger dem Sensorfeld unter der Abdeckung, wird die Kapazität verändert und eine Schaltfunktion ausgelöst. Mit der im Fraunhofer ISC dafür entwickelten Hard- und Software werden die sensorischen Informationen erfasst, verarbeitet und in Schaltbefehle übertragen. Der Einsatz dieses Bedienkonzepts ist nicht auf LKW-Sitze beschränkt. Die Sensorik eignet sich ebenso für Sitze in PKW, Eisenbahn oder Flugzeug. Auch sind Mensch-Maschine-Schnittstellen in der Haustechnik denkbar, wie etwa bei der Steuerung von Fensterjalousien oder Haushaltsgeräten, oder auch bei der Steuerung von Robotern und Maschinen über Bewegungsmuster in der Produktionstechnik.



© Isringhausen GmbH & Co. KG



Realisierte TRANSFORMERS-Lkw, links Hybrid-on-Demand-Trailer, rechts: Load-Optimization-Trailer.
© www.transformers-project.eu

■ TRANSFORMERS: konfigurierbare Lastkraftwagen für effizienten Transport

Der zunehmende Güterverkehr auf Europas Straßen erfordert Verbesserungen bei der Effizienz von Lastkraftwagen. Im EU-Forschungsprojekt TRANSFORMERS hat sich ein internationales Konsortium dieser Aufgabe angenommen. Vom Fraunhofer LBF wurden im Rahmen der Zusammenarbeit eine Sensorik zur Ladevolumenmessung sowie ein Batteriegehäuse zur Versorgung eines elektrischen Hilfsantriebes im Trailer entwickelt.

Die TRANSFORMERS-Trailer ermöglichen eine Reduktion des Kraftstoffverbrauchs um bis zu 25%, insbesondere für palettierte Waren. Dies wird durch die missionsspezifische Anpassung der Struktur, einen im Auflieger verbauten elektrischen Hilfsantrieb, eine anpassbare Beladungskapazität sowie eine ganzheitlich optimierte Aerodynamik erreicht.

Load-Optimization-Trailer

Der Load-Optimization-Trailer von Van Eck verfügt über eine elektrische Dachhöhenverstellung, einen Ladevolumensensor und ein Double-Floor-System. Ist beispielsweise die zulässige Gesamtmasse des Aufliegers erreicht, ohne dass sein Volumen voll ausgenutzt wird, so lässt sich das Dach absenken, um den Luftwiderstand zu reduzieren. Die jeweils aktuelle Ausnutzung wird durch das vom Fraunhofer LBF entwickelte Sensorsystem zur Messung der Ladungshöhe ermittelt.

Ist die zulässige Gesamtmasse hingegen noch nicht erreicht, können mit Hilfe des Double-Floor-Systems Paletten übereinander verladen werden, um die maximale Ladungshöhe voll auszunutzen und damit die Transporteffizienz zu erhöhen.

Hybrid-on-Demand-Trailer

Der Hybrid-on-Demand-Trailer von Schmitz Cargobull verfügt über eine manuelle Dachhöhenverstellung und einen Hybrid-on-Demand Antrieb mit Energierückgewinnung. Die Dachhöhe des Trailers kann ähnlich dem Load-Optimi-

zation-Trailer an die tatsächliche Ladungshöhe angepasst werden, um den Luftwiderstand zu reduzieren.

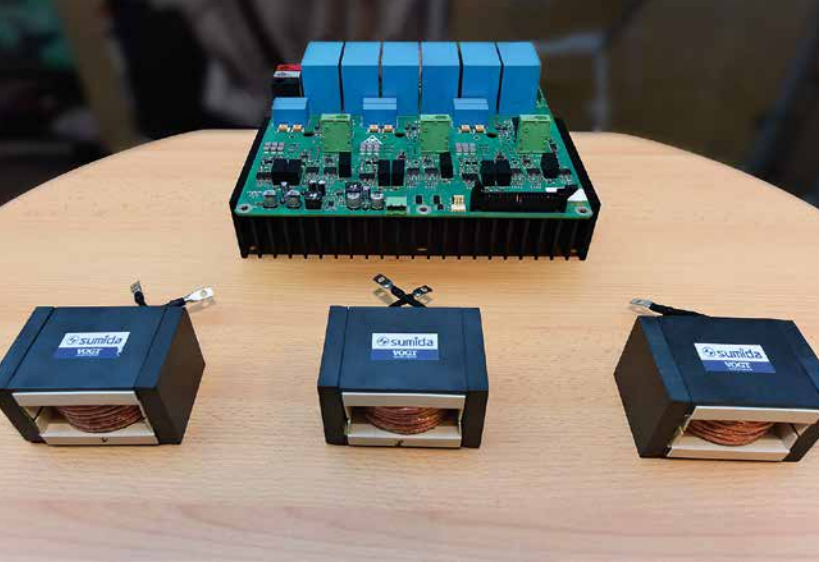
Der im Auflieger installierte, elektrische Antriebsstrang sorgt als so genanntes Hybrid-on-Demand-System für kurzfristig verfügbare Zusatzleistung z. B. für das Überwinden von Steigungen oder beim Anfahren. Genauso kann auf Gefällstrecken andernfalls verlorene Bremsenergie zurückgewonnen werden.

Die Batterie mit der dazu gehörenden Leistungselektronik sowie dem notwendigen Kühlsystem muss im Fahrbetrieb sicher am Unterboden des Aufliegers befestigt sein und im harten Alltagseinsatz vor den Einwirkungen der Umgebungsbedingungen (z. B. Steinschlag) geschützt werden. Das dazu notwendige robuste Gehäuse ist am Fraunhofer LBF konstruiert und ausgelegt worden und stellt eine mechanisch zuverlässige Anbindung an den Auflieger dar.

Die Vorteile des Konzepts liegen in verringerten Kraftstoffkosten pro Tonnen-Kilometern für den Betreiber sowie geringerem CO₂-Ausstoß und einer Minderung der Staugefahr an Steigungen und im Stadtverkehr. Das EU Projekt Transformers wurde von der EU-Kommission als Success Story hervorgehoben.



Ermittlung der Ladungshöhe (oben) und Anpassung der Dachhöhe (unten) Grafik: Fraunhofer LBF



*Demonstrator eines 30 kVA-
Photovoltaik-Wechselrichters
mit SiC-Halbleitern, die das
Gesamtgewicht des Systems um
bis zu mehr als 50 % reduzieren
können.*

*© Forschungsprojekt PV-LEO /
Fraunhofer IEE*

■ Mit Siliziumkarbid-Halbleitern Material einsparen

Aufgrund der physikalischen Eigenschaften von Silizium-Karbid-Leistungshalbleitern (SiC) können sehr schnelle und verlustarme unipolare Bauelementkonzepte wie MOSFET oder Schottkydioden auch für hohe Sperrspannungen wie in Photovoltaik-Wechselrichtern sinnvoll realisiert werden.

Durch diese Eigenschaften ist es möglich Wechselrichterschaltungen mit erheblich höheren Taktfrequenzen einzusetzen und gleichzeitig die Verluste zu senken. Im Fall von Photovoltaik-Wechselrichtern lässt sich so eine deutlich höhere Leistungsdichte umsetzen, da nun magnetische Elemente (gewichts- und kostenbestimmend) deutlich kleiner ausgeführt werden können. Auch beim Kühlkörper als weiteres volumentreibendes Element sind Einsparungen möglich.

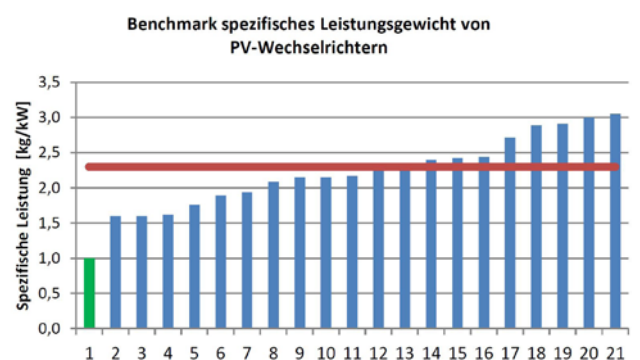
Zusammen mit Partnern aus der Industrie hat das Fraunhofer IEE in Kassel in dem vom BMWi und BMBF geförderten Forschungsprojekt PV-LEO einen Demonstrator eines PV-Wechselrichters mit 30 kVA Leistung entwickelt, der die Vorteile von SiC-Halbleitern in der Anwendung aufzeigt.

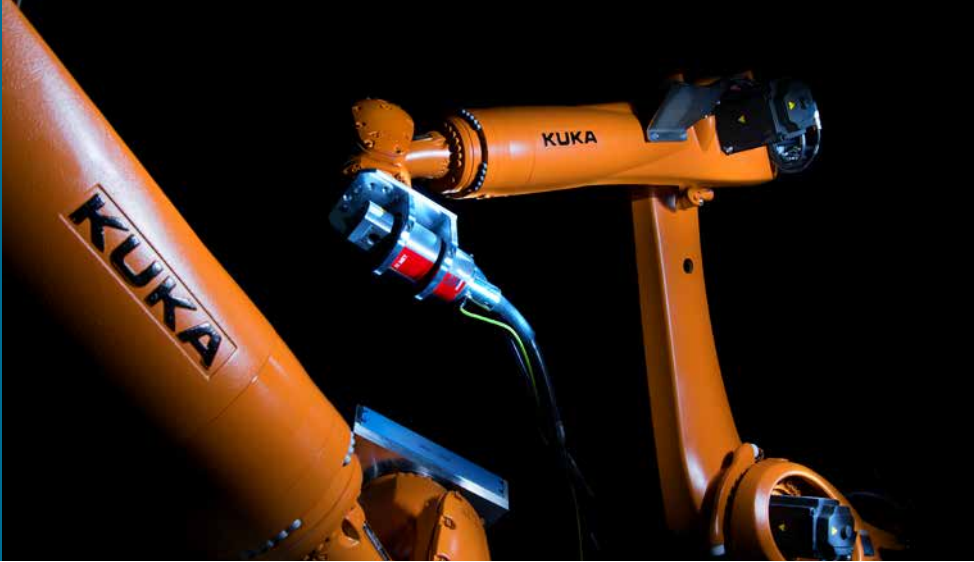
Bei herkömmlichen Wechselrichtersystemen, die mit typischen Taktfrequenzen von 17 kHz arbeiten, haben die Drosselkomponenten und die Kühlung, einen Anteil am Gesamtgewicht des Systems von bis zu 50 %. Durch die Erhöhung der Taktfrequenz auf 50 kHz konnte das Gewicht der Drosselkomponenten in etwa halbiert werden. Aufgrund der kleineren Bauform der Drosseln müssen

beim Aufbau allerdings zusätzliche Maßnahmen zur Entwärmung getroffen werden, um Hotspots innerhalb der Bauteile zu vermeiden.

Das erreichte Leistungsgewicht des neu entwickelten Gesamtsystems beträgt 0,93 kg/kW. Durch den Einsatz von SiC-Halbleitern lässt sich somit eine deutliche Gewichtsreduktion gegenüber dem Stand der Technik (2,3 kg/kW im Mittel) erreichen.

Trotz erheblich höherer Aufwendungen für SiC-Halbleiter kann bereits auf Systemebene eine Verbesserung der Kostenposition für den Hersteller dieser Systeme erreicht werden. Daher wird eine sehr schnelle Durchdringung der neuen SiC-Technologie innerhalb dieses Anwendungsbereichs erwartet.





© Paul Pulkert

■ »RoboCT«: Mit Robotern zum kognitiven Sensorsystem

Der Einsatz von Robotern in der Zerstörungsfreien Prüfung bietet gegenüber konventionellen CT-Systemen einen entscheidenden Vorteil: Prüfpositionen an komplex geformten Objekten, wie etwa einer Fahrzeugkarosserie, werden so erreichbar. In der Praxis umfahren mehrere kooperierende Roboter, die die bildgebenden Komponenten wie z. B. Röntgenquelle und -detektor korrespondierend bewegen, das Prüfobjekt. So ist das System in der Lage, dreidimensionale CT mit der Detailerkennbarkeit in Größe eines menschlichen Haares zu erzeugen. Das Objekt kann mit dieser Technologie mit höchster Präzision bis ins Detail untersucht werden, ohne es dabei zu beschädigen. Bisher mussten die entsprechenden Bauteile für eine solche Analyse zerlegt oder gar ausgesägt und in einem separaten CT-System untersucht werden.

Im industriellen Einsatz übliche Röntgen-CT-Systeme sind in der Lage, Objekte von etwa 30 Zentimetern Durchmesser zu tomographieren und so 3D-Informationen über alle äußeren aber auch verdeckten, inneren Strukturen zu erfassen. Diese CT-Bilder lassen sich am Computer virtuell in beliebige Stapel von Schnittbildern zerlegen und analysieren. Um Auflösungen von teils kleiner als einem Mikrometer zu erreichen, sind äußerst präzise Hardwarekomponenten notwendig. Mit großen Industrierobotern – hier mit Reichweiten von drei Metern und mehr – lassen sich Ausschnitte, sogenannte »regions of interest ROI«, an viel größeren und komplex geformten Objekten erreichen. Die besondere Her-

ausforderung besteht darin, geometrische Ungenauigkeiten der Roboter algorithmisch direkt aus den aufgenommenen Messdaten zu korrigieren. Die präzisesten Industrieroboter dieser Größe erreichen über deren gesamten Arbeitsraum lediglich Genauigkeiten von $\frac{1}{2}$ bis $\frac{1}{4}$ Millimeter – während für die CT je nach Anwendung mindestens $\frac{1}{20}$ Millimeter notwendig sind. Die Lösung dieses Problems ist die Grundlage, um diese Technologie heute produktiv einzusetzen.

Die robotergestützte CT wie sie heute durch diese Entwicklungen Realität geworden ist, ist erst der Anfang einer größeren Idee: Langfristig ist es Ziel, nicht einfach wahl- oder lückenlos Materialdaten zu messen, sondern nur noch die relevanten Daten zu erfassen. Und was relevante Daten sind, wird dieses sogenannte kognitive Sensorsystem selber entscheiden. Kunden bekommen eine Art hochflexible Blackbox geliefert. Mit dieser müssen sie sich nicht auseinandersetzen und über keinerlei Know-how im Bereich der zerstörungsfreien Prüfung verfügen. Teil dieser Box sind beispielsweise Roboter, die Zugriff auf unterschiedliche, sich selbst adaptierende Sensorsysteme haben und dann im weitesten Sinne selbst entscheiden, welche Methoden sie wie nutzen. Der Roboter greift sich dann ein Röntgensystem, ein Luftultraschallsystem oder auch ein Thermographiesystem, um eine ganz bestimmte definierte Aufgabe zu lösen und nicht um etwas zu prüfen. Durch den Einsatz von künstlicher Intelligenz kann die RoboCT den Menschen bei unterschiedlichen Aufgaben unterstützen, indem sie ihm als Blackbox abhängig von der gestellten Aufgabe optimale Parametrierungen hinsichtlich Zugänglichkeiten und Aufnahmeparametern vorschlägt.



Mit 3D-SmartInspect in die digitale ZfP-Welt: Augmented Reality-System zur manuellen Prüfung von komplexen Bauteilen oder großen Oberflächen. © Fraunhofer IZFP

■ 3D-SmartInspect – Intelligence in Inspection and Quality Control

Viele sicherheitsrelevante Komponenten im industriellen Umfeld stehen unter hohen mechanischen, thermischen Belastungen. Bereits kleine Defekte, wie innere Korrosion, Materialermüdung, Risse in Schweißnähten können entscheidend für einen Ausfall solcher Systeme und Anlagen sein. Die seit langer Zeit etablierten und bis heute vorrangig genutzten Qualitätssicherungsmethoden setzen vielfach auf manuell durchgeführte zerstörungsfreie Prüfkonzepte auf Basis von Ultraschall oder Wirbelstromsensordaten; gegebenenfalls kommen auch weitere elektromagnetische Prüfprinzipien zum Einsatz.

In der konventionellen Prüfung wird das zu untersuchende Bauteil mit einem Prüfkopf punktuell rasterförmig abgetastet. Das Messsignal wird auf dem Prüfgerät in einfacher Form dargestellt und vom Prüfer direkt während der Messung interpretiert. Das Prüfprotokoll wird meist handschriftlich erstellt, oft werden die erkannten Auffälligkeiten nur auf den Bauteilen festgehalten. Hierbei erhält der Prüfer keinerlei technische Unterstützung. Eine korrekte Interpretation der Messwerte, Kontrolle der vollständigen Abdeckung des Prüfbereichs und die Erstellung des Prüfprotokolls verlangen eine hohe Expertise des Prüfers.

Eine vollständige und korrekte Datenaufnahme mit einer modernen Visualisierung und gleichzeitigen digitalen Datenauswertung erschließt hier enorme Potentiale. Die von Anfang an auf digitale, intelligente Datenerfassung und online-Auswertung sowie eine auf relevante Daten verdichtete digitale Informationsbereitstellung basierende Prüfkonzeption erlaubt einen enormen Innovationsschub für die zerstörungsfreie Prüfung: Mit dem am Fraunhofer IZFP entwickelten Prüfassistenz-Modul »3D-SmartInspect« wird eine neue Ära für die moderne und höchstflexible personalgestützte Handprüfung eingeläutet. 3D-SmartInspect ist ein Vorreiter-Beispiel für eine ZfP 4.0-Technologie im Zuge der Einbindung von und in digitalen Umgebungen.

Durch die digitale Erfassung des manuellen Prüf- und Handlingprozesses mit Kameras, die Verfolgung der Prüfkopfposition und automatische Auswertung der Messsignale sowie Erstellung des digitalen Prüfprotokolls entsteht eine neue Klasse von Prüfsystemen, welche die Abwicklung, Analyse und Kontrolle der manuellen Prüfung deutlich erleichtert. Gleichzeitig wird die Assistenz über die Integration und Verschmelzung mit der virtuellen Welt (Augmented Reality) auch für nicht-spezialisiertes Personal anwendbar.

Das Fraunhofer IZFP hat das erste prototypische Assistenzsystem »3D-SmartInspect« auf Basis von Wirbelstrom- und Ultraschallsensoren umgesetzt. Das System unterstützt den Prüfer im manuellen Prüfprozess interaktiv und ermöglicht gleichzeitig eine automatisierte Dokumentation der Prüfdurchführung und eine digitale Ergebnisdatenübertragung.

Vor Beginn der Prüfdurchführung muss lediglich das Kamerasystem an einer geeigneten Stelle aufgestellt werden, die den zu prüfenden Bereich optisch erfasst. Anschließend kann der Prüfer mit der Prüfdurchführung beginnen. Das Trackingmodul erkennt und verfolgt dabei die Bewegung des Prüfkopfes und protokolliert die Prüfpositionen und Messsignale. Die Messsignale werden automatisch ausgewertet und auf dem Live-Bild mit Ortskoordinaten fusioniert. Im Sinne einer Augmented Reality (AR) werden dem Prüfer auf einem Kontrollbildschirm (Notebook oder Tablet) die geprüften Bereiche und registrierten Fehleranzeigen angezeigt. Das Prüfergebnis kann zusätzlich mittels einer AR-Brille (MS HoloLens) visualisiert werden und digital an einen Server oder eine Datenzentrale übertragen werden.

3D-SmartAssist Sensoren werden so Bestandteil des Internet of Things. Die auf die relevante Information weiterverarbeiteten Daten lassen sich auf einfache Weise in das digitale Produkt- und Materialgedächtnis übermitteln und passend speichern. Eine Kombination mit kollaborativer Robotik eröffnet neue Anwendungsfelder der Mensch-Maschine-Interaktion für den industriellen Einsatz.



*Der Batterieprüfstand zur dynamischen Prüfung von geladenen Zellen.
© Fraunhofer EMI*

Der Aufbau zum Röntgentest am Fraunhofer EMI in Efringen-Kirchen. © Fraunhofer EMI



■ Röntgendiagnostik bei Crashtests

Moderne, leichte Fahrzeuge werden aus immer komplexeren Materialien und Bauteilen gefertigt. Um den Aufbau dieser Strukturen zu verstehen, haben sich in Forschung und Entwicklung das Röntgen und die Computertomografie etabliert. Seit dem Jahr 2016 erforscht das Fraunhofer EMI im Crashzentrum der Fraunhofer-Gesellschaft das Potenzial der Röntgendiagnostik bei Crashtests mit der neuartigen X-ray-Car-Crash-Technologie (X-CC). Mit der neu installierten Technologie ist es erstmals möglich, das Innere eines Fahrzeugs während des Crashes sichtbar zu machen.

Röntgen ist eine etablierte Technologie der Materialforschung, die sich bisher im industriellen Bereich jedoch überwiegend auf statische und quasistatische Untersuchungen beschränkt.

Mit der X-CC-Technologie kombiniert das Fraunhofer EMI das Röntgen mit hochdynamischen Verformungsprozessen unter Crashbedingungen und liefert dadurch einen Beitrag zum Verständnis des Verhaltens innenliegender Strukturen beim Crash. Die Ergebnisse fließen in die Simulation zur Optimierung von Strukturen, Bauteilen oder Werkstoffen ein. Langfristiges Ziel ist es, ein Röntgenvideo der Crashversuche zu erhalten. Der Geschäftszweig hat sich für das Fraunhofer EMI zu einem erfolgreichen und großen Forschungsfeld entwickelt und trifft auf gesteigertes Interesse in Industrie und Forschung. Das EMI entwickelt neue Methoden, Simulationen und Anwendungsfelder, führt Industrieprojekte mit namhaften Kunden durch und plant die stetige Weiterentwicklung des Testaufbaus für zukünftige Untersuchungen.

■ Mechanisches Verhalten von Batterien unter dynamischer Last / Batterieprüfstand

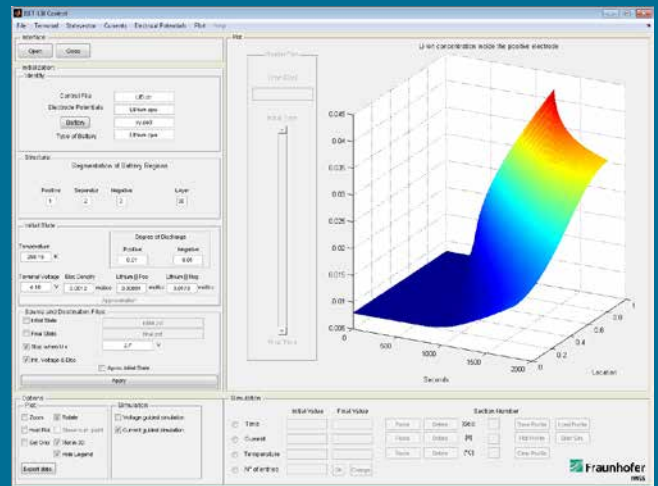
Der Wunsch nach einer steigenden Zahl von Elektrofahrzeugen auf unseren Straßen fordert den Einsatz leistungsstarker mobiler Energiequellen. Mit der ständig steigenden Energiedichte und Gesamtkapazität verfügbarer Energiespeicher wächst auch deren Gefährdungspotenzial. Der Schwerpunkt der Batterieprüfung am Fraunhofer EMI liegt in der Untersuchung des Crashverhaltens von Batterien. Dabei werden unterschiedlichste Crashszenarien in Versuchen nachgebildet, um den Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit, der Form und Dimension des eindringenden Objekts, des Ladezustandes oder der Ausrichtung der Zellen ermitteln zu können.

Ein besonderes Risiko für die Fahrzeugsicherheit birgt ein Crash geladener Zellen. Allein schon durch äußere Verformungen einer Zelle kann es im Innern der Batterie zu einem Kurzschluss und damit zu einem ungewollten Stromfluss kommen. Durch die Erwärmung der Zelle werden chemische Reaktionen in Gang gesetzt, die noch mehr Wärme erzeugen. Ist dann genügend Sauerstoff vorhanden, können einzelne Materialien zünden. Bei einem größeren Crash mit geladenen Zellen kommt es also häufig zu einem Brand. Die Wissenschaftler am EMI können Crashversuche an geladenen Batterien durchführen und somit Aussagen über die Risiken treffen, die von Batterien in Elektrofahrzeugen ausgehen.

Ein spezieller Prüfstand zur Charakterisierung von Li-Ionen-Zellen am Fraunhofer EMI erlaubt die zerstörende Prüfung geladener Batteriezellen bei verschiedenen Belastungsmodi vom statischen bis in den dynamischen Bereich mit Belastungsgeschwindigkeiten bis zu 10 m/s und Lasten bis zu 50 Tonnen. Eine weitere effektive Möglichkeit zur Untersuchung von Batterien bei Stauchung, Quetschung oder Zerstörung anderer Art ist die Computertomografie (CT). Mit ihr kann das Innere einer Zelle vor und nach einem Test dargestellt und Schädigungen analysiert werden.



Nutzeroberfläche des „BaSiS – Battery Simulation Studio“
© Fraunhofer IEE



■ Simulationssoftware beschleunigt Entwicklung von Batteriesystemen

Der Einsatz von Batterien ist in den letzten Jahren in vielen Industriezweigen stark gewachsen. Der effiziente Einsatz und die intelligente Systemintegration von Batterien sind entscheidend für die Nutzbarkeit und den Erfolg von Produkten und Systemen. Dies betrifft nicht nur Luft- und Raumfahrt, Kraft- und Nutzfahrzeuge sowie Powertools, sondern auch unsere kleinen elektronischen Begleiter des Alltags, wie Smartphones, Tablets oder Staubsauger und Rasenmäher.

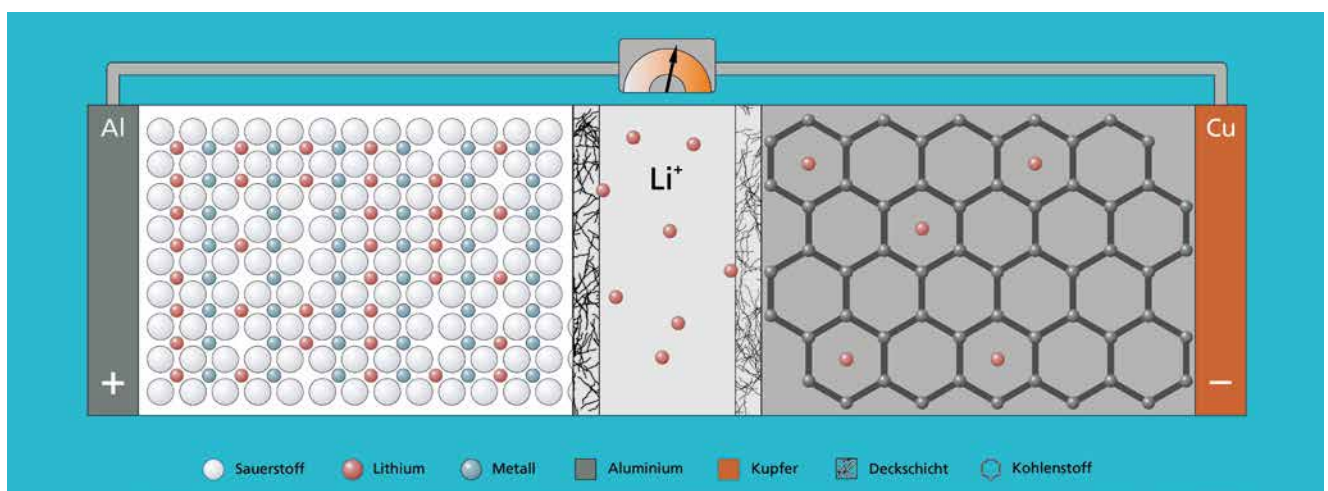
Mit dem am Fraunhofer IEE in den letzten 20 Jahren entwickelten „BaSiS – Battery Simulation Studio“ steht ein erprobtes Werkzeug zur Verfügung, das Batterien in gängigen Entwicklungsumgebungen verlässlich, sicher und genau bereitstellt und so bei der Optimierung von Entwicklungsprozessen hilft. Die Software bildet das Verhalten von Batterien physikalisch und chemisch hoch genau ab und kann für Gesamtsystemsimulationen einfach in MATLAB®

/ SIMULINK® integriert werden. Darüber hinaus lässt sich BaSiS zur Untersuchung des Verhaltens unterschiedlicher konstruktiver Parameter einer Batterie nutzen.

Das System kommt bei der Entwicklung und Optimierung von Zellmaterialien, Batterien auf Zell- und Packebene, Batteriemanagementsystemen sowie bei batteriebetriebenen Geräten, Anlagen, Fahrzeugen und Flugkörpern zum Einsatz. Batteriesimulationen sparen aufwändige Messreihen im Labor und beschleunigen Entwicklungsprozesse.

Virtuelle Batterien in Hardware-in-the-Loop-Systemen

Mit dem Echtzeitmodul des BaSiS lässt sich das Klemmenverhalten realer Batterien in Hardware-in-the-Loop-Prüfständen (HIL) nachbilden. BaSiS ermöglicht schnelle, kostengünstige und reproduzierbare Hardwaretests, beispielsweise von Batteriemanagementsystemen (BMS) und Gesamtsystemen wie Fahrzeugen. Im Gegensatz zu echten Batterien kann ein solcher Prüfstand zusätzlich alle internen Größen der Batteriezelle für die Gesamtsystementwicklung bereitstellen.





*PAN-Fasern sind das perfekte
Precursor-Material für die
Herstellung von Carbonfasern.
© Fraunhofer IAP*

*Die im Fraunhofer LBF
entwickelte hybride Leicht-
bauhinterachse reduziert das
Achsgewicht im Vergleich zum
herkömmlichen Metall-Design
um rund 40 Prozent..
© Fraunhofer LBF*



■ Leichtbaulösungen mit definierten Eigenschaften

Seit mehr als 80 Jahren forschen Wissenschaftler im Fraunhofer LBF an intelligenten Leichtbaulösungen für lasttragende Strukturen. Ein Beispiel für die Leichtbaukompetenz ist die von LBF-Wissenschaftlern entwickelte hybride Hinterachse. Sie beinhaltet eine Reihe von innovativen Lösungen: Hierzu zählt die sogenannte T-Igel®-Verbindung – ein innovatives Verbindungselement zwischen Metall- und Faserverbundbauteil, welches eine formschlüssige kerbspannungsarme Verbindung der beiden Bauteile ermöglicht. Zum anderen die Optimierung der Faserorientierung der kohlefaserverstärkte Komponente hinsichtlich der mehraxialen Belastung aus dem Fahrbetrieb.

Im Laufe des von der Europäischen Union geförderten Projekts „epsilon“ erfolgte die Auslegung der neuen leichten Hinterachse mittels der Finite-Elemente-Methode in mehreren Iterationsschritten. Parameterstudien und Konstruktionsvarianten führten schließlich zu einer deutlichen Gewichtseinsparung und einem Ergebnis, das aus zwei metallischen Seitenteilen und einem Mittelteil aus Faserkunststoffverbund besteht. Durch diese Hybridbauweise wird die Gestaltung der Anbindungsstellen an die Fahrzeugstruktur vereinfacht und der Herstellungsprozess beschleunigt.

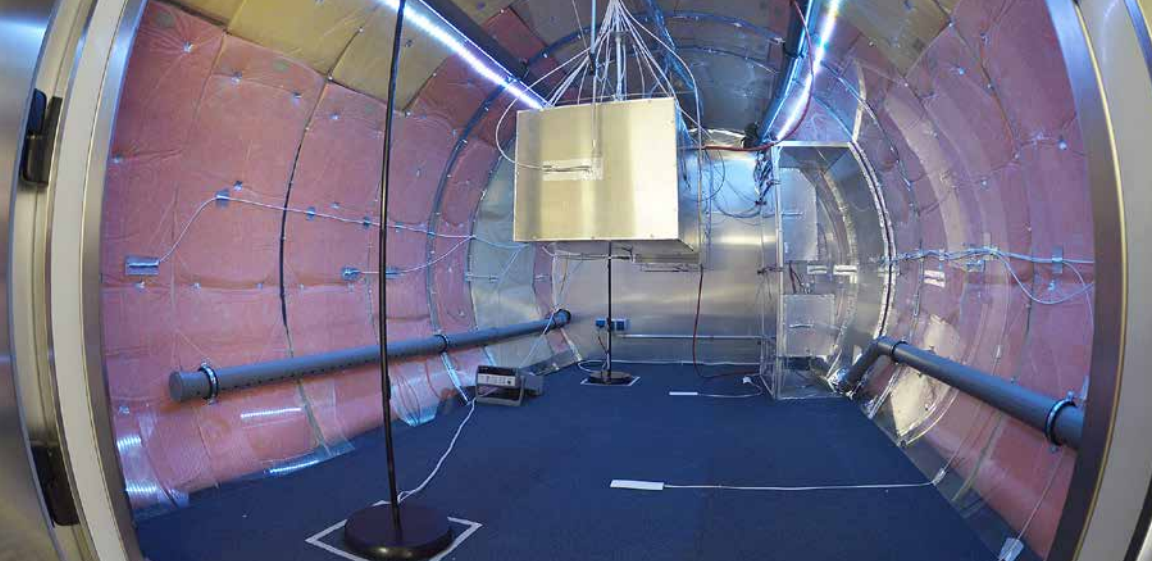
Im Fraunhofer LBF wurde der komplette Entwicklungsprozess von der Konzeptfindung über die numerischen Berechnungen, die prototypische Fertigung bis hin zur Bauteilprüfung abgebildet. Die entstandene Gewichtsreduktion gegenüber den entsprechenden konventionellen Fahrwerkskomponenten erreicht bei der Hinterachse rund 40 Prozent. Die Zuverlässigkeit der Leichtbauhinterachse wurde im realen Fahrversuch bestätigt.

■ Kostengünstige Carbonfasern für den Leichtbau

Ob in Flugzeugen, Rennwagen oder Fahrrädern – Carbonfasern sind das fortschrittlichste Verstärkungsfaserprodukt für extrem leichte Verbundwerkstoffe. Die Durchdringung von Massenmärkten wie der Automobilindustrie, dem Bauwesen und anderen Industriezweigen, die derzeit Glas- und Naturfasern verwenden, bleibt jedoch schwierig. Ein Hauptgrund sind die hohen Produktionskosten der heutigen Carbonfasern. Die ComCarbon®-Technologie des Fraunhofer-Instituts für Angewandte Polymerforschung IAP soll es künftig ermöglichen, Carbonfasern für den Massenmarkt kostengünstig herzustellen.

Ungefähr die Hälfte der Kosten bei der Produktion herkömmlicher Carbonfasern entsteht bei der Herstellung des Vorprodukts, der Polyacrylnitril-Faser (PAN). Diese sogenannte Precursor-Faser ist nicht schmelzbar und wird daher mit dem teuren Lösungsspinnverfahren hergestellt. Am Fraunhofer IAP wurde eine alternative PAN-basierte Precursor-Technologie entwickelt, mit der etwa 60 Prozent der Precursor-Kosten, d. h. ca. 30 Prozent der gesamten Carbonfaserkosten, eingespart werden können. Sie basiert auf einem kostengünstigen Schmelzspinnverfahren mit speziellen, schmelzbaren PAN-Copolymeren, die am Institut für diesen Zweck entwickelt wurden. Diese Precursor-Fasern können dann, nach Aufhebung der Schmelzbarkeit, wie herkömmliche Precursoren auf den etablierten Produktionswegen zu Carbonfasern konvertiert werden.

Der enorme wirtschaftliche und ökologische Vorteil des Schmelzspinnens gegenüber dem Lösungsspinnen resultiert aus mehreren Faktoren: Es sind keine Lösemittel beteiligt, die umweltschädlich sind und daher aufwändig recycelt werden müssen. Eine Tonne Spinnmasse liefert direkt eine Tonne Precursorfasern und die Spinnengeschwindigkeiten sind um ein vielfaches höher als beim Lösungsspinnen.



Im Kabinendemonstrator der Thermal Test Bench führen die Wissenschaftler des Fraunhofer IBP Untersuchungen zum Raumklima sowie zum Komfort durch.

© Fraunhofer IBP

■ Thermal Test Bench

Die Luftfahrt wird umweltfreundlicher: bis 2020 sollen die Jets 50 Prozent weniger CO₂ produzieren als die Flotte aus dem Jahr 2000, 80 Prozent weniger Stickoxide ausstoßen und nur noch halb so laut lärmern. Zudem gilt es, in den Bereichen Design, Herstellung, Instandhaltung und Recycling innovative Lösungen zu entwickeln und den Lebenszyklus von Flugzeugen zu optimieren.

Dies sind die hochgesteckten Ziele, denen sich das EU-Projekt Clean Sky verschrieben hat. Die bislang größte europäische Technologieinitiative startete im Jahr 2008. In diesem Rahmen wurde der Auftrag erteilt, die Thermal Test Bench zu entwickeln, zu konstruieren und in Betrieb zu nehmen. In dieser Versuchsanlage lassen sich innovative Flugzeugarchitekturen und Geräte sowie neue Auslegungswerkzeuge thermisch validieren. Mit Erfolg: Der Demonstrator wurde 2014 in Betrieb genommen und hat seitdem zuverlässig die Testprogramme durchlaufen. Damit ist es möglich, Architekturen vollständiger Business-Jet-Sektionen auf ihre thermische Effizienz und Funktionstüchtigkeit zu überprüfen, was besonders durch den Übergang zu »More Electric Aircraft«-Architekturen stärker in den Fokus rückt.

Es stehen hierzu drei Mock-ups zur Verfügung:

Carbon-Cockpit:

Mit ihm lässt sich das thermische Verhalten von Carbonstrukturen analysieren.

Kabinensektion:

Sie ermöglicht es, das Kabinenklima und den Komfort zu untersuchen, ebenso wie Unterbodengeräte und die Nutzbarkeit des Tanks als Wärmespeicher.

Heckrumpfteil:

Hier werden schwerpunktmäßig Avioniv-Bay-Architekturen getestet und Systeme mit extremer Wärmeentwicklung integriert.

Diese drei Rumpfteile können Umweltbedingungen ausgesetzt werden, wie sie am Boden und im Flug auftreten können, sodass auch Flugsituationen sicher am Boden getestet werden können. Präzise Anlagen für die Luftkonditionierung sorgen für die Klimatisierung des Innenraums: Über sie lässt sich ein breites Spektrum an Lufttemperaturen, -feuchten und -mengen für die Kabinenventilation bereitstellen. Weiterhin entwickelten und optimierten die Wissenschaftler die Steuerung und Regelung der Thermal Test Bench. Das Ergebnis: Die geforderten Testbedingungen werden äußerst genau und gleichmäßig erreicht, mit den Versuchsaufbauten lassen sich daher Tests gemäß dem Luftfahrtstandard Do160 durchführen. In der Testkampagne für den Technologie-Demonstrator »Heatpipe« konnte eine solche Untersuchung erstmals umgesetzt werden. Parallel hierzu wurde das Fraunhofer Thermische Modell weiterentwickelt und auf der Thermal Test Bench validiert. Um Raumklima-Applikationen auszulegen, braucht man räumlich aufgelöste Temperaturverteilungen. Klassische Rechenverfahren für den Entwurfsprozess konnten diese bisher nicht liefern. Auch aufwendige Simulationen für die fortgeschrittene Auslegung, wie Computational Fluid Dynamics (CFD), bringen in diesem Stadium wenig: In großen Räumen haben sie ein chaotisches Strömungsverhalten und bringen bei sehr hohem Rechenaufwand nur wenig praktischen Mehrwert.

Das am Fraunhofer IBP entwickelte thermische Modell unterteilt einen Raum hingegen in typischerweise 20 bis 500 Zonen, die miteinander im Luftaustausch stehen. Hier können Wärmequellen, Lüftungsöffnungen, Wände und Fenster platziert und mit benachbarten Zonen verbunden werden. Auch die Einflüsse der Wärmestrahlung aller vorhandenen Oberflächen aufeinander werden berücksichtigt, ebenso wie der Einfluss der Sonnenstrahlung in Abhängigkeit von Ort und Zeit. Dieser Ansatz reduziert den Rechenaufwand um den Faktor 1000 bis 10 000 bei vergleichbar aussagekräftigen Ergebnissen. Entwerfen Ingenieure ein Flugzeug, können

Miniplant-Anlage des Fraunhofer ISE zur Synthese flüssiger Kraftstoffe wie Methanol aus CO₂ und H₂. © Fraunhofer ISE



sie daher nun viele verschiedene Architekturen miteinander vergleichen und die vielversprechendsten identifizieren. Das Thermal Model Generation Tool und das Ecolonomic Analysis Tool sorgen dafür, dass dieser Prozess automatisch abläuft.

Doch sind die Ergebnisse für realistische Anwendungsfälle repräsentativ? Dies muss nachgewiesen werden, soll diese Toolkette in der Luftfahrt eingeführt werden. Die klimatischen Bedingungen sind extrem, die geometrischen Strukturen kompliziert und das Klima im Flugzeug muss daher über aufwendige Klimatisierungssysteme reguliert werden. Mit der Thermal Test Bench lassen sich repräsentative Untersuchungen jedoch bereits am Boden durchführen. Die Vorhersagen des thermischen Modells liegen dabei deutlich im Rahmen der geforderten und validierbaren Genauigkeit und liefern realitätsnähere Ergebnisse als parallel durchgeführte CFD-Berechnungen, das zeigten Testkampagnen am Cockpit- und Kabinen-Mock-up.



Der Unterbodenbereich des Kabinendemonstrators bietet vielfältige Möglichkeiten thermische Untersuchungen mit Hilfe so genannter Equipmentsimulatoren durchzuführen.

© Fraunhofer IBP

■ Synthetisierung von nachhaltigen Kraftstoffen und Chemikalien aus CO₂ und H₂

Die Power-to-Liquid (PtL)-Technologie – die Umwandlung von CO₂ mit nachhaltig erzeugtem H₂ zu flüssigen Verbindungen – bietet zahlreiche Vorteile. Der steigende Anteil erneuerbarer Energien (Wind, Photovoltaik) sorgt für stärkere Schwankungen in der Stromerzeugung. Mit Technologien wie der Wasserelektrolyse und nachfolgender Methanolsynthese kann dieser schwankende Strom in chemischer Form gespeichert werden und steht so u.a. als saisonaler Energiespeicher zur Verfügung. Weitere Anwendungen sind die Synthetisierung von alternativen Brennstoffen mit verbesserten Brenneigenschaften und die Herstellung von wertvollen Plattformchemikalien, mit denen eine nachhaltige und sichere Energie- / Feedstock-Versorgung erreicht werden kann. Da die PtL-Technologie CO₂ aus Abgasströmen, Biomasseprozessen und der Luft als Feedstock für Brennstoffe und die chemische Produktion nutzt, verringert sie die Abhängigkeit von Rohöl und Erdgas. Gleichzeitig ermöglicht die Aufwertung des Plattformprodukts Methanol durch innovative Katalysator- und Verfahrensgestaltung die Herstellung von nachhaltigen Brennstoffen wie Dimethylether (DME) und höhere Oxymethylenether (OME).

Am Fraunhofer ISE wird in einer vollautomatisierten Miniplant-Anlage die Synthese flüssiger Kraftstoffe wie Methanol aus CO₂-reichen Feedgasen und H₂ erprobt und weiterentwickelt. Der Schlüssel zu einer erfolgreichen Entwicklung der PtL-Technologie ist die energieeffiziente Methanolsynthese auf der Grundlage der direkten Hydrierung von CO₂, wodurch der Ausstoß des Treibhausgases stark reduziert werden kann. Die Forscher des ISE arbeiten daran, ein tieferes Verständnis der Mechanismen der Synthese zu erhalten, aktivere, selektivere und stabilere Katalysatoren zu entwickeln und den verfahrenstechnischen Prozess zu verbessern, was auch eine Optimierung des Gesamtsystems beinhaltet.



Die UD-Tape-Anlage von KraussMaffei Berstorff am Fraunhofer PAZ eröffnet neue Dimensionen in der Verarbeitungsgeschwindigkeit und Variationsbreite.

© KraussMaffei Berstorff

PKW-Frontendträger aus Hochleistungsthermoplaste in der Großserienproduktion.

© Fraunhofer IMWS/Sven Döring



■ Thermoplastbasierter Leichtbau für die Großserie

Polymere Verbundwerkstoffe sind heute vor allem im Bereich der Mobilitätsanwendungen unentbehrlich. Neben der weiteren Optimierung der mechanischen Eigenschaften bei gleichzeitig geringer Dichte steht zunehmend die Wirtschaftlichkeit im Fokus der Entwicklungen. Das Geschäftsfeld Polymeranwendungen am Fraunhofer-Institut für Mikrostruktur von Werkstoffen und Systemen IMWS ist Spezialist für die Erforschung sowie Optimierung von Polymermaterialien und arbeitet an der Entwicklung von neuartigen thermoplastbasierten Halbzeugen und Leichtbaulösungen für die Großserienproduktionen. Das Fraunhofer IMWS widmet sich hierbei Fragen des Einsatzes von polymeren Werkstoffen von der Auswahl der Rohstoffe über die Verarbeitungstechnologie, den daraus resultierenden Verarbeitungs-Struktur-Eigenschafts-Beziehungen bis hin zu den angestrebten Bauteileigenschaften. Im Bereich der faserverstärkten Thermoplaste wird die gesamte Wertschöpfungskette von der Mikrostruktur des Werkstoffs über den Compoundier- und Halbzeug-Prozess bis hin zum großserienfähigen Bauteil nach Maß betrachtet.

Am Fraunhofer-Pilotanlagenzentrum für Polymersynthese und -verarbeitung PAZ, das gemeinsam mit dem Fraunhofer-Institut für Angewandte Polymerforschung IAP betrieben wird, steht ein Maschinenpark mit modernsten Anlagen zur Verfügung. Gemeinsam mit Partnern aus der Industrie und Forschung werden hier neue und praxisrelevante Lösungen erforscht. So bietet zum Beispiel die mit KraussMaffei Berstorff entwickelte UD-Tape-Anlage großserienfähige Verarbeitungsgeschwindigkeiten bis zu 20 m/min und Tape-Breiten von 500 mm. Dabei können Verstärkungsfasern aus Kohlenstoff, Glas oder anderen Materialien wie Basalt in unterschiedliche thermoplastische Matrices mittels Schmelzeimprägnierung eingebettet werden. Auf der Basis dieser unidirektionalen endlosfaserverstärkten Schichten (UD-Tapes) lassen sich materialeffiziente und beanspruchungsgerechte Lamine herstellen. Hybridspritzgussverfahren zum Thermoformen

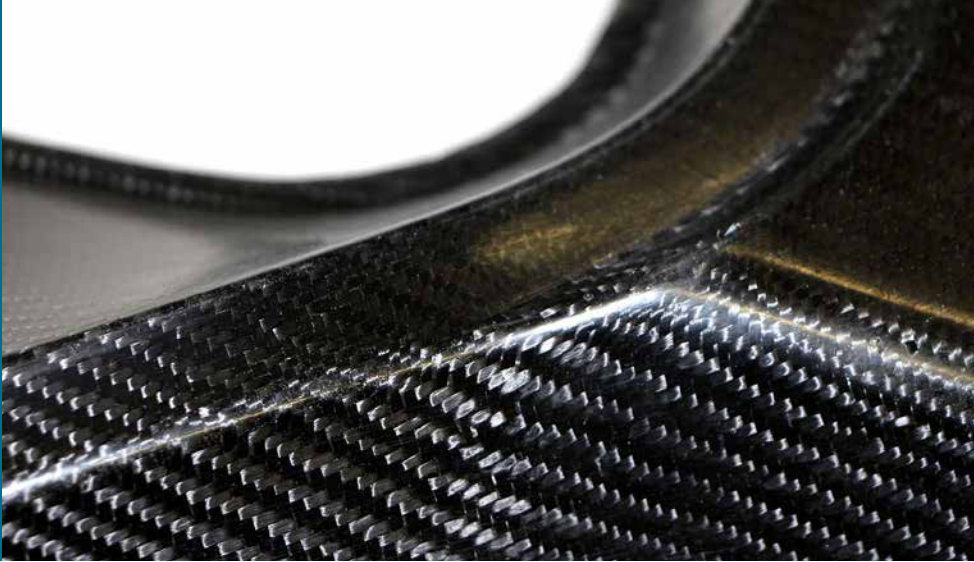
und Hinterspritzen der tape-basierten Lamine ergänzen die Verarbeitungsmöglichkeiten und ermöglichen die wirtschaftliche Herstellung von Leichtbaustrukturen in kurzen Verarbeitungszyklen im Bereich von einer Minute.

Ein weiterer Forschungsschwerpunkt des Fraunhofer IMWS gemeinsam mit der ThermHex Waben GmbH beinhaltet die Entwicklung von serientauglichen Sandwichhalbzeugen und Weiterverarbeitungstechnologien für die Herstellung von funktionalisierten Leichtbaustrukturen. Das Organoblech-Sandwich-Halbzeug besteht aus einem thermoplastischen Wabenkern und aus thermoplastischen Tape-Decklagen, die in einem kontinuierlichen sowie automatisierten Falt- und Laminier-Prozess hergestellt werden. Dies erlaubt eine wirtschaftliche Fertigung bei gleichzeitiger Ausnutzung der vorteilhaften mechanischen Eigenschaften der Sandwichbauweise. Ein weiteres Kompetenzfeld sind biobasierte Werkstoffe, wobei sowohl Naturfasern als auch biobasierte Matrices in Compounds und endlosfaserverstärkten Tapes untersucht werden, um somit Halbzeuge und Bauteile mit hoher Nachhaltigkeit sowie Recyclingfähigkeit erzeugen zu können. Prozessbegleitend werden am Fraunhofer IMWS mithilfe von zerstörungsfreien Methoden wie Röntgen-, CT- oder Thermographie-Untersuchungsverfahren werkstoffmechanische und mikrostrukturelle Analysen durchgeführt. Bewertungen der Halbzeuge und Bauteile, beispielsweise hinsichtlich der Faserorientierung und Porenbildung, sind wichtig, um Aussagen über die lokalen Eigenschaften wie Steifigkeit, Festigkeit oder Lebensdauer und die Produktqualität treffen zu können.



Umgeformte Organosandwichstrukturen mit thermoplastischem Wabenkern und Deckschichten aus UD-Tape-Laminaten.

© Fraunhofer IMWS/Sven Döring



*Carbon- und hanffaser-
verstärktes Bauteil.*

© Fraunhofer WKI / M. Lingnau

■ Neue naturfaserverstärkte Hybridverbundwerkstoffe

Unternehmen in der Automobilindustrie, Luft- und Raumfahrt verwenden zunehmend Faserverbundwerkstoffe, um leichte, hochfeste und funktionalisierte Bauteile einzusetzen. Welche Materialkombinationen konkret verwendet werden, hängt von der späteren Anwendung ab. Der Einsatz von Carbonfasern ist in vielen Bereichen technisch sehr sinnvoll, jedoch häufig nicht zwingend erforderlich. Bei einer ökonomischen und ökologischen Betrachtung bieten sich verschiedene biobasierte Werkstoffe an.

Forscher des Anwendungszentrums HOFZET des Fraunhofer-Instituts für Holzforschung kombinieren in einem Arbeitsgang Natur- und Carbonfasern in einem textilen Halbzeug. Durch die so genannte Multilayer-Technologie können somit die technisch hochwertigen Carbonfasern gezielt dort eingesetzt werden, wo sie im Bauteil benötigt werden. Gleichzeitig können Polymerfasern in das Gewebe integriert werden, so dass eine thermoplastische Verarbeitung direkt möglich ist.

Das Ergebnis: Die Bauteile sind kostengünstig, haben eine sehr hohe Festigkeit, gute akustische und schwingungsdämpfende Eigenschaften und sind deutlich ökologischer als reine Carbon-Bauteile.

Spezielle Beschichtungen der Garne und/oder Gewebe sorgen dafür, dass sich die Naturfasern bestmöglich mit der Kunststoffmatrix verbinden. Eine solche, aus werkstofftechnischer Sicht optimierte, Vorbehandlung ist bei Textilfasern

weitgehend Neuland. Die Festigkeiten des Materials steigen so um bis zu 50 Prozent bei optimaler Faser-Matrixhaftung gegenüber einer schlechten Grenzflächenqualität.

Die Forscher untersuchen auch, wie sich die Verarbeitungsprozesse für die neuen Werkstoffe industriell umsetzen lassen. Ebenso berücksichtigen sie bei den entwickelten Hybridwerkstoffen bereits im Vorfeld, wie sich diese wiederverarbeiten lassen oder wie einzelne Materialkomponenten für einen neuen Einsatz zurückgewonnen werden können. Je nach Materialzusammensetzung verfolgen sie verschiedene physikalische, thermische und chemische Recyclingansätze. Am Ende erfolgt eine ökologische, ökonomische und technische Bewertung der gesamten Prozesskette.



Herkömmliche und biobasierte Faserverbundwerkstoffe.

© Fraunhofer WKI



*Fertigung von Strukturbauteilen für den Fahrzeugleichtbau im Preform Center.
© Fraunhofer ICT*

■ Prozessentwicklung zum sequenziellen Preforming textiler Halbzeuge

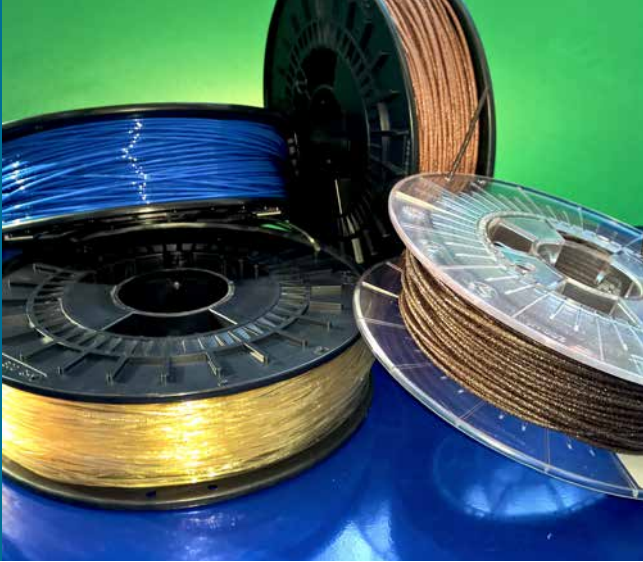
Der Klimawandel und seine Folgen drängen die Gesellschaft weltweit zu einem energie- und ressourceneffizienten Lebensstil. Nur wenn die Emission von Treibhausgasen in den nächsten Jahren stark zurückgeht, lässt sich die Erderwärmung langfristig begrenzen. Da die emittierten Schadstoffe unmittelbar vom Energieverbrauch eines Fahrzeuges abhängen, wird der Leichtbau in der Fahrzeugindustrie zukünftig an strategischer Relevanz gewinnen.

Neben den etablierten Leichtbauwerkstoffen kommen immer häufiger faserverstärkte Kunststoffe zur Anwendung. Diese haben aufgrund ihrer dichtespezifischen Materialeigenschaften großes Potenzial. Insbesondere Hochleistungsfaserverbunde mit hohem Faservolumengehalt, sind aufgrund ihrer hohen mechanischen Eigenschaften von besonderem Interesse. Vor allem anisotrope, lastpfadorientierte Lagenaufbauten bieten Einsatzmöglichkeiten für hochfeste Strukturbauteile in Leichtbauanwendungen. Um dieses Werkstoffsystem erfolgreich in die automobiler Großserie einzuführen bedarf es zukünftig automatisierter, robuster und qualitätsgesicherter Fertigungstechnologien.

Das Technologie-Cluster Composites (TC²) zielte unter anderem auf die Industrialisierung der RTM-Prozesskette zur Fertigung von Strukturbauteilen für den Fahrzeugleichtbau ab. Herausragendes Merkmal von TC² war die ganzheitliche Betrachtung der technologischen Herausforderungen, die nicht von Einzelproblemen ausgeht, sondern Zusammenhänge und Wechselwirkungen innerhalb durchgängiger Ketten in den Fokus stellt.

Betrachtet man die Kostenstruktur entlang der RTM-Prozesskette wird deutlich, dass dem automatisierten Preforming eine Schlüsselfunktion zukommt. Durch Automatisierung der Handhabungsoperationen sowie des Umformvorgangs (Drapierprozess) innerhalb des Preforming-Verfahrens können Zykluszeiten bei der Produktion drastisch verringert werden, was zu einer signifikanten Reduktion der Gesamtproduktionskosten des RTM Prozesses führt. Gleichzeitig steigt bei zunehmendem Automationsgrad die Reproduzierbarkeit der Bauteilqualität, was sich unwillkürlich in sinkenden Produktionsausschussraten bemerkbar macht.

Im Rahmen von TC² wurden durch die beteiligten Verbundpartner Fraunhofer ICT, Institut für Flugzeugbau der Universität Stuttgart (IFB), Institut für Textil- und Verfahrenstechnik Denkendorf (ITV) sowie der Institute für Produktionstechnik (wbk) und Fahrzeugsystemtechnik (FAST) des Karlsruher Instituts für Technologie grundlegende Drapier- und Fixierstrategien zur Preformherstellung entwickelt und validiert. Für die automatisierte Herstellung komplex geformter Bauteilgeometrien hat sich das sequenzielle Umformen von kompletten Lagenaufbauten, sog. Stacks, mit Hilfe eines Mehrfachstempel-Werkzeuges herausgestellt. Dabei wurden die Lagenaufbauten lokal vorgespannt. Zur Form- und Lagefixierung der textilen Halbzeuge hat sich die lokale Applikation reaktiver Bindersysteme bewährt. Basierend auf diesen grundlegenden Vorarbeiten wurde von der Dieffenbacher GmbH ein PreformCenter zur automatisierten Preformherstellung konzipiert und am Fraunhofer ICT installiert. Mit Hilfe dieser Anlagentechnik kann die komplette Preform Herstellung vom Lagenzuschnitt über die Binderapplikation bis hin zur Formgebung abgebildet werden. Die Verknüpfung der Einzelprozessschritte wird durch geeignete Handhabung sichergestellt. Diese erfolgt durch ausgewählte Greifer als Endeffektoren der eingesetzten Roboter.



*Funktionelle Filamente für den
3D-Druck. © Fraunhofer IFAM*

■ Funktionale Polymerkomposite für innovative Funktionsintegration

Neue Bauteile bzw. Materialien mit zusätzlichen Funktionen auszustatten ist ein seit Jahren zu beobachtender Trend in der Produktneu- bzw. Weiterentwicklung. Dem aktuellen Wunsch nach mehr Funktionsintegration kommt das Fraunhofer IFAM in Bremen mit der dort entwickelten Materialklasse der „Funktionalen Polymerkomposite“ entgegen.

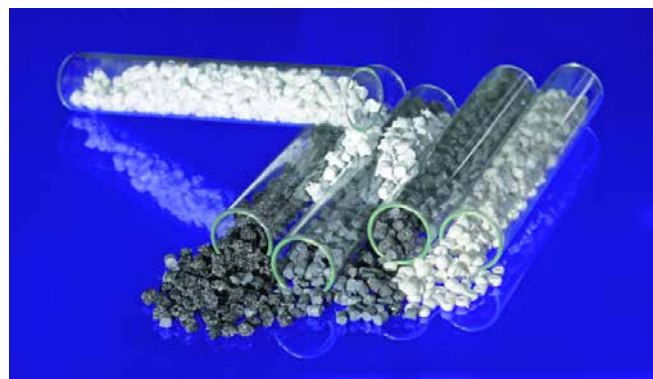
Das Materialkonzept basiert auf thermoplastische Polymere, in ihrer klassischen Charakteristik oder als weichflexible Elastomere. Innovative Compoundtechniken generieren im Zusammenspiel mit den jeweils gewünschten Füllstoffen hochleistungsfähige Kunststoffkomposite für die unterschiedlichsten Anwendungsbereiche. Als Füllstoffe kommen sowohl metallische Mikrofasern als auch Pulver in unterschiedlicher Art in Frage. Diese können im entsprechenden Fall, mit niedrigschmelzenden Legierungen kombiniert werden. Des Weiteren können sämtliche kohlenstoffhaltige als auch keramische Zuschlagstoffe in die jeweiligen Matrixpolymere eincompoundiert werden. Füllstoffgehalte von über 80 Gew.% lassen sich mit dieser Technik problemlos realisieren und führen zu Funktionen im Kunststoff, die den Eigenschaften der entsprechenden Füllstoffe sehr nahe kommen.

Elektrische Leitfähigkeiten von hohen 106 S/m sind genauso darstellbar wie thermische Leitfähigkeiten von über 10 W/mK. Ein weiterer großer Anwendungsbereich ist die Funktionalisierung des Materials hinsichtlich der Verwendung im Bereich des EMV-Schutzes. Hier kann über einen sehr breiten Frequenzbereich ein analoges Dämpfungsverhalten im Vergleich zu rein metallischen Werkstoffen erreicht werden.

Neben den physikalischen Eigenschaften zeigen die „Funktionalen Polymerkomposite“ weitere Besonderheiten auf. Trotz ihrer hohen möglichen Füllgehalte weisen die Materialien ein noch gutes mechanisches Eigenschaftsspektrum als auch Verarbeitungsverhalten auf. So lassen sich die Komposite, mit geringen Anpassungen im Prozess, mit den etablierten Fertigungstechnologien der Kunststoffbranche verarbeiten.

Mittels Extrusion oder Spritzguss (speziell beim Mehrkomponenten-Spritzguss bzw. Extrusion) können so funktionsintegrierte Bauteile, rationell und kostenminimiert, entstehen. Aktuell wird das Verarbeitungsportfolio der Kompositmaterialien durch den FFF Druck ergänzt. Hierfür wurde auf technologischer Seite eine spezielle Produktionslinie für hochgefüllte Polymerkomposite geschaffen, auf der die unterschiedlichen Materialvarianten zu einem entsprechend verdruckbaren Filament verarbeitet werden können.

Die Funktionalen Polymerkomposite ermöglichen eine deutliche Vereinfachung der Realisierung der Integration additiver Funktionen in ein Bauteil. So können neue Anwendungen zu neuen oder verbesserten Produktideen führen, bzw. gute technische Lösungen gegebenenfalls noch besser werden.



Gefüllte Kunststoffgranulate als Ausgangsmaterial zur Herstellung der 3D- Druck-Filamente. © Fraunhofer IFAM



*Verbesserte Rolleigenschaften
bei gleichbleibendem Grip –
möglich durch Optimierung des
»Füllstoffnetzwerkes«.
© istock / santiphotos*

*Karte der Solareinstrahlung
in Europa mit einem Teil der
erfassten Routen. © European
Union, 2012 PVGIS (Karte)/
topael/shutterstock (truck)*



■ Photovoltaik auf Nutzfahrzeugen: Neue Anforderungen, neue Potenziale

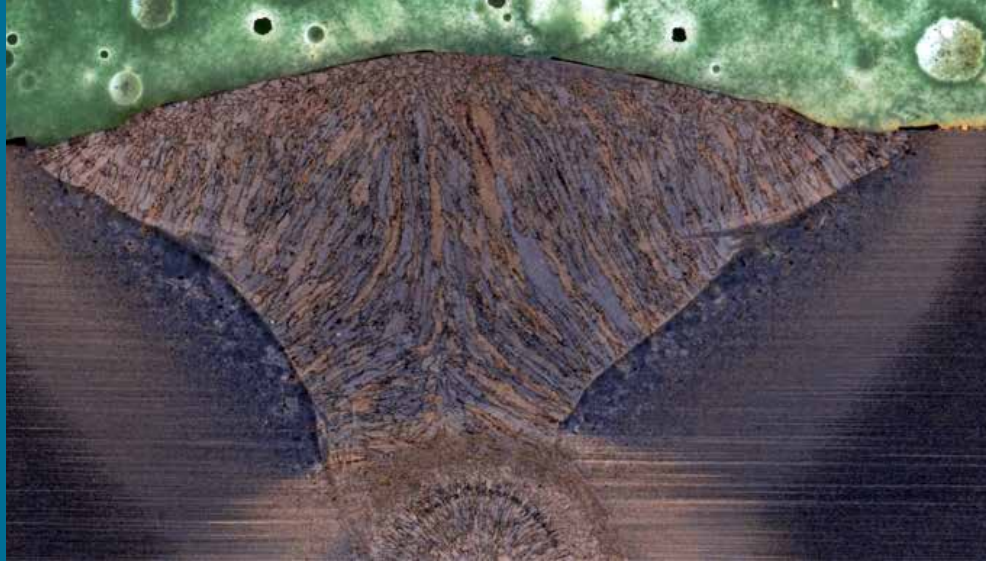
In den vergangenen Jahren sind Photovoltaik-Module durch die stark gesunkenen Kosten und Innovationen in der Zell- und Modultechnologie für den Einsatz im Mobilitätssektor immer attraktiver geworden. Besonders die großen Dachflächen von Nutzfahrzeugen eignen sich für anwendungsoptimierte PV-Module in flexibler und leichter Bauweise. Dazu werden neue Materialien erprobt und eingesetzt. Der während des Fahrbetriebs erzeugte Solarstrom reduziert den Dieserverbrauch und senkt damit die CO₂-Emissionen und Fahrtkosten. Das Fraunhofer ISE hat mit Unterstützung des Fraunhofer CSE (Boston) und in Kooperation mit drei Expeditionen untersucht, wie groß das Potenzial für mobile PV-Anwendungen auf Nutzfahrzeugen ist. Und sie gingen der Frage nach, wie sich die Anforderungen an PV-Module auf Fahrzeugdächern von denen fest installierter Module unterscheiden.

Dazu wurden sechs LKW mit einem Messaufbau ausgestattet, der minütlich die Einstrahlung, Temperatur und Geschwindigkeit erfasste. Über einen Zeitraum von bis zu 15 Monaten wurden so umfassende Daten auf realen Transportrouten in Europa und Nordamerika gewonnen. Aus den Daten wurde ersichtlich, dass der Betrieb auf Nutzfahrzeugen deutlich andere Anforderungen an das PV-Modul stellt als herkömmliche Aufdach- oder Freiflächenanlagen. So lag zum Beispiel die mittlere Temperatur der Module aufgrund der Kühlwirkung des Fahrtwindes bei nur 22,6°C, bei fest installierten PV-Anlagen liegt diese bei über 60°C und reduziert die Modulleistung signifikant. Die rechnerischen Ertragspotenziale der Fahrzeuge lagen zwischen 5297 und 7395 Kilowattstunden/Jahr. Umgerechnet in Dieseläquivalente entspricht dies einer Einsparung von 1513 bis 2113 Litern jährlich für einen LKW-Trailer mit 40t. Gemeinsam mit Partnern der Mobilitätsbranche arbeitet das Fraunhofer ISE weiter an der zielgerichteten Entwicklung und Qualifizierung von PV-Technologie für den Einsatz auf Fahrzeugen, um die Chancen der PV im Verkehrssektor voran zu treiben.

■ Mikrostrukturelle Bewertung energiesparender und verschleißresistenter Reifenwerkstoffe

Kautschukbasierte Komposite, wie sie für Reifenlaufflächen eingesetzt werden, sind komplexe Materialien, die neben Kautschuk viele Zuschlagstoffe und Additive enthalten. Während der Kautschukanteil dem Material gummitypische Eigenschaften wie die hohe Elastizität verleiht, ermöglicht die Zugabe von nanoskaligen Füllstoffen wie Ruß oder Silica, andere essentielle Eigenschaften wie Härte oder Abriebfestigkeit zu beeinflussen. Diese Kenngrößen lassen sich über die Füllstoffart und den Füllstoffanteil einstellen. In Reifenkompositen ist der Füllstoffanteil so hoch, dass sich ein durchgehendes Füllstoffnetzwerk ausbildet, das die mechanischen Eigenschaften dominiert. Ein detailliertes Verständnis und die gezielte Anpassung des Füllstoffnetzwerks sind deshalb von zentraler Bedeutung für die Entwicklung optimierter Reifenmischungen und daher Forschungsgegenstand am Fraunhofer IMWS.

Die Untersuchungen des Fraunhofer IMWS an verschiedenen Kompositen zeigen, dass das Füllstoffnetzwerk nicht nur die aggregierten Füllstoffpartikel selbst, sondern auch viskoelastische Elemente enthält, die von immobilisierten, glasartigen Kautschuksegmenten an der Füllstoffoberfläche gebildet werden. Obwohl die immobilisierten Segmente nur etwa 1–3 Prozent des gesamten Kautschukvolumens im Komposit ausmachen, ist ihr Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften dramatisch. Zwischen den Füllerpartikeln bilden sich glasige Kautschukbrücken, die sukzessive beispielsweise durch einen Temperaturanstieg erweichen und so den Elastizitätsmodul des gesamten Kompositmaterials halbieren können. Mit der Folge, dass der Rollwiderstand zunimmt und zu erhöhtem Kraftstoffverbrauch führt. Dieses Zusammenspiel zeigt die hohe Bedeutung der am Fraunhofer IMWS erforschten Mikrostruktur des Füllstoffnetzwerks für die anwendungsbezogene Optimierung von Kompositen für Reifenlaufflächen.



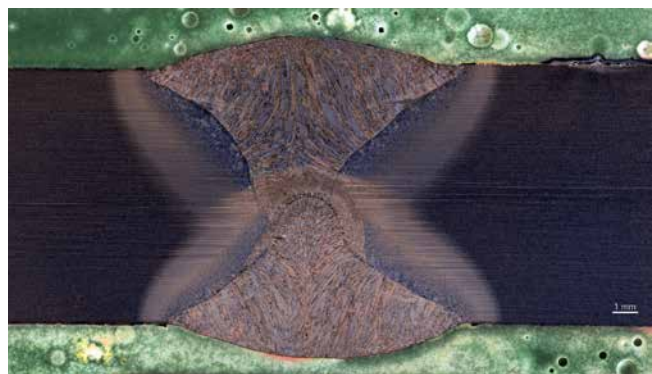
■ Risiko »Wasserstoffversprödung« bewerten: Kaltrissbildung bei hochfesten Stählen

Hochfeste Stähle spielen im modernen Fahrzeug- und Maschinenbau eine wesentliche Rolle für den Leichtbau und crashrelevante Strukturbauteile. Werden diese Stähle bei der Herstellung von Bauteilen geschweißt, können bewegliche Wasserstoff-Atome im Material Probleme verursachen: Die Atome sammeln sich langsam an Bauteilbereichen mit hohen Eigenspannungen an und machen dort den Stahl spröde. Die Folge sind sogenannte Kaltrisse, die für Bauteilausschuss sorgen können.

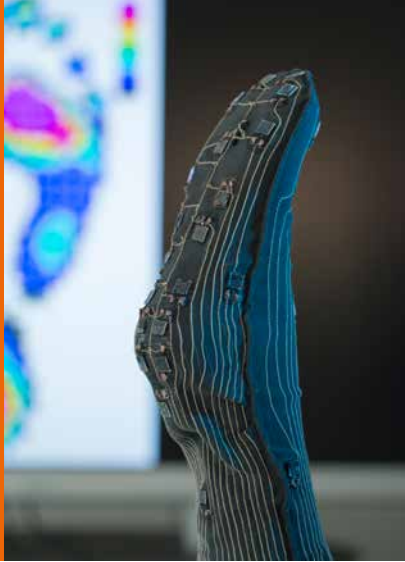
Damit Bauteilhersteller die Ausschussrate bei Bauteilen aus hochfesten Stählen nachhaltig verringern können, hat das Fraunhofer IWM bereits industriell eingesetzte Methoden der numerischen Schweißsimulation weiterentwickelt. Damit ist es nun möglich, die Geschehnisse an ganz begrenzten Bauteilorten nachzustellen, sowie für die sehr schnellen Temperaturwechsel zwischen Raum- und Schmelztemperatur, wie sie beim Schweißen auftreten.

Die zeitliche Entwicklung der Einflussfaktoren für feine Risse und ihre Wechselwirkungen untereinander sind nun genau virtuell beobachtbar – beispielsweise Härtegefüge, Eigenspannungen und die lokale Wasserstoffkonzentra-

tion, die im Laser-geschweißten Bauteil zur Rissbildung führen können. Die Besonderheit an der neuen Methode ist, dass sie auch die Wirkung sogenannter Wasserstoff-fallen berücksichtigt. Die Simulationsergebnisse dienen als Grundlage, die Prozessparameter bei Laserschweißprozessen zu optimieren: Laser-Prozessparameter, präzisere Vor- und Nachwärmtemperaturen sowie die passgenaue Glühdauer können so ermittelt werden. Auch bei der Planung von Bauteilen nutzt die Simulation: Anhand der Daten lassen sich günstigere Bauteilformen ableiten, um den Eigenspannungszustand lokal zu verbessern und somit Risse zu vermeiden.



Lichtmikroskopische Aufnahme des Schweißnahtgefüges einer Schweißverbindung. © Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM



*Druckmessstrumpf mit integrierten Elastomersensoren –
Messedemonstrator ohne zweite, äußere Textillage.
© Fraunhofer ISC*

GESUNDHEIT

■ Vorbeugender Wundschutz – Druckmessstrumpf für Diabetiker

Diabetes ist eine der großen Volkskrankheiten und kann zu schwerwiegenden Folgeerscheinungen führen. Rund 20 Prozent der Aufwendungen der Gesetzlichen Krankenversicherungen schlagen für die Behandlung zu Buche – so der Deutsche Gesundheitsbericht Diabetes 2014 der Deutschen Diabetes-Hilfe. Diabetiker in einem fortgeschrittenen Stadium der Erkrankung haben beispielsweise häufig kein Empfinden mehr in den Füßen und können daher weder Druck- noch Temperatursignale registrieren. Sie merken nicht, wenn der Fuß zu sehr belastet wird. Schon kleine unebene Stellen oder der Druck des Schuhs auf den Fuß können so zu offenen Verletzungen oder Schädigungen am Gewebe führen, die dann oft zu spät bemerkt werden und zu chronischen Wunden führen. Vielen Diabetes-Patienten müssen deshalb Zehen und Füße amputiert werden. Ein neuartiger Druckmessstrumpf soll dies nun verhindern, indem das integrierte Sensorsystem den Träger vor Druckstellen warnt.

40 Sensoren messen den Druck

Der vom Fraunhofer ISC und seinen Projektpartnern entwickelte Spezialstrumpf hat insgesamt 40 sehr dünne, dielektrische Elastomersensoren. Sie messen die Druckbelastung auf den Fuß und übernehmen so die Funktion der Nerven. Im Gegensatz zu bisherigen Systemen, die nur den Druck auf der Unterseite des Fußes wahrnehmen, hat der neuartige Strumpf Sensoren an der Sohle, der Ferse, am Spann und am Knöchel. Die Signalerfassung erfolgt somit dreidimensional, was bisher kein bestehendes Messsystem auf dem Markt leisten konnte. Ein weiterer Vorteil ist, dass sich die Sensoren, die zur Erhöhung des Tragekomforts in einer gestrickten Socke integriert sind, kostengünstig herstellen lassen.

Smartphone wertet Signale aus

Die Sensoren bestehen aus einer stark dehnbaren, weichen Siliconfolie. Deshalb lassen sie sich gut in Textilien integrieren, ohne dabei störend für den Träger zu sein. Die Folie ist beidseitig mit hochflexiblen Elektroden beschichtet. Verformt sich die Folie durch Druck oder Dehnung, verringert sich ihre Dicke, gleichzeitig vergrößert sich dabei die Fläche. Das Resultat: Die elektrische Kapazität erhöht sich. Die Kapazitätsänderungen der 40 Sensoren werden über leitfähige und dehnbare Fäden an eine elektronische Auswertungseinheit geschickt. Die ausgewerteten Daten werden per Funk an ein Smartphone oder Tablet gesendet, das dem Diabetespatienten anzeigt, ob er seine Fußhaltung oder -belastung ändern soll. So kann er schnell reagieren und sich vor gefährlichen Druckstellen schützen.

Ausblick

Um die Waschbarkeit zu gewährleisten, entwickeln die Projektpartner nun einen Strumpf, bei dem sich die Elektronik ähnlich einem Klettverschluss einfach abnehmen lässt. Kommerzielle Desinfektionsmittel erlauben aber jetzt schon die hygienische Aufbereitung des Messstrumpfes.

Weitere Anwendungsmöglichkeiten für die textilintegrierte Sensorik liegen beispielsweise im Fitnessbereich. Jogger etwa könnten mit dem Strumpf ihren Laufstil und ihre Fußhaltung kontrollieren. Auch Handschuhe mit Sensoren lassen sich herstellen, womit Robotergreifer oder Prothesen ausgestattet werden könnten. Zukünftige Weiterentwicklungen ermöglichen die Messung der Körperhaltung von Menschen, um zum Beispiel Fehlbelastungen bei langem Sitzen vorbeugen zu können.

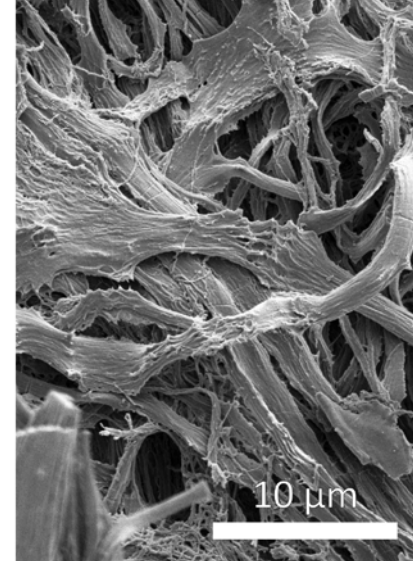


Elastinfasern können als Verbundmaterialien für Hautverletzungen genutzt werden.

© Fraunhofer IMWS

Malaria-Erkrankungen verursachen weltweit viele Todesfälle. Das Fraunhofer ISC arbeitet mit Projektpartnern an einem Schnelltest, der die zuverlässige Diagnose vereinfachen soll.

© Fraunhofer ISC



■ Nanopartikel für frühzeitige Malariadiagnose – neuer Schnelltest in der Entwicklung

Malaria-Erkrankungen sind in den Tropen und Subtropen weit verbreitet, nach Angaben des Robert-Koch-Instituts sterben weltweit jährlich rund 600 000 Menschen an den Folgen. Malaria tropica – die Malariaerkrankung mit dem schwersten Verlauf – wird durch Plasmodium falciparum hervorgerufen, einen der fünf typischen Malaria-Parasiten. Unbehandelt führt diese Krankheit in den meisten Fällen zum Tod. Eine frühzeitige und zuverlässige Diagnose ist ausschlaggebend für den Behandlungserfolg.

Um eine Infektion zu erkennen und die Erregerart richtig bestimmen zu können, benötigen konventionelle Diagnoseverfahren spezifische Laborausstattung und ein sehr gut geschultes und erfahrenes Personal. Das Fraunhofer-Translationszentrum für Regenerative Therapien am Fraunhofer-Institut für Silicatiforschung ISC entwickelt gemeinsam mit dem Fraunhofer IME und der Universität Tübingen einen einfach anzuwendenden diagnostischen Schnelltest zur Ermittlung dieses Malariatyps. Dabei werden speziell funktionalisierte fluoreszierende Nanopartikel mit hochsensitiven Antikörpern gekoppelt, die das Protein des Malariaparasiten erkennen. Zum Nachweis der Krankheitserreger in einer Blutprobe wird zeitaufgelöster Fluoreszenz-Resonanzenergietransfer (TR-FRET) genutzt. Dafür werden die Fluoreszenzeigenschaften der Nanopartikel vom Fraunhofer ISC so eingestellt, dass die Autofluoreszenz des Blutes das Messergebnis nicht verfälscht.

Das neue Verfahren wird gemeinsam mit dem Centre de Recherches Médicales de Lambaréné (CERMEL) in Gabun hinsichtlich der Verfahrensparameter, der Sensitivität, Spezifität und Durchführbarkeit unter Realbedingungen untersucht und bewertet. Erweist sich der diagnostische Test unter diesen Bedingungen als geeignet, soll ein Prototyp eines kostengünstig herstellbaren Medikits entstehen, das auch ohne spezifische Laborausstattung angewendet werden kann.

■ Wie Balsam auf die Wunde: Biobasierte Verbundmaterialien für die Haut

Zur Behandlung von komplizierten Wunden, insbesondere chronische Wunden und Brandverletzungen, werden resorbierbare Wundauflagen benötigt, also solche, die während des Heilungsprozesses vom Körper selbst abgebaut werden. Für die Entwicklung derartiger Materialien nutzen Forscherinnen und Forscher am Fraunhofer IMWS die einzigartigen Eigenschaften der natürlichen Faserproteine Elastin und Kollagen.

Bisher kommen bei der Versorgung schlecht heilender Hautverletzungen häufig Gerüststrukturen aus synthetischen Polymeren zur Wundabdeckung zum Einsatz. Diese Materialien können jedoch meist nur temporär auf der Wunde verbleiben und sind nicht elastisch wie die unversehrte Haut: Es kommt zu Kontraktionen und Spannungen. Das ist unangenehm für den Patienten und erhöht das Risiko, dass die Wundheilung nicht richtig funktioniert.

Eine Schlüsselrolle in der Entwicklungsarbeit des Fraunhofer IMWS spielen die natürlichen Faserproteine Elastin und Kollagen. Dass Haut, Lungengewebe, Blutgefäße oder Knorpel zugleich so elastisch, robust und widerstandsfähig sind und die Belastungen eines ganzen Lebens bewältigen, ist in erster Linie dem Zusammenspiel dieser beiden Proteine zu verdanken: Fasern aus Kollagen weisen eine äußerst hohe Zugfestigkeit auf und verleihen auf diese Weise den Geweben Stabilität. Elastin besitzt dazu komplementäre Eigenschaften und ist als Hauptbestandteil elastischer Fasern für die Elastizität und Dehnungsfestigkeit vieler Gewebe verantwortlich.

Am Fraunhofer IMWS werden Komposite entwickelt, die auf diesen und weiteren Ausgangsstoffen basieren und beispielsweise als Halbzeuge für Medizinprodukte dienen können. Die neuen Verbundmaterialien werden z. B. mit dem Verfahren des Elektrosplennens erzeugt und vereinen immunologische Verträglichkeit, Haltbarkeit und biologische Abbaubarkeit mit günstigen mechanischen Eigenschaften.



Untersuchungen zur Keimbelastung. ©AdobeStock

Infektionsschutz durch antibakterielle Knochenimplantate.
© Fraunhofer IGB (Gastinstitut)



■ Keine Chance für resistente Keime

Bei dem Einsetzen eines Implantats kann es durch Bakterien zu starken Entzündungen kommen. Dabei stellen multiresistente Keime und die zurückgehende Anzahl wirksamer Antibiotika die größte Gefahr für den Patienten dar. Ziel des Fraunhofer-internen Projektes »Synergy-Boost« ist es, einen signifikanten Beitrag zur Entwicklung von Strategien gegen Infektionen, insbesondere gegen multiresistente Erreger, zu leisten.

Um die implantatassoziierten Infektionen zu unterdrücken wird in dem Forschungsvorhaben die synergetische Wirkung von Antibiotika und Silber genutzt und auf Implantatoberflächen übertragen. Die Effektivität von Antibiotika kann durch Präsenz von Silberionen um den Faktor 10 bis 1000 erhöht werden. Diese verstärkende Wirkung haben die beteiligten Institute gegen verschiedene Bakterien – auch gegen multiresistente Keime (MRSA) – bereits im Labor belegt. Die Kombination bringt den Vorteil, dass weniger Antibiotikum eingesetzt werden kann und Antibiotika, gegen die sich bereits Resistenzen gebildet haben, in Kombination mit Silber wieder eingesetzt werden können. Die Resistenzschwelle der Keime kann durch die höhere Wirksamkeit überwunden werden.

Zur Vermeidung von postoperativen Entzündungen ist es essenziell, dass ein Antibiotikum an der Implantationsstelle in ausreichender Form und Dauer vorliegt. Für diese lokale Freisetzung werden Releaseschichten generiert, die die Wirkstoffkombination aus Antibiotika und Metallionen definiert abgeben können. Hierzu werden mit verschiedenen Methoden metallhaltige poröse Beschichtungen auf den Implantatoberflächen generiert. Das Antibiotikum wird erst kurz vor der Operation in die Implantatoberfläche eingebracht. Dazu wird ein Implantat mit der »Synergy-Boost Technologie« entsprechend des Antibiotogramms des Patienten individuell imprägniert. Für den Nachweis der erfolgreichen Entwicklung werden die Laborergebnisse in einem Infektionsmodell überprüft, der Prozess hochskaliert und dessen Prozessfähigkeit nachgewiesen. Zur Sicherung der Verwertbarkeit der Ergebnisse werden hierbei die grundlegenden Anforderungen an die Dokumentation für Entwicklungen in der Medizintechnik umgesetzt.

■ Infektionsschutz durch antibakterielle Knochenimplantate

Bei der Implantation von Knochenersatzmaterialien kann es passieren, dass Keime in den Körper eindringen. Infektionen am Knochen sind besonders problematisch, weil die über das Blut transportierten Antibiotika die Implantate nur in sehr geringen Konzentrationen erreichen. Der beste Schutz wäre, Infektionen von vornherein zu vermeiden. In Zusammenarbeit mit dem französischen Institut Carnot CIRIMAT in Toulouse hat das Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik IGB daher untersucht, wie sich Knochenimplantate antibakteriell ausrüsten lassen.

Das verwendete Knochenimplantatmaterial besteht aus Calciumphosphat-Apatit-Kristallen, welche in Aufbau und Struktur dem natürlichen Knochenmaterial gleichen. Um das Wachstum von Bakterien auf den Calciumphosphat-Kristallen zu vermindern oder zu unterdrücken, wurden verschiedene Stoffe und Verbindungen untersucht, beispielsweise Silber-, Kupfer- und Zinkionen, aber auch antimikrobielle Enzyme und Peptide. Da der Einsatz von Antibiotika aufgrund der Ausbildung bakterieller Resistenzen problematisch ist, wurden Antibiotika nicht verwendet.

Proben von speziell modifizierten und antibakteriell funktionalisierten Apatit-Kristallen wurden im Labor mit Bakterien, darunter typische Klinikkeime wie Staphylococcus-Arten, infiziert, mehrere Tage kultiviert und auf antibakterielle Eigenschaften und Zytotoxizität untersucht. Bei verschiedenen Metallionen war die Bakterienzahl in unmittelbarer Umgebung des Apatits um mehr als 90 Prozent reduziert. Als ebenso wirkungsvoll erwies sich eine Peptid-Beschichtung, die das Wachstum von Bakterien an der Oberfläche von Apatit-Pellets und -Granulaten hemmte.



Mittels Pulverspritzguss hergestellte Schulteranker aus Eisen-Tricalciumphosphat-Komposit.
© Fraunhofer IFAM



Additiv gefertigter Unterkieferknochen.
© Fraunhofer IKTS

■ Abbaubare, lasttragende Implantate – neue Werkstoffentwicklung für den Menschen

Die Verbesserung der Implantatversorgung ist ein stetiger Prozess, um die Lebensqualität des Menschen zu steigern. Um Operationen zur Implantatentfernung nach der Heilung zu vermeiden, Betroffenen weitere Belastungen zu ersparen und die Kosten für das Gesundheitssystem zu senken, rücken degradierbare Implantatmaterialien zunehmend in den Blick medizintechnischer Forschung und Entwicklung.

Für diesen Fortschritt wird im Rahmen des Fraunhofer-internen Projekts »DegraLast« eine Werkstoff- und Technologieplattform zur Herstellung neuartiger lasttragender Knochenimplantate aufgebaut. Dazu werden Materialien mit gezielt einstellbaren mechanischen Eigenschaften und Degradationsverhalten für den Einsatz in der Orthopädie und Traumatologie entwickelt. Zentrale Herausforderung ist dabei die Sicherstellung der mechanischen Stabilität des Gesamtsystems aus Implantat und Knochen während der gesamten Dauer der Implantatdegradation und Knochenheilung. Um diesen Anspruch zu erfüllen, forscht die Projektgruppe an innovativen Kompositwerkstoffen auf Basis biodegradierbarer Metalle und Biokeramiken.

Zur Fertigung der Implantate kommen moderne generative und formgebundene Verfahren zum Einsatz. Fraunhofer Instituten IFAM, IGB, ILT und IBMT betraten aber noch weitere Aspekte: Um die Nutzbarkeit der neuen Werkstoffe für Implantate sicherzustellen, wird gleichzeitig an biologischen Testsystemen gearbeitet, die die Analyse des Einwachsverhaltens des Knochens und das Abbauverhalten der Implantatwerkstoffe auf Zellebene in physiologischen Medien ermöglichen. Zudem werden für den späteren klinischen Einsatz auf optoakustischer Bildgebung basierende Monitoringsysteme für die Verfolgung der Degradation des Implantats und der Heilung des Knochens entwickelt.

■ Keramische Werkstoffe für die additive Fertigung

Anspruchsvolle keramische Komponenten wurden bislang unter preisintensivem Werkzeugeinsatz spritzgegossen oder mit hohen Materialverlusten aus isostatisch gepressten Formkörpern gefertigt. Neue additive Fertigungstechnologien eröffnen nun einen völlig neuen Weg für die Keramik. Mit ihrer Hilfe können Bauteile ohne zusätzliche Werkzeuge und mit sehr komplexen Geometrien hergestellt werden, die bisher mit keinem anderen Formgebungsverfahren erreicht werden konnten. Was bislang ausschließlich in der Kunststoff- und Metallindustrie möglich war, beherrschen Fraunhofer-Forscher nun auch für die Herstellung von komplizierten Geometrien aus langzeitstabiler, temperatur-, verschleiß- und korrosionsbeständiger Keramik.

Allein aus CAD-Datensätzen werden Freiformflächen, Hinterschnidungen, innere Kanäle oder Hohlstrukturen schichtenweise zu einem angepassten Individualbauteil aufgebaut. Gleichzeitig können Kleinserien für die Schmuckindustrie, Mikroreaktions- oder Gerätetechnik oder Medizintechnik schnell und wirtschaftlich realisiert werden. So lassen sich beispielsweise patientenspezifische Implantate effizient fertigen, die in ihrer Form und Beschaffenheit an die individuellen Anforderungen angepasst werden. Darüber hinaus entwickeln die Wissenschaftler angepasste Instrumente für die minimalinvasive Chirurgie, die zukünftig durch integrierte fluidische, sensorische oder thermische Elemente mehrere Funktionen in einem Schritt erfüllen können.

Die Forschung konzentriert sich aktuell auch darauf, Werkstoffsysteme für multifunktionale Bauteile aus Material- und Formenkombinationen zu entwickeln. So könnten bald Bauteile aus porösen, durchlässigen Komponenten mit dichten Mantelstrukturen gefügt werden. Damit kann die individuelle Knochenstruktur nachempfunden werden, um gezielt Implantate für Knochenkrebspatienten zu fertigen.



Druckbare (Bio-)Polymerlösungen
© Fraunhofer IGB

Mithilfe einer Zahnputzmaschine wird die mechanische Belastung von Zähnen durch Zahnpflegemittel getestet.
© Fraunhofer IMWS/Sven Döring



■ 3D-Bioprinting: Materialien für die Implantate der Zukunft

Die Medizin der Zukunft ist biologisch. Und die Zukunft hat bereits begonnen: Biomoleküle werden bereits als Wirkstoffe eingesetzt und erste zellbasierte Implantate integrieren sich vollständig in den Organismus.

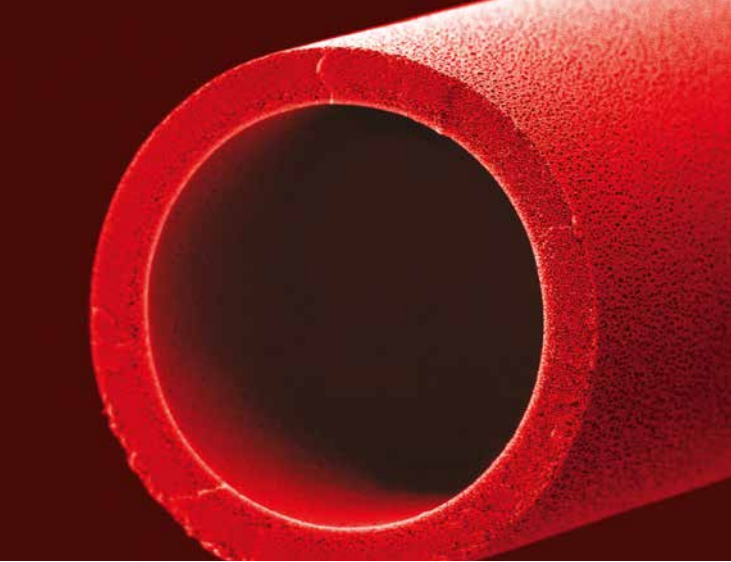
Um das Konzept biologischer Ersatzgewebe weiter Wirklichkeit werden zu lassen, optimieren Wissenschaftler am Fraunhofer IGB biologische Materialien für die Verarbeitung mit 3D-Druck-Verfahren. Dabei nutzen sie die Moleküle, die aus der natürlichen Matrix biologischer Gewebe gewonnen werden wie Hyaluronsäure oder Gelatine. Durch chemische Modifizierung der biologischen Moleküle können die Viskosität und das Gelierverhalten kontrolliert und vernetzbare Gruppen eingeführt werden. So entstehen Biopolymerlösungen, die insbesondere für Liquid-handling geeignet sind und in Druck- und Dispensierprozessen eingesetzt werden, wie beispielsweise niederviskose Gelatinelösungen, die bei Temperaturen bis 10 °C verarbeitet werden können, ohne zu gelieren.

Durch einen Photostimulus können aus diesen Biomoleküllösungen durch Vernetzung stabile Hydrogele erzeugt werden, die je nach Vernetzungsdichte in ihren mechanischen und biologischen Eigenschaften denen nativer Gewebe angepasst werden. Dieser Baukasten aus modifizierten Biopolymeren wird zunehmend für den Aufbau dreidimensionaler Modellgewebe, das sogenannte Bioprinting, und für pharmazeutische Formulierungen erprobt.

■ Materialwissenschaftliche Bewertung des Einsatzverhaltens von Mund- und Zahnpflegeprodukten

»Zweimal am Tag, mindestens zwei Minuten« – jedes Kind in Deutschland kennt diese Formel und weiß um die Bedeutung der Zahnhygiene für das eigene Wohl. Das Fraunhofer IMWS nähert sich diesem Thema, das jahrzehntelang hauptsächlich biowissenschaftlich und zahnmedizinisch betrachtet wurde, intensiv auf der Materialebene, mit hoch spannenden Ergebnissen: Die Wissenschaftler in Halle konnten mit mikrostrukturellen Untersuchungen beispielsweise die Einflüsse der Borstengeometrien von Zahnbürsten auf das Putzergebnis bewerten oder Verfärbungsprozesse durch Mundwässer erklären. Neueste Arbeiten in Halle befassen sich mit dem verbreiteten Phänomen von überempfindlichen Zähnen und deren Behandlungsmöglichkeiten. Die Industrie sucht hier nach Modellen, um Wirkstoffe und Rezepturen bereits während der Entwicklung und vor den aufwendigen klinischen Tests prüfen zu können. Die meisten existierenden Produkte gegen überempfindliche Zähne zielen auf einen Verschluss der an den freigelegten Zahnhälsen exponierten Kanäle im Dentin, um die Weiterleitung von Schmerzimpulsen an die Zahnnerven zu unterbrechen.

Die Forscher des Fraunhofer IMWS konnten ein Modell etablieren, in dem der Verschluss chemisch und abbildend charakterisiert wird und mit einer Durchflussmessung am Dentin kombiniert werden kann. Es erlaubt darüber hinaus die Integration von mechanischen und Säure-Angriffen in den Testablauf und bietet so hervorragende Möglichkeiten zur Bewertung von schmerzlindernden Produkten.



*Keimabtötende Kontaktlinsen
könnten eine Infektion mit
Akanthamöben bekämpfen.
© Fraunhofer IAP*

*Regioselektiv ausgerüstete
Hohlfasermembran für die
Blutreinigung.
© Fraunhofer IGB (Gastinstitut)*



■ Regioselektiv ausgerüstete Hohlfasermembran für die Blutreinigung

Ein speziell entwickelter Plasmaprozess ermöglicht die Herstellung von Hohlfasermembranen, die eine einstufige Blutwäsche, beispielsweise bei Sepsis, ermöglichen: Die Abtrennung der Blutzellen und die Reinigung des Blutplasmas erfolgen parallel in nur einem Verfahrensschritt.

Die Hohlfasern werden dazu regioselektiv – nur in den Poren – so funktionalisiert, dass die empfindlichen Blutzellen ungestört durch das unmodifizierte Lumen der Hohlfasermembran geschwemmt werden und aufgrund ihrer Größe die Membranporen nicht passieren können. Das Blutplasma dagegen wird durch die nanoskaligen Membranporen filtriert. Deren Oberfläche sowie die Außenseite der Membran ist dergestalt funktionalisiert, dass entzündungsfördernde Endotoxine wie Lipopolysaccharide (LPS) daran haften bleiben. Nach der Membranpassage wird das entgiftete Blutplasma wieder mit den Blutzellen zusammengeführt.

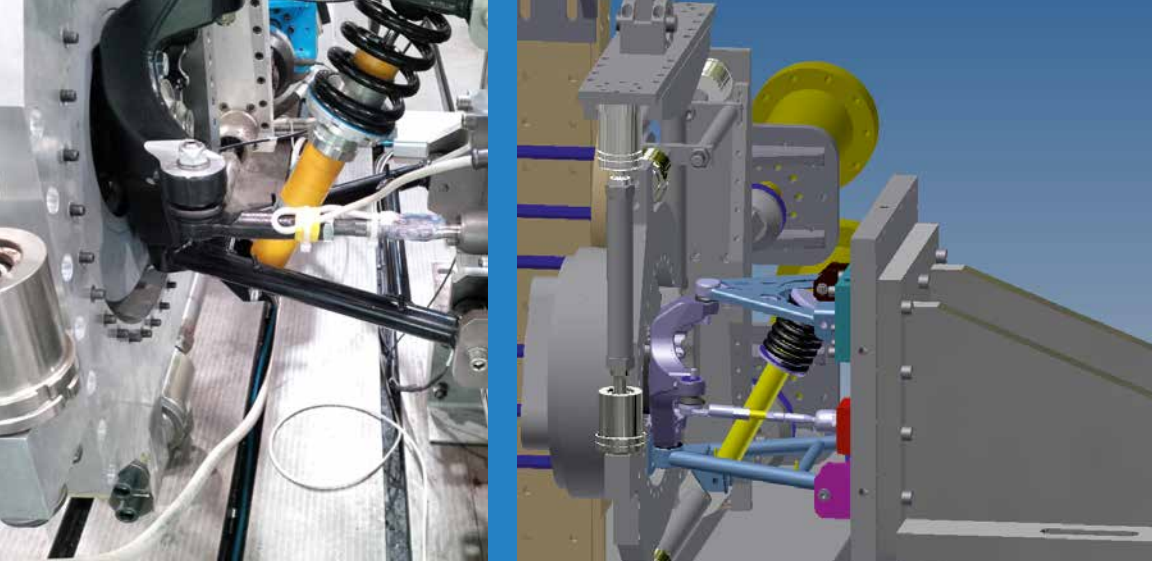
Für die selektive Membranstruktur wurden die Nanoporen über ein trockenes plasmachemisches Verfahren mit funktionellen Gruppen ausgestattet und anschließend in einer nasschemischen Behandlung mit bioaktiven Molekülen ausgerüstet.

Die Plasmafunktionalisierung erfolgte in diesem Fall mit Aminogruppen, wobei eine Funktionalisierungsdichte von rund 50 $\mu\text{mol/g}$ Faser erreicht wurde. Die Funktionsgruppen befinden sich dabei wahlweise ausschließlich auf der Innen- oder auf der Außenseite – diese Selektivität kann mit nasschemischen Verfahren nicht erreicht werden! Die Prozesse sind jedoch nicht nur auf Aminogruppen beschränkt, es lassen sich für die unterschiedlichsten Anwendungen auch über den medizinischen Bereich hinaus maßgeschneiderte Membranausrüstungen vornehmen.

■ Schwer heilbare Hornhautentzündung durch Akanthamöben schonend behandeln

Infektionen der Hornhaut sind weltweit eine wesentliche Ursache für eine Minderung der Sehschärfe. Ursächlich dafür ist meist eine durch Keime wie Bakterien, Pilze, Hefen, Viren oder Akanthamöben ausgelöste Hornhautentzündung. Augenärzte fürchten dabei vor allem Akanthamöben, da diese Form der Erkrankung kaum auf verfügbare Medikamente anspricht. Derzeitige Therapien mit Desinfektionsmitteln in Kombination mit Antibiotika haben starke Nebenwirkungen und schädigen die Hornhaut. Weiche Kontaktlinsen, die nicht ordnungsgemäß gereinigt wurden, gelten zu 88 Prozent als Hauptübertragungsmedium der Erreger. Forscher des Fraunhofer-Instituts für Angewandte Polymerforschung IAP erforschen daher gemeinsam mit der Augenklinik der Universität Heidelberg neuartige, schonende Therapiekonzepte, die auf den Einsatz von Antibiotika verzichten.

Als vielversprechende Alternative könnten sich plasmabehandelte antimikrobielle Kontaktlinsen erweisen. Plasma ist für seine keim-reduzierende Wirkung bekannt. Um den gewünschten keimabtötenden Effekt zu erzielen, stellten die Forscher plasmaaktiviertes Wasser (PAW) her, in dem die Kontaktlinsen gequollen wurden. Als Material für die Kontaktlinsen verwendeten sie ein weiches Biomaterial auf Hydrogelbasis, auf das das Fraunhofer IAP ein Patent hat und das in Form einer Kontaktlinse gefertigt wurde. Es speichert das PAW, reagiert aber nicht mit ihm. Das antibakterielle Potenzial der plasmabehandelten Linsen bestätigte sich in allen In-vitro-Experimenten – die PAW-Hydrogele wiesen starke antimikrobielle Effekte auf. In den anstehenden klinischen Studien prüft das Forscherteam in Zusammenarbeit mit Augenärzten, wie lange man die PAW-behandelten Linsen einsetzen kann, um ohne die Hornhaut zu schädigen einen vollen Therapieerfolg zu erzielen.



Mit dem Einsatz digitaler Methoden in der Prüftechnik begleitet das Fraunhofer LBF ganzheitlich innovative Produktentwicklungen in zuverlässigkeitsorientierten Branchen.

© Fraunhofer LBF

MASCHINEN- UND ANLAGENBAU

■ Modellbildung und Parametrierung eines servohydraulischen Prüfstands

Den Prüfstand in den Rechner holen – das ist ein wichtiger Schritt auf dem Weg zum digitalisierten Produktentwicklungsprozess. Die Digitalisierung erfordert nicht nur die Erstellung digitaler Zwillinge der Produkte, sondern auch der Prüfumgebungen, mit denen ihre Funktionalität und Betriebsfestigkeit abgesichert werden. Nur so lassen sich das Zusammenspiel von Prüfling und Prüfsystem, die Machbarkeitsgrenzen in der Prüfung und die erzielbaren Genauigkeiten im Vergleich zum realen Einsatz bereits vor dem eigentlichen Versuch virtuell erfassen.

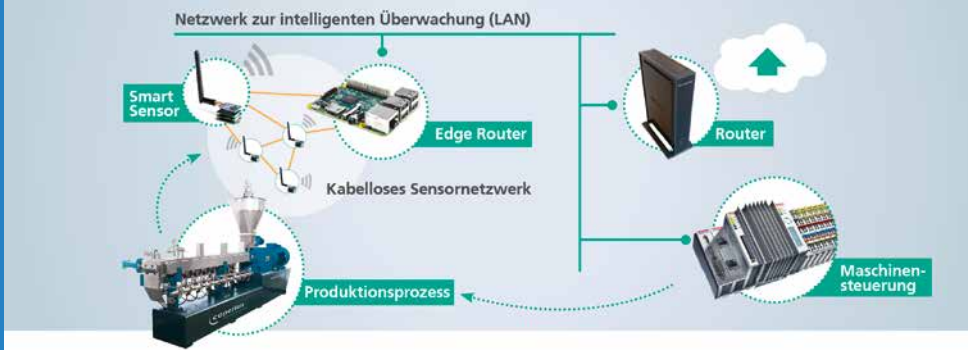
Von besonderer Bedeutung ist der digitale Zwilling des Prüfstands bei aktiven Systemen in Fahrzeugen, wie sie u. a. im Fahrwerksbereich zunehmend zum Einsatz kommen. So ist beispielsweise bei der Entwicklung eines mechatronischen Wankstabilisators iARC (intelligent Active Roll Control) die experimentelle Erprobung ein entscheidendes Element im Produktentwicklungsprozess. Dabei treten deutliche Unterschiede in den Prüfanforderungen für unterschiedliche Einsatzfälle auf. Um Prüfungen zeit- und kosteneffizienter umsetzen zu können, wird im Fraunhofer LBF ein numerisches Simulationsmodell des Prüfstands aufgebaut. Zusammen mit einem virtuellen Prüflingsmodell kann so bereits vor Beginn der eigentlichen Prüfungen geklärt werden, in wie weit die Prüfanforderungen auf dem Prüfstand umgesetzt werden können und welche Optimierungspotentiale bestehen. Dadurch lassen sich Prüfstandsbelegungszeiten signifikant verkürzen und experimentelle Iterationen minimieren.

Das Prüfstandsmodell umfasst die nichtlineare Systemdynamik der Hydraulik, ihrer Regelung sowie der Kinematik. Sie wird an Hand eines speziell für die jeweilige Anforderung zugeschnittenen Prüfprogramms identifiziert und parametrisiert. Dabei kann im Hinblick auf die Interpretierbarkeit des Modells ein durchgängig physikalisch motivierter White-Box-Modellierungsansatz gewählt werden. Das erstellte Modell ist in der Lage, auch die entstehenden Regelabweichungen sowie die Leistungsgrenzen des Prüfsystems abzubilden. Die sehr hohe Ergebnisqualität ermöglicht vielfältige Anwendungen des Modells, z. B. die Sensitivitätsanalyse und die Machbarkeitsanalyse.

In der Sensitivitätsanalyse wird der Einfluss verschiedener Modellparameter auf das Simulationsergebnis untersucht. Dies liefert einerseits Informationen hinsichtlich der erforderlichen Modellierungstiefe vergleichbarer Prüfstände und zeigt zum anderen Möglichkeiten zur Verringerung der Regelabweichung auf.

In der Machbarkeitsanalyse wird untersucht, in wie weit eine Prüfanforderung auf dem Prüfstand umsetzbar ist und welche Grenzen der Systemdynamik hierbei limitierend wirken.

Durch die standardmäßige Einbindung einer virtuellen Prüfung mit Hilfe des digitalen Zwillings im Vorfeld der experimentellen Prüfung lassen sich wesentliche Effizienzsteigerungen erzielen, da Hindernisse frühzeitig erkannt und ihre Ursachen identifiziert werden können. Diese Vorgehensweise ist insbesondere für Automobilzulieferer von hoher Relevanz, da eine Erprobung im Fahrzeug in der Regel erst zu einem sehr späten Zeitpunkt in der Entwicklung möglich ist und der Prüfstand damit das wesentliche Werkzeug zur Absicherung darstellt.



Das im Fraunhofer LBF am Beispiel eines Doppelschneckenextruders entwickelte Überwachungs- und Optimierungssystem besteht aus intelligenten Sensoren mit integrierter Sensordatenvorverarbeitung sowie einem multifunktionalen Gateway zur Datenaufbereitung und Prozessrückwirkung.

© Fraunhofer LBF



Spritzsuspension aus feinen Keramik- oder Hartmetallpartikeln für dünne Hochleistungsschichten mit extrem geringer Rauheit.

■ Intelligente Sensoren überwachen und optimieren Industrieprozesse 4.0

Cyber-physikalische Systeme (CMS) sind die stillen Helden von „Industrie 4.0“. Prognosen besagen, dass sie die weltweite Produktion bestimmen werden. Dabei sorgen intelligente Sensoren zur Überwachung und Regelung von Produktionsprozessen dafür, dass vernetzte, autonome Arbeitsprozesse zuverlässig ablaufen.

Das Fraunhofer LBF bietet Unternehmen mit seinem neu entwickelten Überwachungssystem eine universelle Grundlage, beispielsweise bei der Zustandsüberwachung oder Wartungsplanung. Gemeinsam mit Herstellern und Anwendern von Maschinen und Anlagen können die Fraunhofer-Experten das modulare, anpassungsfähige System flexibel auf unterschiedliche Prozesse und Maschinen in Unternehmen übertragen. Dabei erleichtert die Vernetzung der Daten über einen Datenpool, etwa in einem Cloud Dienst, die Statusüberwachung für die jeweilige spezifische Anwendung über alle Maschinen und Operationen hinweg. Durch die Kombination vorhandener Daten aus der Maschinensteuerung mit ausgewählten, zusätzlich erfassten Sensordaten können kritische Betriebszustände oder Materialschwankungen erkannt und Fehlchargen oder Maschinenausfälle minimiert werden. Über standardisierte Schnittstellen soll eine einfache, nachträgliche Integration in bestehende Unternehmensnetzwerke ermöglicht werden (Retro-fitting).

Darüber hinaus setzten die Forscher eine Signalvorverarbeitung um, mit der sich Messdaten bereits im Sensorknoten reduzieren lassen. Nicht messbare Prozessdaten lassen sich in dem neuen System modellbasiert berechnen. Um kritische Systemzustände zu vermeiden und den Verschleiß zu reduzieren, sorgen Optimierungsalgorithmen für eine direkte zustandsbasierte Rückwirkung auf die Prozesssteuerung.

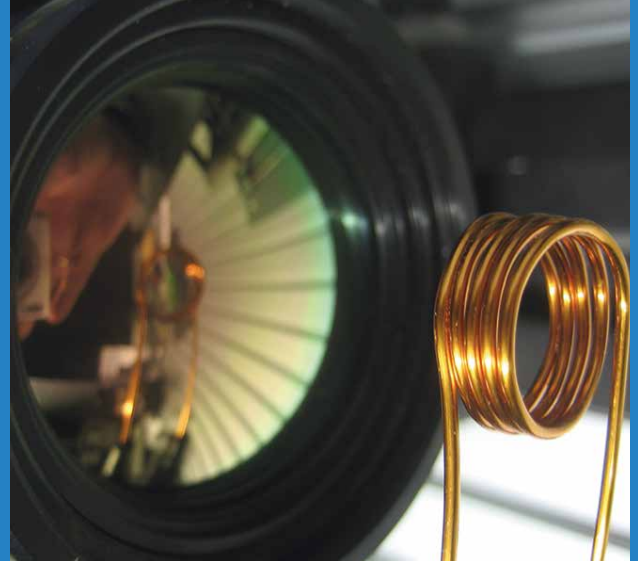
■ Suspensionsspritzen für robuste und funktionelle Oberflächenveredelungen

Keramische Beschichtungen können die Oberflächenbeständigkeit und -güte von Maschinenkomponenten hinsichtlich Verschleißschutz, Antihafteffekt oder Isolationsverhalten entscheidend verbessern. Insbesondere thermische Beschichtungsverfahren auf Basis von keramischen oder metallischen Pulvern kommen hier bislang zum Einsatz. Obwohl die verwendeten Pulverpartikel fein und die Schichten dünn sind, weisen diese Oberflächen eine hohe Rauheit auf. Um eine gezielte Oberflächengüte zu erreichen, müssen die beschichteten Bauteile daher oftmals aufwendig nachbearbeitet oder versiegelt werden. Um dies zu vermeiden, haben die Fraunhofer-Institute IKTS und IWS ein thermisches Beschichtungsverfahren weiterentwickelt: An Stelle des Pulvers wird eine Suspension verspritzt, die deutlich feinere Partikel als die üblichen Spritzpulver enthält. So lassen sich dünne ($< 100 \mu\text{m}$) und dichte Schichten mit sehr glatten Oberflächen herstellen und zusätzlich Rohstoffe einsparen.

Die Schichteigenschaften werden zum einen von den Prozessparametern beim thermischen Spritzen und zum anderen von den Suspensionseigenschaften bestimmt. Materialien mit homogenen Partikelgrößenverteilungen und hoher Reinheit sind besonders geeignet, um daraus Suspensionen herzustellen. Die Suspensionseigenschaften lassen sich unter Verwendung von elektroakustischer, rheologischer und Sedimentations-Messtechnik hinsichtlich Feststoffgehalt, Korngrößenverteilung und Viskosität für jede Anwendung individuell einstellen und optimieren. Neben keramischen Werkstoffen wie Chrom-, Aluminium- oder Zirkonoxid können erstmals auch Hartmetalle defektfrei thermisch gespritzt werden. Außerdem erlaubt die Technik gradierte Schichtsysteme, mit denen zum Beispiel thermische und mechanische Eigenschaften kombiniert werden können.



*Demonstrator für aktive
Thermographie an Bahnradern.
© Fraunhofer IZFP*



*Kupferspule
© Fraunhofer IZFP*

■ Winzigen Rissen auf der Spur – Aktive Thermographie mit induktiver Anregung

In vielen Industriebereichen müssen sicherheitsrelevante Bauteile zum Ausschluss von Oberflächenrisen bei der Fertigung einer Hundertprozent-Prüfung unterzogen werden. Dabei sind zukünftig vor allem Verfahren von Vorteil, die ohne eine spezielle Oberflächenbehandlung auskommen, die zuverlässig und objektiv arbeiten und eine vollautomatische Prüfung von Komponenten ermöglichen.

Induktiv angeregte Thermographie ermöglicht die Oberflächenrisenprüfung ohne Oberflächenbehandlung, ist schnell und lässt sich relativ einfach automatisieren. Es handelt sich um ein objektives Verfahren, das zuverlässige Prüfaussagen liefert und darüber hinaus die Bestimmung der Fehlergröße (Risstiefe) ermöglicht. Damit eignet sie sich sehr gut für vollautomatische Prüfanlagen zur Hundertprozent-Prüfung von Bauteilen in der industriellen Fertigungslinie.

Das Fraunhofer IZFP verfügt über eine umfassende technische Ausstattung für unterschiedliche Varianten aktiver Thermographie:

- Optische Impuls- und »Lock-In«-Anregung (periodische Anregung)
- Ultraschallanregung
- Induktive Anregung mittels elektromagnetischer Wechselfelder
- Berührungslose Infrarotmesstechnik mit Infrarotkamarasystemen für den nahen, mittleren und langwelligen Infrarotstrahlungsbereich mit Temperaturauflösungen bis ca. 15 mK und Bildfrequenzen bis 20 kHz (Zeitaufösungen bis 50 µs) bei Bildauflösungen bis 1024 × 768 Pixeln
- Roboter und Linearverstelleinheiten für eine schnelle, automatisierte Prüfung mit integrierten thermographischen Systemen
- Software zur Steuerung der Prüfsysteme, Datenverarbeitung, Messdatenauswertung sowie zur automatischen Fehlererkennung und Fehlerrekonstruktion
- Grundlegende, theoretische und experimentelle Untersuchungen zu den physikalischen Grundlagen und Anwendungsmöglichkeiten verschiedener aktiver thermischer Prüftechniken

Leistungsangebot

- Testmessungen und Machbarkeitsstudien für industrielle Applikationen
- Prüfungen auf Grundlage der Akkreditierung des Prüf- und Applikationszentrums
- Konzeption, Planung und Bau von mobilen Prüfsystemen
- Konzeption, Planung und Bau vollautomatischer Prüfanlagen für die Online-Prüfung von Bauteilen in der Produktionslinie, einschließlich robotergestützter Prüfsysteme

Vorteile

- Zerstörungsfreies, berührungslos arbeitendes, schnelles Prüfverfahren zur Oberflächenrisenprüfung
- Prüfung von Bauteilen mit komplexer Geometrie
- Möglichkeit zur Risstiefenbestimmung
- Nachweis verdeckter Fehlstellen möglich
- Objektive und zuverlässige Prüfung von Bauteilen in der industriellen Fertigung
- Relativ einfache Automatisierbarkeit ohne größeren Aufwand an Mechanik
- Eignung für vollautomatische Prüfanlagen zur Hundertprozent-Prüfung von Bauteilen in der industriellen Produktionslinie

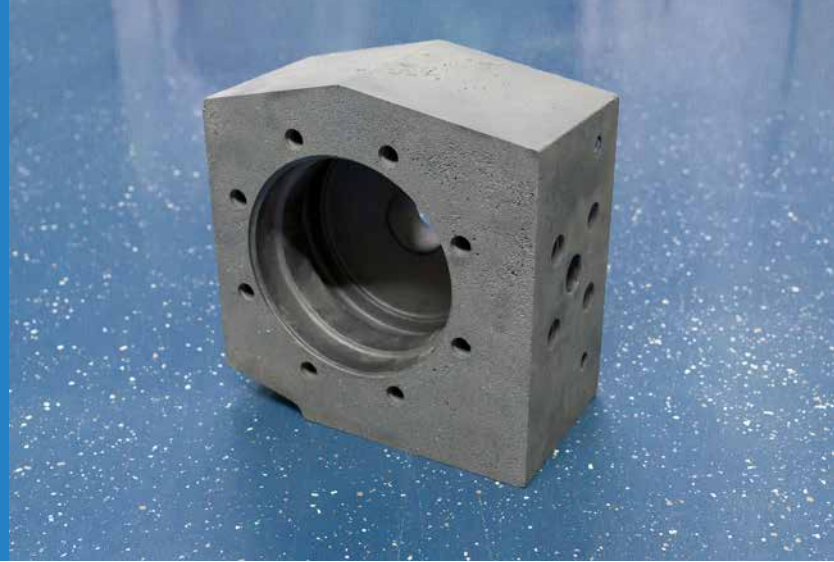
Anwendungen

- Risserkennung an Schmiedeteilen
- Risserkennung an Langprodukten aus Stahl im Prozess
- Oberflächenrisenprüfung von Eisenbahnschienen und -rädern
- Erkennung von Delaminationen in Verbunden metallischer Werkstoffe
- Ersatz der Magnetpulverprüfung
- Risserkennung in Solarzellen
- Rissprüfung von Turbinenbauteilen
- Erkennung von Faserbrüchen in CFK



*Modularer Hochtemperatur
Reaktor für die kontinuierliche
Synthese von Nanopartikeln.
© Fraunhofer IMM*

*Pumpengehäuse (SiCcast
Mineralguß GmbH) mit einer
Innenauskleidung aus superhar-
ter Diamantkeramik.
© Fraunhofer IKTS*



■ Modularer Hochtemperatur Reaktor für die kontinuierliche Synthese von Nanopartikeln

Das Fraunhofer IMM hat einen neuartigen, modularen Reaktor für die kontinuierliche Durchflusssynthese entwickelt, der für die Synthese von Nanopartikeln unter erhöhter Temperatur ausgelegt ist. Der Reaktor hält bei Flüssigphasenreaktionen Temperaturen von bis zu 400 °C stand, gängige hot injection Synthese Protokolle für die Synthese von Nanomaterialien können vom Batch in einen kontinuierlichen Prozess überführt werden. Das Kernstück des Reaktors ist ein vom IMM entwickelter mikrofluidischer Mischer sowie eine temperierbare Verweilerschleife. Integrierte optische Durchflussszellen erlauben die optische Detektion an verschiedenen Positionen und bei hoher Temperatur vor Ort und legen somit die Basis für die Online-Prozessüberwachung.

Das modulare Design des Reaktors erlaubt es, ihn an spezifische Bedürfnisse anzupassen, da sowohl das Design und die Konstruktion im Fraunhofer IMM erfolgen. Dank seiner kompakten Größe nimmt das Reaktormodul wenig Platz im Labor oder im Abzug ein und kann in vorhandene Setups integriert werden. Sein Design ermöglicht den Transfer von Batch zu kontinuierlichen Prozessen, vor allem Synthesewege für Nanopartikel, welche erhöhte Temperaturen und rasche Vermischung erfordern (»hot injection«), Bedingungen die üblicherweise bei der Synthese monodisperser Nanopartikel in hoher Qualität vorliegen. Beispiele sind organo-metallische Synthesen wie sie für CdSe Quantum Dots, Pt und andere metallische Nanopartikel oder Oxid Materialien genutzt wird.

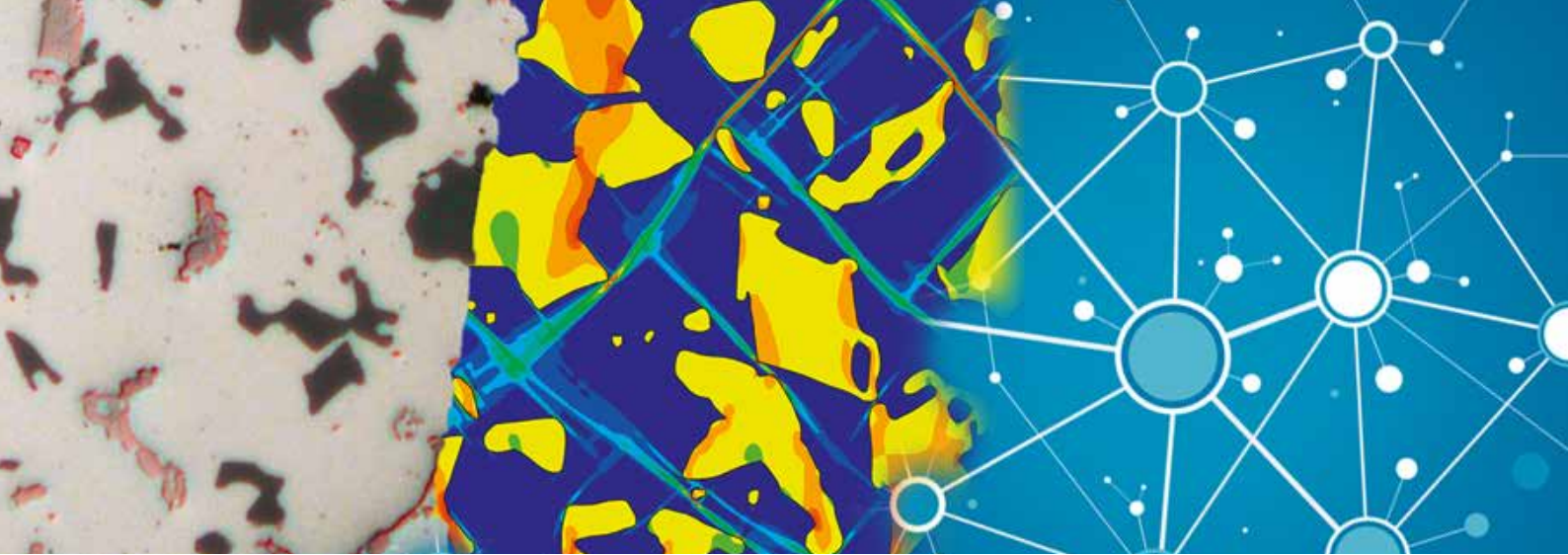
Mit unserem Know-how in der kontinuierlichen Durchfluss Chemie, der Mikroreaktionstechnik und der Anlagentechnik, stellt dieser Reaktor das Herzstück eines kompletten, maßgeschneiderten Systems im Labormaßstab für die Synthese von Nanomaterialien dar. Unter Berücksichtigung der Kundenbedürfnisse und -spezifikationen bieten wir maßgeschneiderte Dienstleistungen bezüglich Design und Konstruktion von Prototypen oder Machbarkeitsstudien.

■ Superharte Diamantkeramiken für den Tiefseebau und die Offshoreförderung

Im Tiefseebau oder bei der Offshoreförderung von Öl und Gas sind Lebensdauern und Wartungsfreiheit der eingesetzten Maschinen von 10 bis 30 Jahren gefordert. Für verschleißbelastete Pumpenkomponenten, Rohrsegmente oder Düsen beispielsweise ist das mit herkömmlichen Werkstoffen kaum erreichbar. Daher entwickelt das Fraunhofer IKTS zusammen mit Partnern der Fraunhofer-Allianz AdvanCer für dieses Einsatzfeld superharte, verschleiß- und korrosionsfeste Diamantkeramiken.

Diese neuen Diamantkeramiken können im Gegensatz zu kommerziellen Diamantwerkstoffen kostengünstig und in komplexen Geometrien durch konventionelle keramische Technologien hergestellt werden – zum einen als kompakte Bauteile und zum anderen als 300 bis 500 µm dicke Schichten in hochbeanspruchten Bauteilbereichen. Dabei wird die Diamant-Preform mit flüssigem Silicium infiltriert. Während der Infiltration bildet sich ein dreidimensionales Gerüst aus, in das der Diamant chemisch eingebunden wird. Durch diese SiC-Bindung lassen sich nicht nur Festigkeiten von 450 bis 500 MPa, sondern auch eine sehr hohe Korrosionsbeständigkeit erreichen. Darüber hinaus belegen tribologische Untersuchungen, dass die Verschleißfestigkeit der entwickelten Diamantkeramiken um den Faktor 10 höher als die von kommerziellen Borcarbid-Werkstoffen ist und sie ein Verschleißverhalten ähnlich dem von extrem hartem polykristallinen Diamant (PKD) aufweisen.

Die Gefüge der Werkstoffe können in einem weiten Bereich gezielt eingestellt werden, wodurch sich Bauteile mit maßgeschneiderten Eigenschaftsprofilen herstellen lassen. Die entwickelten Diamantkeramiken erschließen damit neue Möglichkeiten, verschleiß- und korrosionsfeste Komponenten auch für Anwendungen über den Tiefsee-Bereich hinaus kostengünstig herzustellen.



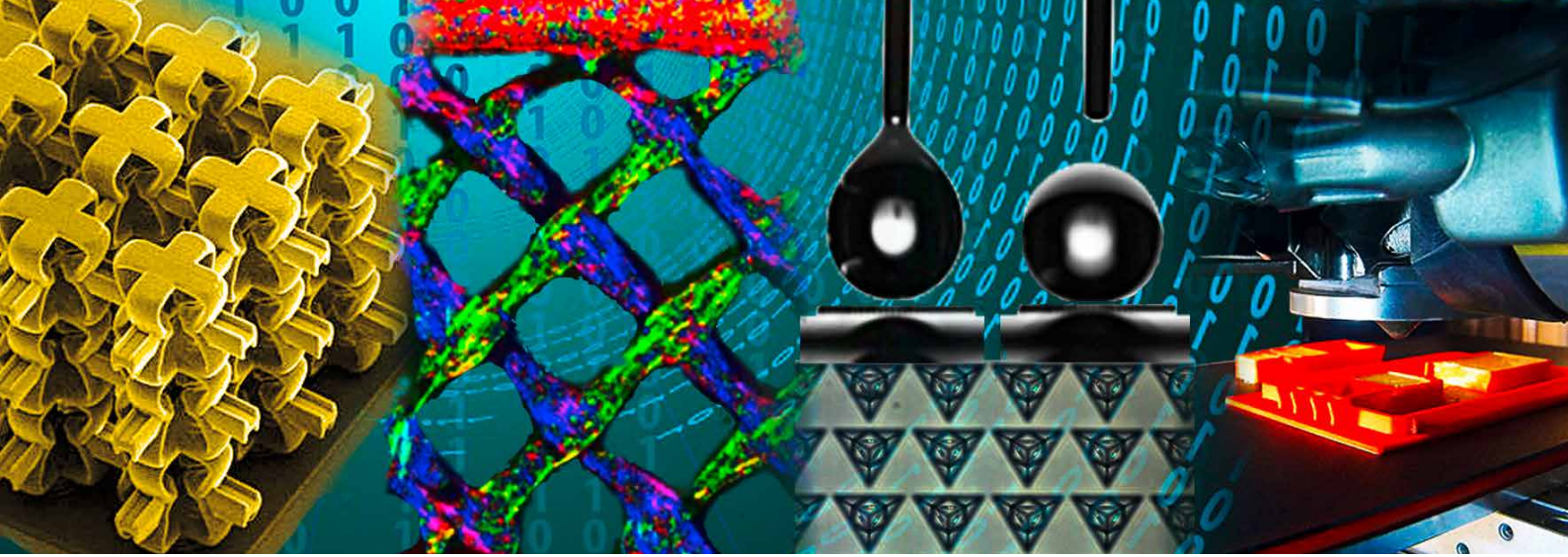
■ Digitalisierung von Materialien für bessere Produkte und Verfahren

Die Verzahnung industrieller Produktion mit moderner Informationstechnik im Rahmen von Industrie 4.0 zielt darauf ab, Wertschöpfungsketten und Bauteilfunktionalitäten zu optimieren. Dazu müssen relevante örtlich und zeitlich veränderliche Werkstoffeigenschaften innerhalb einzelner Prozessschritte berücksichtigt werden. Die Herausforderung: Diese Daten sind sehr heterogen und müssen über inline Sensorik oder indirekt aus vielen Materialuntersuchungen oder Prozesssimulationen abgeleitet werden.

Das Projekt MaterialDigital des Landes Baden-Württemberg unter der Leitung des Fraunhofer IWM soll erreichen, dass zu verarbeitende Materialien Bestandteil der digital durchgängigen Wertschöpfungskette werden. Zur digitalen Abbildung der Prozess- und Materialhistorie wird ein Materialdatenraum aufgebaut. Das Fraunhofer IWM entwickelt neben der reinen Verwaltung der Daten im Wissensgraphen

auch Schnittstellen für die Datenein- und -ausgabe sowie möglichst generische Suchabfragen. Zudem wird eine möglichst generische Ontologie für Aluminiumgusswerkstoffe entworfen. Sensor-Daten aus einem durch beteiligte Institute sensorisierten Guss- und Wärmebehandlungsprozess einer AlSi10Mg Legierung speist das Fraunhofer IWM in den neuen Materialdatenraum ein.

Die Prüfkörperentwicklung begleitet das Fraunhofer IWM mit strukturmechanischen Berechnungen und werkstoffmechanischen Untersuchungen. Zu ausgewählten Zeitpunkten der Guss- und Wärmebehandlungsprozesskette erzeugt das Fraunhofer IWM aus dem Materialdatenraum heraus digitale Materialzwillinge der Prüfkörper: Diese beschreiben insbesondere den Materialzustand an zuvor identifizierten kritischen Stellen. Zudem wird eine inline-fähige Prozesskontrolle entwickelt, mit der es gelingt, Informationen über das lokale Gussgefüge (und die enthaltenen Guss-Defekte) zu erhalten.



■ Programmierbare Materialien für Funktionsintegrierte Systeme der Zukunft

Die Entwicklung programmierbarer Materialien wird unsere Nutzung von Werkstoffen auf den Kopf stellen: Ein einzelnes Material kann ein ganzes System aus Sensoren, Reglern und Aktuatoren ersetzen, indem es deren Funktionen integriert. Das Ziel des Fraunhofer-Forschungsclusters »Programmierbare Materialien« unter der Leitung des Fraunhofer IWM ist, mithilfe solcher Materialien die Komplexität bisheriger Systeme zu senken und den Einsatz von Ressourcen zu reduzieren. Der Fokus liegt auf programmierbaren Transporteigenschaften einerseits sowie mechanischen Materialeigenschaften andererseits. Ein Beispiel eines solchen form- und funktionsdynamischen Materials ist eine Kunststoffbeschichtung für die Innenpolsterung einer Beinprothese: Das strukturierte Polymer ist zunächst weich, um den Beinstumpf zu schützen. Hebt die Person jedoch etwas Schweres an, wirkt auf die Beschichtung eine höhere Belastung ein und sie verhärtet

etwas, damit der empfindliche Stumpf nicht gegen das harte Prothesenmaterial gepresst wird.

Solcherart gewünschte Funktionalitäten werden erreicht, indem die innere Materialstruktur auf verschiedenen Größenskalen auf die gewünschten Funktionen hin entworfen wird. Dies wird nur durch tiefgreifendes fachliches Verständnis über die Mechanismen in programmierbaren Materialien und deren Herstellbarkeit möglich. Die verschiedenen Programmierungen werden im Forschungscluster grundlegend entwickelt, charakterisiert und in Form von Demonstratoren aufgezeigt.

Um solch eine Funktionalisierung entwerfen, implementieren und produzieren zu können, werden die Kompetenzen der Fraunhofer Institute IWM, IAP, IWU, ICT und IBP zusammengeführt und Materialien und Prozesse von der molekularen bis zur makroskopischen Skala kontrolliert.



Die Flex^{PLAS}®-Trennfolie lässt sich leicht vom ausgehärteten kontaminationsfreien Bauteil abziehen. © Fraunhofer IFAM

Mit der neuen Niederdruckplasmaanlage des Fraunhofer IFAM lassen sich bis zu 2,4 Meter breite Polymerfolien beschichten. © Fraunhofer IFAM



■ Kontaminationsfreie FVK-Bauteilfertigung mit der Flex^{PLAS}®-Trennfolie

Um bei der Herstellung von Großstrukturen aus Faser-verbundkunststoffen (FVK) – wie sie beispielsweise beim Bau von Flugzeugen oder Windenergieanlagen verwendet werden – Prozessschritte wie das Eintrennen der Werkzeugformen oder die Entfernung des Trennmittels vom ausgehärteten Bauteil einzusparen, ist eine trennmittelfrei Fertigung notwendig. Die Experten aus den Bereichen Plasmatechnik und Oberflächen sowie Automatisierung und Produktionstechnik am Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM haben hierzu die mit Plasmatechnologie funktionalisierte tiefziehfähige Trennfolie Flex^{PLAS}® entwickelt.

Das Besondere an der Trennfolie ist, dass sie mit einer fest haftenden, weniger als 0,3 Mikrometer dünnen, im Fraunhofer IFAM entwickelten plasmapolymerten Trennschicht ausgestattet ist. So ermöglicht sie ein einfaches Entformen und hinterlässt dabei keinerlei Rückstände auf der Bauteiloberfläche. Die Flex^{PLAS}®-Trennfolie kann mit wenig Kraftaufwand gedehnt werden und hält sogar extremen Dehnungen bis zu 300 Prozent und Temperaturen bis 180 °C ohne Funktionsbeeinträchtigung stand – die ideale Voraussetzung dafür, dass sie auch auf gekrümmte oder strukturierte Formen aufgebracht werden kann, ohne dass sich Falten bilden. Zur Applikation der Trennfolie wird sie zuerst über ein Butylkautschukband oder eine wiederverwendbare und automatisierbare Dichtung, wie sie gerade am Fraunhofer IFAM entwickelt wird, fixiert und abgedichtet. Anschließend wird ein Vakuum zwischen der Trennfolie und dem Formwerkzeug angelegt, sodass sich die Flex^{PLAS}®-Trennfolie an komplexe Oberflächenkonturen wie eine zweite Haut anschmiegt. Dadurch lassen sich insbesondere auch XXL-Bauteile aus FVK problemlos trennmittelfrei fertigen.

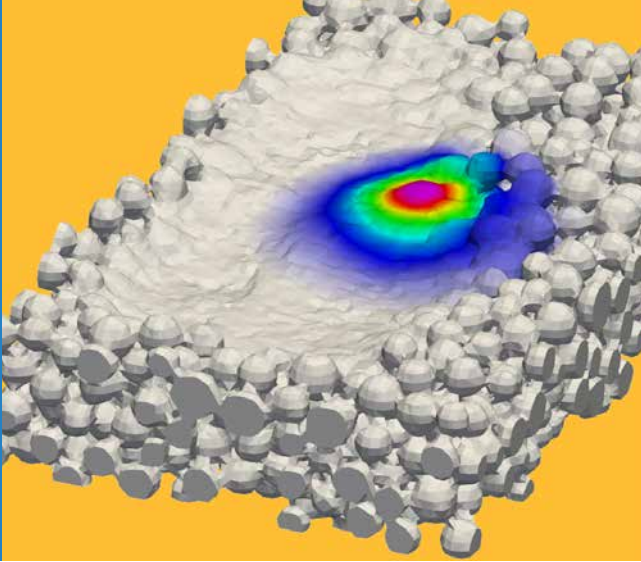
Die innovative Fertigung mit der Flex^{PLAS}®-Trennfolie lässt sich neben der Prepreg-Technologie auch für weitere Herstellungsverfahren wie das (Vakuum-) Infusionsverfahren, das Handlege-Verfahren oder das Resin Transfer Molding (RTM) einsetzen. Dabei sind die Trenneigenschaften der flexiblen Trennfolie nicht nur auf Carbonfaser- oder Glasfaser-Matrixharze beschränkt.

Zudem ermöglicht die neue Technik ein Inmold-Coating von Faserverbundbauteilen, wobei das Bauteil durch das Einbringen eines Gelcoats auf die Folie integriert lackiert wird. Hierbei ist die Mattigkeit der lackierten Oberfläche über die Rauigkeit der verwendeten Flex^{PLAS}®-Trennfolie einstellbar. Das Risiko für Lackierfehler wird dadurch signifikant reduziert.

Darüber hinaus kann die Faserverbundstruktur lackiert werden, ohne dass Trennmittelreste zuvor aufwendig entfernt werden müssen. Verbleibt die Folie bis zum Prozessende oder bis zur Auslieferung an den Endkunden auf dem Bauteil, dient sie zusätzlich als Schutzfolie.

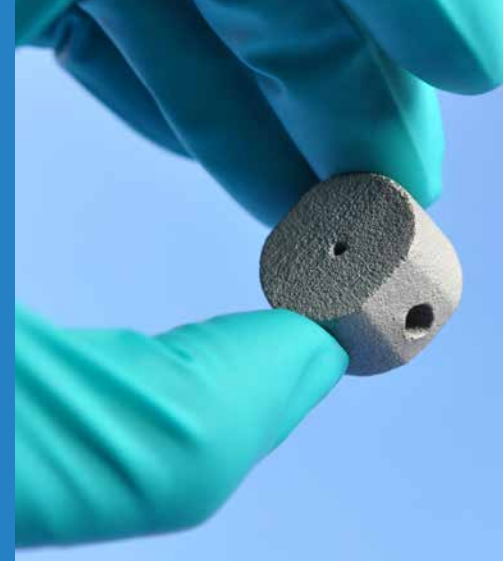
Neben dem Ersetzen des Eintrennens der Werkzeugo-berflächen lässt sich die Produktivität durch die Verwendung der Flex^{PLAS}®-Trennfolie an verschiedenen weiteren Teilschritten in der Prozesskette erhöhen. Insbesondere entfallen die Zeiten für die Grundreinigung der Formen zur Entfernung von Trennmittelresten, wodurch die Werkzeugstandzeit erheblich verlängert und deren Verfügbarkeit deutlich erhöht wird.

Aufgrund des großen Forschungspotentials und der positiven Resonanz aus der Industrie hat das Fraunhofer IFAM in den Bau einer neuartigen Niederdruckplasmaanlage investiert, mit der bis zu 2,4 Meter breite Polymerfolien in einem Rolle-zu-Rolle-Verfahren noch wirtschaftlicher mit der plasmapolymerten Trennschicht ausgestattet werden können.



Simulation des Schmelzens und Erstarrens einer Pulverschicht.

© Fraunhofer IWM



3D-pulvergedruckter und gesinterter Hartmetallziehstein mit innenliegenden Kühlkanälen.

© Fraunhofer IKTS

■ Simulation der Schmelz- und Erstarrungsdynamik bei additiven Fertigungsverfahren

Die Zuverlässigkeit additiv gefertigter Bauteile reicht bisher noch nicht für ihre Verwendung in strukturellen Leichtbauelementen aus, sie könnten jedoch zu weiterer Gewichtsreduktion und Steigerung der Funktionalität sorgen. Hochkomplexe Strukturen mit am Computer maßgeschneiderten mechanischen Eigenschaften könnten im Pulverbett- und Laserschmelzverfahren hergestellt werden. Zur anwendungsorientierten Auslegung solcher Bauteile existieren derzeit jedoch keine etablierten Simulationstools.

Um solche Tools bereitzustellen, entwickelt und verfeinert das Fraunhofer IWM seine partikelbasierte Software SimPARTIX®. Simuliert werden die beim Aufrakeln im Pulverbettverfahren entstehenden Packungsdichten, die entscheidend für die Dynamik des darauf folgenden Schmelzvorgangs sind. Dabei wird das Pulver mit Kugeln der im realen Pulver gemessenen Größe beschrieben, sowie deren Wechselwirkungen. Pulverbett-Inhomogenitäten können so gefunden und vermieden werden. Darüber hinaus liefert die Simulation der Schmelz- und Wiedererstarrungsprozesse beim eigentlichen Laserschmelzverfahren Vorhersagen zu erwartender Materialeigenschaften wie der Porosität und der Oberflächenrauheit, die letztlich Indikatoren für die Festigkeit des resultierenden Bauteils liefern. Berechnet werden lokaler Laser-Energieeintrag, Wärmeleitung im Material sowie Strömung im Schmelzbad. Auch entstehende Oberflächenrauheiten können quantifiziert werden.

Die Ergebnisse helfen, die für die gewünschte Bauteilfestigkeit benötigten Partikeldurchmesser zu finden sowie die Prozessparameter zielführend einzustellen. Zudem können Pulver auf ihre Eignung für Laserschmelzverfahren bewertet werden. Die Simulation unterstützt auch die Entwicklung neuer Materialien, beispielsweise Legierungen, da die Anzahl benötigter experimenteller Entwicklungszyklen verringert werden kann.

■ Komplexe Hartmetallwerkzeuge aus dem 3D-Drucker

Hartmetall ist ein leistungsfähiger Werkstoff, der sich vor allem durch seine hohe Härte und Verschleißfestigkeit bei gleichzeitig guter Zähigkeit auszeichnet. Der Komplexität der Hartmetallbauteile sind dabei aktuell durch die konventionellen Formgebungsprozesse Grenzen gesetzt. Es können vergleichsweise nur einfache Geometrien realisiert werden. Moderne Werkzeuge erfordern jedoch häufig wesentlich komplexere Geometrien, wie helixförmige oder mäandrierende Kühlkanäle im Inneren des Bauteils, die aufwendig und kostenintensiv durch Zerspanen und Schleifen von Hartmetallrohlingen mit Diamantwerkzeugen oder mittels Erodieren hergestellt werden. Daher entwickeln die Forscher am Fraunhofer IKTS komplexe Hartmetallwerkzeuge mittels 3D-Druck-Verfahren, deren Qualität konventionell hergestellten Hochleistungswerkzeugen in nichts nachsteht.

Bei dem dabei verwendeten Binder-Jetting-Verfahren werden die Ausgangspulver bzw. -granulate über einen Druckkopf mit einem organischen Binder lokal benetzt und gebunden. Bei der Wärmebehandlung, die speziell auf die Zusammensetzung abgestimmt sein muss, wird in einem ersten Schritt der organische Binder ausgetrieben und danach das Bauteil mit hoher Temperatur und Druck verdichtet. Durch Optimierung der Prozesskette ist es hier gelungen, hundertprozentig dichte Bauteile zu erhalten, die ein perfektes Hartmetallgefüge und gute mechanische Eigenschaften aufweisen. Durch die gezielte Variation der Bindermatrix werden Biegebruchfestigkeit, Zähigkeit und Härte individuell eingestellt – je geringer der Binderanteil im Hartmetall, desto härter das Bauteil. Die am Fraunhofer IKTS gefertigten Prototypen haben einen Bindergehalt von 12 bzw. 17 Masseprozent und zeigen ein der konventionellen Herstellungsrouten vergleichbares Gefüge.



*Der weltweit genaueste
6-Achs-Industrieroboter auf
AGV bearbeitet das Seitenleit-
werk eines Airbus 320.*

© Fraunhofer IFAM

*Präsentation des mobilen
Bearbeitungsroboters auf
der Hannover Messe 2018 im
Kontext der Einbindung in eine
digitale Produktionsumgebung.
© Fraunhofer*



■ **Fahrende Roboter bearbeiten große Leichtbauteile kostengünstiger, flexibler und hochpräzise**

Für große Leichtbaustrukturen, z.B. im Flugzeugbau, werden meist auch große Bauteile aus Leichtbauwerkstoffen wie carbonfaserverstärkte Kunststoffe (CFK) oder Aluminiumlegierungen verwendet. Größe sorgt hier für eine besondere technische Herausforderung. Zum einen weisen die Bauteile herstellungs- und steifigkeitsbedingt relativ hohe, individuell unterschiedliche Abweichungen von der idealen Geometrie auf, zum anderen müssen bei der Bearbeitung und Montage sehr geringe Toleranzen eingehalten werden. Vielfach dürfen Abweichungen vom Designoptimum nur $\pm 0,2$ Millimeter betragen, manchmal sogar noch weniger. Diese Randbedingungen führten das Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM, Stade, im Projekt ProsiHP 2 zu einer außergewöhnlichen Lösung der Aufgabe, bestehende Portalanlagen zum Umrissfräsen großer CFK-Schalen durch eine effizientere und kostengünstigere Technologie auszutauschen, die zudem eine höhere Flexibilität mitbringt.

Das aussichtsreichste Konzept besteht darin, eine Portalanlage durch drei mobile Roboter flächen- und investitionsneutral zu ersetzen. Daraus ergibt sich ein Produktivitätsgewinn von ca. 40 Prozent. Ein zusätzlicher Vorteil der mobilen Roboter ist – auch nach Endeffektorwechsel – der Einsatz andernorts für weitere Aufgaben.

Somit ergab sich für die Projektpartner die Herausforderung, ein System aus autonomem Bodenfahrzeug (AGV) und Industrieroboter zu entwickeln, das Bauteile individuell vermisst und hinreichend genau bearbeitet. Da am Markt weder Roboter mit der benötigten Absolutgenauigkeit noch AGV mit der nötigen Steifigkeit verfügbar waren, entschlossen sie sich, das AGV neu zu konstruieren und einen marktgängigen Roboter motorisch, steuerungstechnisch und sensorisch nachzurüsten.

Das kosteneffizient aus Standardkomponenten aufgebaute AGV ist für austauschbare und herstellerunabhängig wählbare Schwerlastroboter mit bis zu 2,6 Tonnen Gewicht gebaut. Es setzt für die Prozessdurchführung mit drei Stützen statisch bestimmt auf dem Boden auf. Destabilisierende Effekte des Fahrwerks werden so vermieden. Drei ausfahrbare Räder geben dem AGV eine weitreichende Bewegungsfreiheit bis zur Drehung auf der Stelle.

Das Projektteam stattete die Kinematik des Roboters mit einer Siemens CNC-Steuerung aus, baute kompatible Motoren ein und ergänzte abtriebsseitige Winkelmesssysteme an jeder Achse zur Korrektur von Positionsabweichungen. Vor Prozessbeginn wird der Roboter mit einem Verfahren kalibriert, das auf dem Ersatz des kinematischen Robotermodells durch ein individuell parametrisiertes Modell basiert. Zudem ermitteln Kameras oder Lasertracker die aktuelle Pose des Roboters für eine Echtzeitkorrektur durch Abgleich mit den Soll-Daten. Durch die gemeinsame Entwicklung ist nicht nur der einzige mobile Bearbeitungsindustrieroboter entstanden, der die Anforderungen der Luftfahrt erfüllt, sondern der genaueste weltweit.

Das auf der Hannover Messe mit dem ROBOTICS AWARD 2018 ausgezeichnete System ist bisher für Bauteile mit Längen bis zu 30 Metern ausgelegt. Damit ist es für verschiedene Flugzeug-Primärstrukturen wie Flügelschalen oder Rumpfsegmente anwendbar. Zudem kann es mit geringen Modifikationen z.B. für Rotorblätter von Windkraftanlagen oder Großbauteile im Schiffsbau zum Einsatz kommen.

An dem durch das Land Niedersachsen geförderten Projekt waren beteiligt: Aicon 3D Systems GmbH, Airbus Operations GmbH, Artis GmbH, CTC GmbH Stade, Fraunhofer IFAM, IPMT der TU Hamburg, Ludwig Schleicher Anlagenbau GmbH, Mabi AG – Robotic, mz robolab GmbH, Siemens AG und Volkswagen AG.



Mit der flexiblen Polymerisations-Pilotanlage im Synthesetechnikum des Fraunhofer PAZ können Probenmengen bis in den Tonnenbereich synthetisiert werden.
© Fraunhofer IAP / Till Budde

Das Fraunhofer PAZ evaluiert den Einsatz von langfaserverstärkten thermoplastischen Bauteilen für den Leichtbau.
© Fraunhofer IMWS / Sven Doering



■ Tonnenmaßstab und Serienproduktion – Polymersynthese und -verarbeitung im Industriemaßstab

Das Scale-up ist ein entscheidender Schritt bei der Kommerzialisierung neuer Technologien und Produkte. Sowohl die Materialien als auch die Herstellungsverfahren müssen für den industriellen Einsatz geeignet sein. Hier bietet das Fraunhofer-Pilotanlagenzentrum für Polymersynthese und -verarbeitung PAZ in Schkopau die Anlagen, die Infrastruktur und die Erfahrung. Um den Anforderungen seiner Kunden aus der Kunststoff- und Automobilindustrie gerecht zu werden, skaliert das Fraunhofer PAZ eine Vielzahl von polymersynthetischen Verfahren und Verarbeitungsmethoden in einen branchenrelevanten Maßstab. Das Leistungsspektrum reicht von der Herstellung von Monomeren über die Polymersynthese im Pilotmaßstab bis hin zur Kunststoffverarbeitung für die Großserie. Auch Leichtbau- und biobasierte Materialien werden verarbeitet.

Das Fraunhofer PAZ ist eine gemeinsame Initiative des Fraunhofer-Instituts für Angewandte Polymerforschung IAP in Potsdam-Golm und des Fraunhofer-Instituts für Mikrostruktur von Materialien und Systemen IMWS in Halle. Das Pilotanlagenzentrum bündelt die Kompetenzen beider Institutionen – Polymersynthese (IAP) und Polymerverarbeitung (IMWS) – auf einzigartige Weise. Diese Zusammenarbeit, die technischen Möglichkeiten im Pilotmaßstab und die hohe Flexibilität der Anlagen bilden das Alleinstellungsmerkmal auf dem europäischen FuE-Markt.

Polymersynthese bis zum Tonnenmaßstab

Die Polymerisationspilotanlage ist als flexible Multiprodukt-Pilotanlage konzipiert. Auf verschiedenen Syntheselinien kann eine breite Palette von Polymerisationsverfahren von industrieller Bedeutung abgebildet werden, beispielsweise (anionische) Lösungspolymerisation, Emulsionspolymerisation, Suspensionspolymerisation sowie Polykondensationen oder katalytische Polymerisationen. Die Volumina der Hauptreaktoren reichen von 50 bis 1000 Liter. Sowohl

diskontinuierlicher als auch kontinuierlicher Betrieb ist möglich. Die Reaktionsdrücke reichen von einem Vakuum von unter 1 mbar bis zu 100 bar und die Temperaturen von der Raumtemperatur bis 300 °C.

Durch die flexible Kombination von Geräten aus verschiedenen Linien können neue, kundenspezifische Prozesse implementiert werden. Die Projektziele umfassen die Skalierung vom Labormaßstab bis zum Pilotmaßstab sowie die Technologieentwicklung und Vorbereitung von Probenmaterial, z. B. für Produktentwicklung und Anwendungstests. Ein Tätigkeitsfeld ist die Erweiterung und Prozessentwicklung im Bereich synthetischer Kautschuk.

Polymerverarbeitung bis zur Serienproduktion

Der Bereich der Polymerverarbeitung widmet sich Fragestellungen in den Bereichen des thermoplastbasierten Faserverbund-Leichtbaus sowie innovativer Kautschuk-Komposite für den Einsatz in Großserien.

Das Leistungsspektrum reicht von der kundenspezifischen Materialentwicklung über die Entwicklung faserverstärkter Halbzeuge bis zur Bauteil- und Technologieentwicklung für thermoplastbasierte Leichtbaustrukturen. Besonderes Augenmerk liegt auf dem Zusammenhang zwischen der Verarbeitungs-/Struktur-Beziehung sowie der Struktur-/Eigenschaftsbeziehung. Das Pilotanlagenzentrum bietet seinen Kunden Kapazitäten zur Herstellung von Materialmustern bis in den Tonnen-Maßstab, technische Möglichkeiten zur schnellen Abmusterung von Werkzeugen, Produktionsmöglichkeiten im Pilotmaßstab und die komplexe Bewertung von Bauteilen und Werkstoffen.

Ein weiterer Forschungsschwerpunkt ist die Mikrostrukturaufklärung mittels zerstörungsfreier Prüftechniken und Online-Prüfmethode. So können beispielsweise anhand der Vorhersage von Kristallisationsprozessen und der gezielten Steuerung der Kristallisationszustände die Eigenschaften thermoplastischer Bauteile optimiert werden.



Brücke als Beispiel eines
Infrastrukturbauwerkes.
© Fraunhofer IZFP

BAUEN UND WOHNEN

■ Kognitive Sensorplattform – dauerhafte Zustandsüberwachung per Knopfdruck

Alternde Infrastrukturen, insbesondere im Verkehrswesen, stellen große Herausforderungen für den technologischen Fortschritt und die stetig steigende Mobilität dar. So finden Sanierungsarbeiten an Brücken häufig erst gegen Ende ihrer projektierten Lebenszeit statt, gelegentlich sogar erst dann, wenn eine Brücke bereits einsturzgefährdet ist, was im schlimmsten Fall zum Abriss führt. Forscher des Fraunhofer IZFP in Saarbrücken haben zur Sicherstellung rechtzeitiger Prüfung und Sanierung eine modulare Monitoring-Plattform entwickelt, die schnelle und kostengünstige Abhilfe anbietet.

Die technische Sicherheit von Verkehrsbauwerken ist nur durch zuverlässige Zustandsüberwachung und -bewertung zu gewährleisten. Unfälle, die auf strukturelle Schwächen im Bauwerk oder zu späte Zustandsbewertung zurückgehen, können durch die dauerhafte Erfassung des Bauwerkszustands, die eine rechtzeitige Zustandsbewertung ermöglicht, vermieden werden. Manuelle Prüfungen sind hierfür zu aufwändig und kommen häufig zu spät. Neben Brücken kann auch die Sicherheit von Seilbahnen, die Anforderungen in der Kraftwerkstechnik und chemischen Industrie sowie Hochmasten und Ampelanlagen in der Innenstadt als Beleg angeführt werden. In allen diesen Bereichen sind Vorfälle bekannt geworden, die durch nicht oder zu spät entdeckte Materialalterung und Korrosion bedingt waren.

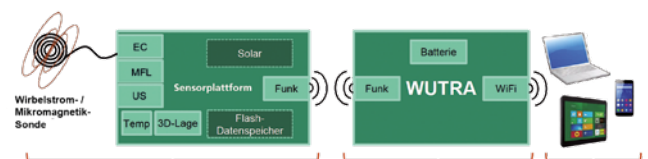
Modulare, energieautarke und kostengünstige Infrastruktur-Messsysteme

Am Fraunhofer IZFP wurde mit einer kognitiven Sensorplatt-

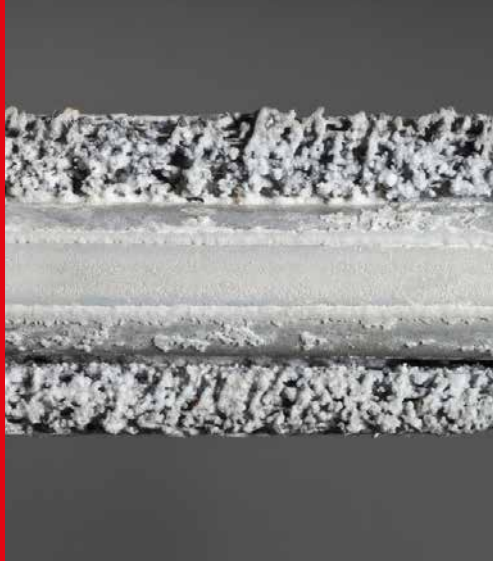
form ein System entwickelt, das die Forderung nach einer permanenten, modularen Infrastrukturüberwachung leicht und kostengünstig erfüllen kann. Teure Serverstrukturen und die Notwendigkeit zur regelmäßigen Wartung störanfälliger Systeme können damit schon bald der Vergangenheit angehören. Die Möglichkeit zum Anschluss von an die Aufgabenstellung angepassten Sensoren ermöglicht maßgeschneiderte Prüflösungen und das permanente Monitoring des Bauwerkszustandes.

Miniaturisierte Sensoren suchen dauerhaft nach Risiken und Veränderungen in der Bausubstanz

Die Sensorplattform besteht aus winzigen, dauerhaft am Bauwerk angebrachten Sensoren, die kleinste Veränderungen in der Bausubstanz erkennen; sie enthalten einen Langzeit-Datenspeicher, der über ein Funk-Interface jederzeit telemetrisch ausgelesen werden kann und die Voraussetzungen einer umfangreichen Zustandsbewertung des Bauwerkes bietet. Die Sensorplattform ist für ein Jahrzehnt Betrieb ohne Wartung oder Austausch ausgelegt; ihre Energieversorgung beruht daher auf einer erneuerbaren, ständig verfügbaren Energiequelle. Die vorhandenen zerstörungsfreien Prüfverfahren werden vom Fraunhofer IZFP in Eigenentwicklung für dieses innovative Monitoring-System adaptiert und serientauglich gemacht.



Prinzipskizze Kognitive Sensorplattform. © Fraunhofer IZFP



Bei geringem Betrachtungsabstand werden die Solarzellen unter den farbigen Deckgläsern sichtbar. © Fraunhofer ISE

Detailaufnahme des Adsorptionswärmeübertragers mit Zeolith. ©Fraunhofer ISE

■ Farbige Solarmodule nach Vorbild des Morpho-Schmetterlings

In Null- oder Plus-Energie-Gebäuden werden Module zunehmend nicht nur auf dem Dach, sondern auch in die Fassade integriert. Daher ist aus Sicht der Architekten und Bauherren ein optisch ansprechendes Design der Module ebenso wichtig wie das Preis-Leistungs-Verhältnis. Die Nachfrage nach farbigen Modulen mit hoher Sättigung und Homogenität ist groß. Bisherige Ansätze zur Einfärbung von Solarzellen oder Deckgläsern sind in der Farbwahl eingeschränkt und führen zu vergleichsweise hohen Leistungseinbußen. Um diese zu minimieren, hat das Fraunhofer ISE – inspiriert von der Natur – ein neues Verfahren entwickelt, das farbige Module bei minimalen Transmissionsverlusten ermöglicht.

Ausgangspunkt ist ein Phänomen, das man am Morpho-Schmetterling beobachten kann: seine auffällig leuchtend blaue Flügelfarbe wird nicht wie bei anderen Schmetterlingen durch Farbpigmente auf der Flügeloberfläche erzeugt, sondern durch eine dreidimensionale Oberflächenstruktur mit Lamellen in Nanometermaßstab. Die Lamellen interferieren mit einfallendem Licht, wobei Licht einer bestimmten Wellenlänge (blau) an ihnen reflektiert wird. Die sich gegenseitig verstärkenden Reflexionen erzeugen einen hellen Farbeindruck.

Da die Struktur für andere Wellenlängen durchlässig bleibt, kann man mit ihr eine kräftige Färbung bei gleichzeitig hoher Lichtdurchlässigkeit erzielen. Durch Veränderung der Abstände zwischen den Lamellen lässt sich die reflektierte Farbe einstellen. Am Fraunhofer ISE wurde eine Beschichtung aus einem dielektrischen Material entwickelt, die eine hohe Farbsättigung sowie gute Blickwinkelstabilität ermöglicht. Mit ihr können farbgebende dreidimensionale Oberflächenstrukturen großflächig auf Deckgläser für PV-Module aufgetragen werden, wobei die Farbe individuell anpassbar ist. Im Vergleich zu unbeschichteten Deckgläsern weisen die farbigen Module einen relativen Leistungsverlust von nur 7% auf.

■ Adsorberentwicklung: Adsorptionswärmepumpen und -kältemaschinen

Im Bereich thermisch angetriebener Wärmepumpen und Kältemaschinen arbeitet das Fraunhofer ISE u. a. an kompakten Adsorptionswärmeübertragern. Hierfür wurden gängige Wärmeübertragerkonzepte mit einem neu entwickelten Adsorbens-Metall-Komposit kombiniert.

Der Abtransport der beim Adsorptionsprozess entstehenden Wärme ist von großer Bedeutung für den Betrieb eines Adsorbers. Die Leistungsdichte des Adsorbers hängt zudem von der Menge des Sorptionsmaterials pro Volumen ab. Eine Möglichkeit der Adsorberoptimierung sind poröse metallische Trägerstrukturen mit hoher spezifischer Oberfläche und guten Wärmeleiteigenschaften.

In Kooperation mit dem Fraunhofer IFAM und mit Industriepartnern wurde ein Adsorptionsmodul gefertigt und vermessen. Die Wärmeübertragerstruktur basiert auf Aluminium-Flachrohren, die im Strangpressverfahren hergestellt werden und mit Lötlut beschichtet sind. Ein deutlicher Vorteil dieser Bauart ist die flächige Kontaktierung des Kompositmaterials mit der Wärmeübertrager-Oberfläche, die für kurze Wege bei der Abfuhr von Wärme aus dem aktiven Material sorgt. Die Leistungsdichte konnte im Vergleich zum Stand der Technik mindestens um den Faktor fünf gesteigert werden. Damit sind zum Beispiel wandhängende Adsorptionswärmepumpen vorstellbar.

Derzeit erfolgen die Weiterentwicklung des Kompositmaterials sowie die Integration in gängige Wärmeübertragerkonzepte. Dabei erweisen sich auch alternative Trägermaterialien wie Metallgestricke oder -schäume und neue Klassen von Adsorptionsmaterialien wie metallorganische Gerüstverbindungen als aussichtsreich.



*Fassadenprofil während
des SBI-Tests.*

© Fraunhofer WKI / A. Schirp

*Binderbasierte Beschichtung mit
zeolithartigem Sorptionsmaterial
auf einem Luft-Luft-Wärmeüber-
trager im Industriemaßstab für
die Gebäudeklimatisierung.*

©Fraunhofer ISE



■ Flammgeschützte Wood-Polymer Composites (WPC) für Fassadenprofile

Forscher des Fraunhofer-Instituts für Holzforschung WKI entwickelten gemeinsam mit Industriepartnern flammgeschützte WPC für den Einsatz als Fassadenprofile. Das BMEL förderte das Vorhaben über die FNR. WPC besteht zu etwa 50 – 70 % aus Holzpartikeln und zu etwa 30 – 50 % aus thermoplastisch verarbeitbaren Polymeren, insbesondere Polypropylen und Polyethylen. Aus WPC werden aufgrund der hohen Dauerhaftigkeit überwiegend Produkte für die Außenanwendung hergestellt. Mit der Entwicklung flammgeschützter WPC, die den baurechtlichen Anforderungen entsprechen, lässt sich der Anwendungsbereich erheblich erweitern.

Zur Herstellung der Fassadenprofile wurde Polyethylen hoher Dichte (HDPE) eingesetzt und sowohl das Holzmehl als auch das Polymer mit geeignetem Flammschutz ausgerüstet. Wichtige Materialeigenschaften der WPC wie Wasseraufnahme, Quellung und Festigkeiten sollten davon unbeeinflusst bleiben. Die entwickelten Rezepturen wurden anschließend im Industriemaßstab verarbeitet. Die Prüfung des Materials im Single-Burning-Item-Test (SBI) zeigte, dass die Vorbehandlung des Holzmehls mit einem Flammschutzmittel zu einer besseren Klassifizierung des hergestellten WPC führt. In weiteren Versuchen wurden zum einen WPC-Profiltypen mit höherem Holzanteil (55 %) und zum anderen mit PVC als Matrix hergestellt. Mit dem höheren Holzanteil konnten die Forscher eine sehr gute Klassifizierung im SBI erreichen. Bei der Rezeptur mit 42 % vorbehandeltem Holzmehl und HDPE als Matrix erzielten sie die gleiche Klassifizierung wie bei der Variante mit PVC-Matrix ohne Zugabe von Flammschutzmitteln.

Die Herstellung von flammschützenden Haftvermittlern erreichten die Partner über die Entwicklung langkettiger Phosphorsäureester. Die synthetisierten Produkte wiesen eine gute Haftvermittlung auf, die teilweise sogar besser war als die des Referenz-Haftvermittlers MAPP. Bei der Flammschutzwirkung besteht jedoch noch Optimierungsbedarf.

■ Hochporöse Beschichtungen für thermische Kühlanlagen und Wärmepumpen

Thermisch angetriebene Kältemaschinen sind eine Alternative zur herkömmlichen Klimatisierung. Sie verdampfen Flüssigkeit, z. B. Wasser, bei niedrigem Druck und entziehen der Umgebung dabei Wärme. Das Fraunhofer ISE arbeitet an neuartigen Sorptionsmaterialien, die besonders viel Wasserdampf speichern können. Die Forscher setzen dabei auf metallorganische Gerüstverbindungen (engl. Metal Organic Framework, kurz MOF). Diese bestehen aus einem Metallkomplex und einem organischen Teil. Sie haben typische innere Oberflächen von bis zu 4000 m² pro Gramm und können bis zu 1,4 Gramm Wasser pro Gramm Material binden. Bisher wurden MOF als Schüttung verwendet. Eine Schüttung aus MOF-Granulat behindert jedoch die Wärmeleitung. Wird das Material dagegen in einer dünnen Schicht auf Metalllamellen aufgebracht, vervielfacht das die Wärmeableitung und damit die Leistungsfähigkeit des Geräts.

Am Fraunhofer ISE wurden zwei komplementäre Verfahren entwickelt, um Wärmetauscher und andere Bauteile mit hochporösen metallorganischen Gerüstverbindungen zu beschichten – ein Direktkristallisationsverfahren und eine binderbasierte Beschichtung. Damit können verschiedene MOF oder andere Adsorbentien wie Zeolithe oder Silica-Aluminophosphate auf Bauteile aufgebracht werden. Die Anwendung ist nicht nur für den Gebäudebereich interessant, sondern auch in Prozessen, in denen reversibel chemische oder physikalische Reaktionen mit Wärmeumsatz ablaufen. Chemische Prozesse verwenden oft Katalysatoren mit großen inneren Oberflächen. Durch Beschichtungen mit MOF oder Zeolithen können der Durchsatz oder die Temperaturkonstanz verbessert werden.



Der am Fraunhofer WKI entwickelte Holzschaum besteht zu 100 Prozent aus nachwachsenden Rohstoffen.

© Fraunhofer WKI / M. Lingnau

■ Holzschaum - Vom Baum zum Schaum

Schaumstoffe bestehen üblicherweise aus Kunststoffen auf petrochemischer Basis. Am Fraunhofer-Institut für Holzforschung WKI in Braunschweig entwickelten Forscher ein neues Schaummaterial: Es besteht zu 100 Prozent aus nachwachsenden Rohstoffen, ist klimafreundlich und recycelbar. Langfristig könnte der Holzschaum herkömmliche erdölbasierte Schaumstoffe ersetzen, sei es für Wärmedämmungen, Verpackungen oder Leichtbaumaterialien.

Die Forscher am WKI erarbeiteten Verfahren, um aus Holzpartikeln Schaumstoff herzustellen. Um den Schaum zu erzeugen, wird das Holz zunächst bei hohem Wassergehalt in feine Partikel zermahlen, bis eine zähflüssige Masse entsteht. Diese Suspension schäumen die Forscher chemisch oder physikalisch mithilfe von internen oder externen Gasbildnern auf. Anschließend härtet die Masse im Trockenschrank aus. Holzeigene Bindekräfte bewirken den Zusammenhalt des Schaums. Eine mögliche gesundheitliche Belastung durch Emissionen aus Klebstoffen ist daher nicht gegeben. Das Ergebnis ist ein leichter Grundwerkstoff mit einer porösen, zelligen Struktur und einer niedrigen Rohdichte. Schäume aus Buchenholz können beispielsweise gezielt in einem Dichtebereich zwischen 40 kg/m^3 und 280 kg/m^3 hergestellt werden. Das Material ist als Hartschaumplatte oder elastischer Schaumstoff weiterzuverarbeiten und, wie andere Holzwerkstoffe, einfach zu sägen oder zu fräsen. Dabei bildet das Produkt kaum Staub und ist geruchsneutral.

Die Holzschäume eignen sich besonders gut als Dämmmaterial für Gebäude. Zwar gibt es bereits Dämmstoffe auf Holzbasis, diese haben jedoch den Nachteil, dass sie weniger formstabil sind als Dämmmaterialien aus Kunststoff. Der am WKI entwickelte Holzschaum kann dagegen mit klassischen Kunststoffschäumen mithalten. Die Schaumprodukte wurden bereits nach den Normen, die für Dämmstoffe gelten, untersucht. Sowohl bei den wärmedämmenden Eigenschaften als auch bei den mechanischen und hygrischen wurden viel versprechende Werte erhalten. Die Druckfestigkeiten bei 10 Prozent Stauchung betragen, je

nach Dichte, 40 - 210 kPa. Die Wärmeleitfähigkeiten liegen bei niedrigen Dichten ($0,038 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) zwischen denen von Polystyrol und Holzfaserdämmplatten. Die Dickenquellung nach 24-stündiger Wasserlagerung ist < 1 Prozent. Das Brandverhalten ähnelt dem von Naturfaserdämmstoffen; sie brennen und glimmen, die Flamme erlischt zum Teil von selbst. Für den Flammenschutz eventuell erforderliche Additive lassen sich einfach und effizient im Herstellungsprozess mit den Faserstoffen vermischen.

Ein weiterer Vorteil: Im Gegensatz zu herkömmlichem Schaumstoff ist der Holzschaum problemlos zu recyceln. Wird er beispielsweise als Verpackung verwendet, kann der Verbraucher ihn einfach zum Altpapier geben.

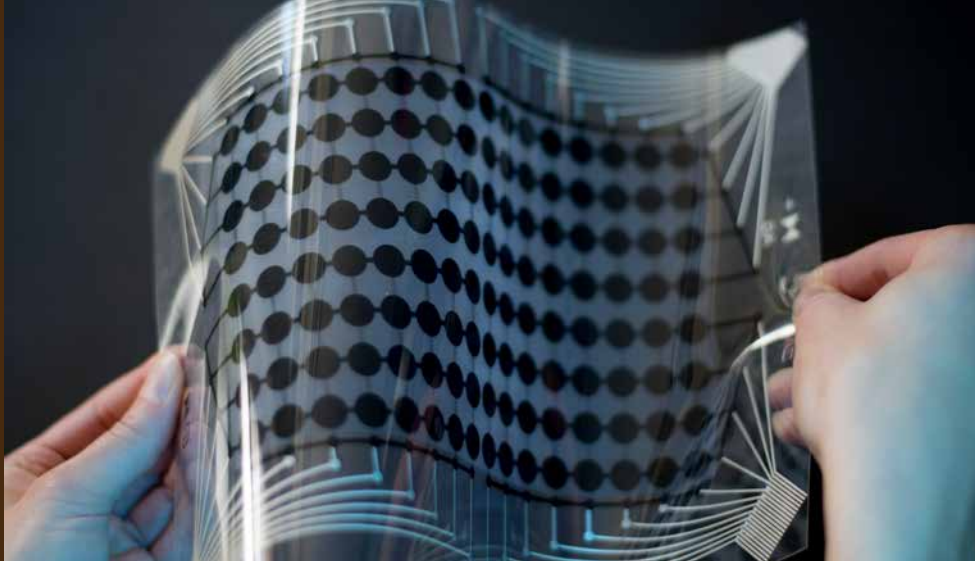
Derzeit experimentieren die Wissenschaftler mit verschiedenen Holzarten. Schon in wenigen Jahren sollen sich Produkte aus Holzschaum im großen Maßstab industriell fertigen lassen und auf dem Markt erhältlich sein.

Wie groß das Potenzial des neuartigen Materials ist, zeigen die Auszeichnungen, die der Holzschaum erhalten hat. Die Entwicklung wurde 2014 für den Deutschen Rohstoffeffizienzpreis nominiert und gewann 2015 sowohl den Interzum-Award »Best of the Best« als auch den GreenTec-Award in der Kategorie »Bauen und Wohnen«.



Die Ausgangsstoffe für den Holzschaum: Holzfasern und Wasser werden zu einer Suspension aufgemahlen und aufgeschäumt.

© Fraunhofer WKI



*Sensitive, flexible Folie
für Touchdisplays.
© Fraunhofer ISC*

MIKROSYSTEMTECHNIK

■ Neue Sensormaterialien ermöglichen flexible und leichte Touchscreens für Displays

Flexible und kostengünstig gedruckte Touchdisplays sind heute noch Zukunftsmusik, doch werden ihnen weite Anwendungsfelder vorausgesagt. Ihr großer Vorteil ist ihre Designfreiheit. Sie können nahezu beliebig angepasst werden, da die Displayfolie sozusagen ausgerollt werden kann. Außerdem ist das kostengünstige Herstellungsverfahren im Vergleich zu anderen Methoden mit geringem Materialaufwand bei gleich bleibend guten Sensoreigenschaften verbunden. Die Materialien lassen sich auch in großem Maßstab produzieren. Nicht zuletzt sind Touchdisplays auf Polymerbasis leichter und robuster als die bisher üblichen harten, glasbasierten berührungsempfindlichen Displays.

Eine neue Materialentwicklung des Fraunhofer ISC bringt die flexible Displaytechnologie einen großen Schritt voran. Druckbare Sensormaterialien können – auf eine Folie aufgebracht – Verformungen registrieren und senden ihr Signal direkt und hochauflösend an einen Rechner. In Kombination mit einem flexiblen Display können Tablet-PCs und Smartphones so nicht nur über virtuelle Schalter und Buttons bedient werden, sondern über Verformung und Bewegung der Folie.

Signal durch Verformung

Die im Rahmen des EU-Projekts »Flashed« entwickelten Sensoren – aufgebaut aus neuartigen piezoelektrischen Druckpasten – können großflächig auf eine flexible Polymerfolie aufgebracht werden und erlauben den Aufbau von elektronischen Drucksensoren mit simplen Printverfahren. Die sensitive Oberfläche der Folie – beispielsweise verknüpft mit einem Display – misst bei Berührung die Verformung. Das daraus entstehende Signal kann digitalisiert

und räumlich dargestellt werden. Die neue Touchsentechnologie wird die Bedienung von mobilen Endgeräten grundlegend ändern, da die neuartigen Sensoren eine intuitivere Steuerung möglich machen – ohne Schalter, Tasten oder Wischfunktion.

Nicht nur druck- sondern auch temperaturempfindlich

Die kostengünstig herstellbaren Sensoren registrieren außer den Veränderungen des mechanischen Drucks – beispielsweise beim Biegen und Bewegen des flexiblen Displays – auch Temperaturänderungen. Damit lassen sie sich auch für die Näherungssensorik einsetzen. So löst schon eine kleine Temperaturänderung, z. B. wenn sich eine Hand dem Sensor nähert, ein entsprechendes Signal aus. Diesen Effekt können die Entwickler aber auch unterdrücken, wenn er nicht benötigt wird. Für das FLEX SENSE Display ist es beispielsweise vorteilhaft, wenn die Temperatursensitivität komplett ausgeschaltet wird, um eine höhere Ortsauflösung zu erreichen. Darüber hinaus können die Sensoren auch als Aktoren genutzt werden und ein haptisches Feedback ermöglichen. Für viele Anwendungen kann die Kombination der Sensoreigenschaften mit einem haptischen Feedback die Nutzerfreundlichkeit verbessern und den Funktionsumfang erhöhen.

Zukünftig bleifrei

Bisher wurde für die Sensoren Blei-Titanat verwendet. In Zukunft soll jedoch auf das gesundheitlich als bedenklich eingestufte Material verzichtet werden. Ein wichtiges Ziel ist deshalb der Ersatz des bleihaltigen Piezomaterials durch andere Werkstoffe ohne allzu große Einbußen bei der Sensitivität. Dazu werden im Rahmen des Projekts neue ferroelektrische Partikel-Matrix-Systeme entwickelt und für gängige Siebdruckverfahren angepasst.

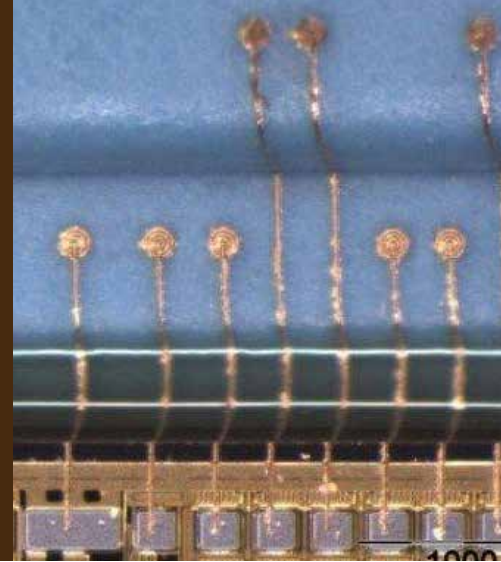


Mit modernen Ultraschallmikroskopen eröffnen sich vielfältige Anwendungsfelder in der Mikroelektronik.

© Fraunhofer IMWS

Gedruckte Edelmetallkontaktierung.

© Fraunhofer IKTS



■ Neue Fehleranalytikverfahren für die 3D-Integration mikroelektronischer Systeme

Um die Packungsdichte und Leistung von mikroelektronischen Bauteilen weiter zu erhöhen, setzen viele Hersteller auf die Ausnutzung der dritten Dimension mit gestapelten Chipaufbauten. Diese neuen Bauteil-Architekturen mit neu entwickelten Verbindungstechnologien bringen enorme technische Herausforderungen entlang der Produktionskette mit sich. Dabei sind auch zahlreiche neue Fehlerbilder aufzuklären. Auf diese Arbeit und die Entwicklung geeigneter Analysetechniken hat sich eine Gruppe am Fraunhofer-Institut für Mikrostruktur von Werkstoffen und Systemen IMWS in Halle spezialisiert.

Als zerstörungsfreies Analyseverfahren hat die Ultraschallmikroskopie eine hohe Bedeutung für die Defektanalyse. Gemeinsam mit dem Gerätehersteller PVA Tepla Analytical Systems GmbH hat das Fraunhofer IMWS ein international einmaliges, rasterakustisches Mikroskop für den Hochfrequenzbereich von bis zu 2 GHz entwickelt. Die damit verbundenen Möglichkeiten der Defektanalyse in Dünnschichtsystemen, die messtechnische Erfassung mechanischer Parameter sowie eine sehr hohe laterale und Tiefenauflösung im einstelligen Mikrometerbereich erschließen neue Anwendungsbereiche für die akustische Mikroskopie. In Kooperation mit dem belgischen Forschungszentrum IMEC konnte das neu entwickelte GHz-Ultraschallmikroskop erfolgreich für den Nachweis und die Ortung von Defekten in innovativen 3D-Kontaktierungen mikroelektronischer Chips – Through Silicon Vias (TSV) – eingesetzt werden. Gemeinsam mit PVA Tepla sowie weiteren Industrie- und Fraunhofer-Partnern sollen zukünftig weitere Einsatzfelder für das von PVA Tepla auf den Markt gebrachte Analysegerät erschlossen und die Leistungsfähigkeit des Verfahrens weiter erhöht werden.

■ Edelmetalltinten für die Mikroelektronik

Der digitale Druck funktioneller Materialien hat großes Potenzial für die Produktion elektronischer und sensorischer Bauelemente. Verfahren wie der Inkjet- und Aerosoldruck zeichnen sich hierbei durch ihre hohe Flexibilität, Schnelligkeit sowie Skalierbarkeit aus. Im Gegensatz zur klassischen Halbleitertechnologie werden für die Elektronikfertigung Materialtinten zum direkten Druck der Schaltungskomponenten auf das Zielsubstrat eingesetzt. Diese Entwicklung führte bereits zu einer Vielzahl innovativer Anwendungen wie beispielsweise flexible elektrische Schaltungen, miniaturisierte und kostengünstige Sensorik oder Wafer / Chip-Umverdrahtung und Kontaktierung.

Um das Potenzial dieser und weiterer Anwendungen zu erschließen, entwickeln Forscher am Fraunhofer IKTS geeignete Materialtinten auf Basis von Gold, Silber, Platin, Palladium, Rhodium, Kupfer sowie Kohlenstoff und Glas. Die technischen Anforderungen sind hoch, da die Tinten zu bestehenden Drucktechnologien kompatibel und auch für neue Substrate wie Polymere geeignet sein müssen. Diese werden im Gegensatz zu keramischen Substraten schon bei Temperaturen deutlich unter 180 °C gebrannt, was eine gezielte Einstellung der Sintereigenschaften verlangt.

Mittels einer speziellen Nanopartikelsynthese sowie geeigneter Lösungsmittel und organischer Additive haben die Forscher Tinten mit Partikeln deutlich kleiner als einem Mikrometer entwickelt. Neben der geringen Partikelgröße zeichnen sich die Tinten durch eine geringe Viskosität und Oberflächenspannung bei gleichzeitig hoher elektrischer Leitfähigkeit aus. Die Tinten können dadurch mit extrem feinen und dünnen Strukturbreiten abgeschieden werden und verringern so deutlich den Einsatz kostspieliger Materialien.



Das neue Mikroskop erreicht ein Auflösungsvermögen im Bereich unter hundert Nanometer.

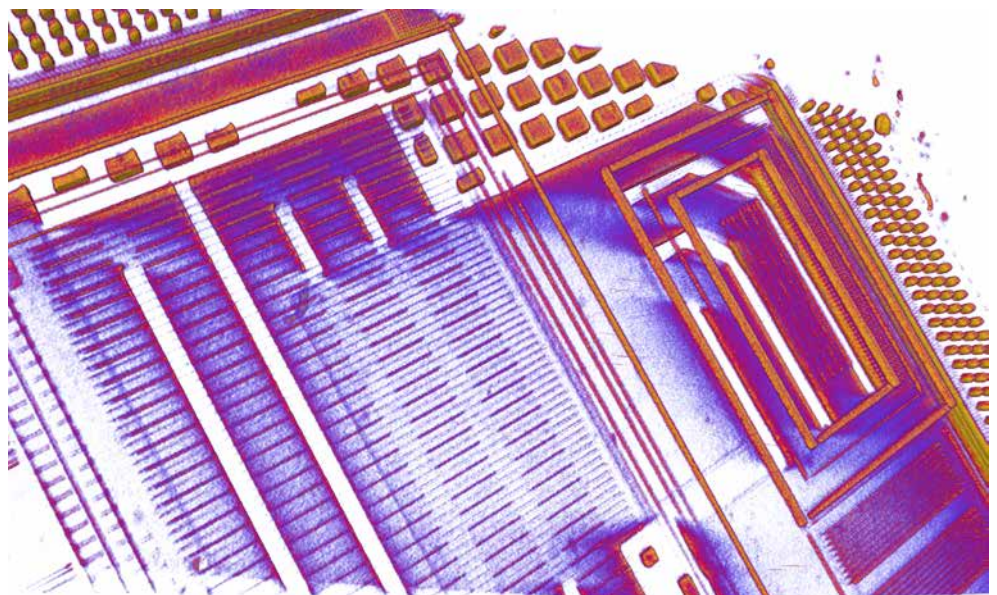
■ Röntgenblick auf Halbleiterstrukturen

Integrierte Halbleiterstrukturen (ICs) leisten fundamentale Arbeit in der Mikroelektronik. Der Aufbau dieser Strukturen ist dreidimensional, die Leiterbahnen messen teils nur wenige Nanometer. Mit der Entwicklung der höchstauflösenden Nano-CT leisten Forschende des Fraunhofer-Entwicklungszentrums Röntgentechnik EZRT und des Fraunhofer-Instituts für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP einen wichtigen Beitrag zur zerstörungsfreien Charakterisierung und Analyse von ICs. Hierdurch können in Zukunft sowohl das Design der Mikrostrukturen überprüft oder Produktionsfehler frühzeitig entdeckt werden.

Das neue Nano-CT-System XRM-II erreicht ein Auflösungsvermögen im Bereich unter hundert Nanometer. Dies entspricht etwa dem zehntausendfachen eines medizinischen CT-Systems. In dieser Größenskala sieht man nicht nur die Leiterbahnen in ICs, sondern auch die mineralischen Bestandteile von Gestein sowie die Gefüge von Metalllegierungen dreidimensional abgebildet.

Das Mikroskop (im Rahmen eines Großgeräteprogramms der DFG finanziert) wurde von Forschenden der Fraunhofer Gruppe NanoCT Systeme NCTS an der Universität des Saarlandes 2018 in Betrieb genommen. Das XRM-II Nano-CT ermöglicht einerseits Radioskopie- und CT-Aufnahmen mit Auflösungen bis unter 100 nm sowie Messungen mit einem höchstauflösenden Raster-Elektronenmikroskop (0,8 nm) für die korrelative Analyse von Materialien in einem Gerät.

Zudem kommt in Saarbrücken ein Mikro-CT Gerät zum Einsatz, welches mit der neuen Technik der Talbot-Lau Interferometrie ausgestattet ist. Diese Technik ermöglicht die simultane räumliche Darstellung von Röntgenschwächung, Phasenkontrast und Kleinwinkelstreuung in Bauteilen von mehreren Zentimetern Größe. Das Talbot-Lau Interferometer ist ortsveränderlich und kann seinen Platz tauschen mit einer In-Situ Zug-Druck-Belastungseinheit, welche Mikro-CT-Aufnahmen an Materialien unter Last erlaubt.



Das XRM-II Nano-CT wurde von Forschenden der Fraunhofer Gruppe NanoCT Systeme NCTS an der Universität des Saarlandes 2018 in Betrieb genommen.



SICHERHEIT

■ Den richtigen Fluchtweg finden mit der neuen Sensorplattform

Eine der schrecklichsten Situationen, die sich ein U-Bahn Passagier vorstellen kann: es brennt in einer U-Bahnstation, überall ist Rauch und der einzige Gedanke: »zurück an die Oberfläche, wo es frische Luft gibt«. Aber welchen Weg können Passagiere in einer U-Bahnstation oder einem U-Bahntunnel gefahrlos benutzen? Meist gibt es nicht viele Alternativen und wenn dann auch noch diese Wege gleichzeitig Strömungswege für den Rauch und andere gesundheitsschädliche Gase sind, befinden sich die Flüchtenden schnell in einer Todesfalle. In dem BMBF-Projekt MAusKat entwickelten Forscher des Fraunhofer IMM gemeinsam mit anderen Partnern ein Mess- und Analysesystem, mit dem die Ausbreitungswege von gasförmigen Gefahrstoffen auch in komplexen Gebäudestrukturen nachvollzogen werden können. Denn nur wenn diese Informationen gesichert vorliegen, können die Flucht- und Rettungswege effizient geplant werden.

In der Vergangenheit gab es einige Terroranschläge in U-Bahnsystemen wie z. B. 1995 der Sarin-Gas-Anschlag in Tokio mit 13 Toten und Tausenden Verletzten oder auf dem Moskauer Flughafen Domodedowo 2011 (36 Tote, 152 Verletzte), aber auch Brände in Hochhäusern (Shanghai 2010 mit 53 Toten), die aufgezeigt haben, dass die Planung von Fluchtwegen und Aufstellung von Rettungsplänen ein komplexes Thema ist, das am Reißbrett nicht adäquat und umfassend zu erfüllen ist. Betreiberorganisationen und Rettungskräfte brauchen exakte und zuverlässige Informationen, und zwar im Vorfeld eines Zwischenfalls. Hier setzt das von Fraunhofer IMM im Projekt MAusKat entwickelte Mess- und Analysesystem an, dessen Herzstück eine mobile und infrastrukturunabhängige Sensor-

Plattform ist. In einer Testsituation bringt man in bestehenden Gebäuden ein ungefährliches Tracergas, üblicherweise SF₆, aus und erfasst dann an verschiedenen Messpunkten die Strömung, Ausbreitung und Konzentration des Gases. Auf Basis dieser Daten wird in einer Simulation die Strömung und Konzentration berechnet und Gefahrenbereiche innerhalb eines Bauwerks identifiziert. Anschließend können die vorhandenen Fluchtwegen auf den Prüfstand gestellt und entsprechend den Ergebnissen neue Flucht- und Rettungskonzepte geplant werden.

Sensor-Plattform erfasst SF₆ und Klimadaten

Die von Fraunhofer IMM entwickelte Sensorplattform ist mit Sensoren ausgestattet und erfasst neben der Konzentration des Tracergases SF₆ auch klimatologische Messgrößen wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftdruck und Windgeschwindigkeit in x, y und z Richtung.

Bei Schwefelhexafluorid handelt es sich um ein synthetisches Gas – eine anorganische, chemische Verbindung aus einem Schwefelatom, an das sechs Fluoratom gebunden sind (SF₆). Es ist unter Normalbedingungen farb- und geruchlos, äußerst reaktionsträge, nicht brennbar und ungiftig. Aufgrund der physikalischen Eigenschaften wird SF₆ hauptsächlich als Isoliergas z. B. in der Mittel- und Hochspannungstechnik eingesetzt. Da die Hintergrundkonzentration in der Erdatmosphäre sehr gering ist (ca. 0,005 ppb) und angesichts der sehr guten Nachweisbarkeit mit zuverlässiger Gassensorik, wird SF₆ auch als Tracergas zur Erfassung und Bewertung von Luftströmungen eingesetzt. Problematisch bei der Verwendung von SF₆ ist jedoch das immense Treibhauspotential (Global Warming Potential) von 22.800 GWP. Der Umwelt zu liebe sollten daher nur geringe SF₆-Gaskonzentrationen eingesetzt und emittiert werden. Im Gegensatz zu früheren Untersuchungen, bei denen in einem



© Fraunhofer IMM

aufwändigen und kostenintensiven Verfahren Proben per Hand entnommen und in einem Labor, mittels Gaschromatograph, untersucht werden mussten, werden dank der Sensorplattform die Messgrößen im Intervall von einer Sekunde automatisch erfasst und gespeichert. Bei den Messungen entscheiden Sekunden, daher wurde eine hochpräzise Uhr mit einer Exaktheit von $\pm 3,5$ ppm eingebaut, die die einzelnen Messdaten mit einem Zeitstempel versieht, um die Messdaten der einzelnen Plattformen miteinander vergleichbar zu machen. Die gespeicherten Messdaten können nach Beendigung des Messzyklus auf einen USB-Stick oder je nach Ausstattung auch kabellos an das Analysesystem übertragen werden. Ausgestattet mit einer netzunabhängigen Spannungsversorgung (Akku) ist ein Betrieb von 24 bis 48 Stunden gewährleistet.

Im Projekt MAusKat wurden Tests unter anderem in Kaufhäusern, Auditorien und natürlich U-Bahnsystemen durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass mit Hilfe der neuen Analysemesstechnik eine genauere und zeitnahe Darstellung der klimatologischen Verhältnisse auch in komplexen Infrastrukturen über einen langen Zeitraum möglich ist. Weiterhin können die Messpunkte flexibel gewählt werden. »Der personelle Aufwand beschränkt sich auf die Installation des Messsystems und die sich anschließende Auswertung der Messdaten. Was die Kosten einer Untersuchung um ein Vielfaches senkt im Vergleich zu den Kosten, die bei einer manuellen Probennahme und der Analyse im Labor entstehen.« erläutert Dr. Karin Potje-Kamloth, Abteilungsleiterin Mikrofluidische Analysesysteme von Fraunhofer IMM.

Kleinste Mengen unter ppm Bereich

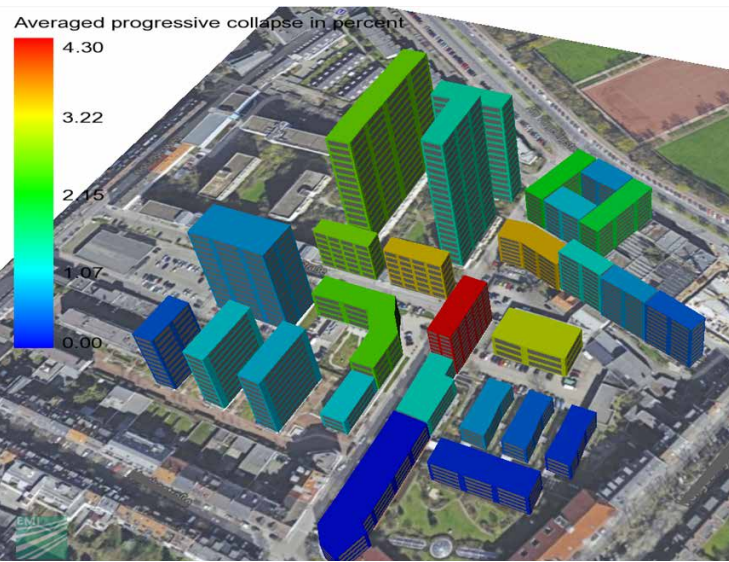
Bei den beschriebenen Fällen und angesichts des umweltpolitischen Aspekts wird deutlich, dass die Gassensoren besonders empfindlich sein müssen, um schon kleinste Mengen im unteren ppm-Bereich erfassen zu können. Hierzu wurde im Laufe des Projektes von der Firma smartGAS Mikrosensorik

GmbH aus Heilbronn eine robuste und hochempfindliche SF₆-Sensorik entwickelt, mit der stationär, stromnetzunabhängig, zeitlich hochauflösend und längerfristig das Tracergas im sub-ppm-Bereich erfasst werden kann. Diverse Praxistests und ein Vergleich mit der Gaschromatographie haben ergeben, dass mit der mobilen Sensorplattform zuverlässig SF₆-Tracergaskonzentrationen ab 50 ppb (0,05 ppm) mit einer Auflösung von 10 ppb erfasst werden können, so Christian Stein, Geschäftsführer von smartGAS.

So viele Anwendungsfelder wie Sensoren auf dem Markt

Eine besondere Stärke des Fraunhofer IMM ist es, Systeme so zu entwickeln, dass sie perfekt zu den Anforderungen des Kunden bzw. Projekts passen, aber gleichzeitig so modular und flexibel aufgebaut sind, dass sie leicht an geänderte Bedingungen oder Ansprüche angepasst werden können. So ist ein Einsatz der Sensor-Plattform z. B. als Lecksuchgerät in allen Anwendungsgebieten von SF₆ möglich. »In Trafostationen dient SF₆ als Kühlmittel, aber auch bei Isolation von Hochspannungsleitungen oder AWACS Flugzeugen wird SF₆ benutzt.« zählt Dr. Potje-Kamloth auf.

Festinstalliert kann die Sensor-Plattform auch als kontinuierliches Überwachungs- / Kontrollsystem genutzt werden. Besonders für eingangs erwähnte Zwecke zum Schutz der Öffentlichkeit vor Terroranschlägen könnte das Sensorsystem einen wichtigen Beitrag leisten. Im BMBF-Projekt OrGaMir wurde bereits 2011 gezeigt, wie die Sensor-Plattform als Prognose- und Entscheidungshilfetool für den Betreiber und die Rettungskräfte vor Ort eingesetzt werden kann. Installiert in einem U-Bahnsystem und ausgestattet mit Sensoren für Gase und Dämpfe, die als besonders kritisch identifiziert wurden, zeigt das System im Unglücksfall schnell an, ob und wo giftige Gase ausgetreten sind und wie sie sich aktuell ausbreiten.



*Transparentkeramik für den
Ballistikschutz.
© Fraunhofer IKTS*

*Gewichtete Verwundbarkeit
eines Stadtgebiets unter Be-
rücksichtigung aller möglicher
Gefahrenherde (Position,
Intensität). © Fraunhofer EMI*



■ Die lizenzierte Software »VITRUV«

Die lizenzierte Software VITRUV (Vulnerability Identification Tools for Resilience Enhancements of Urban Environments) ermöglicht das direkte Einbinden von Sicherheitsaspekten in den Prozess der Städteplanung. Städte können damit bereits in der Entwicklungsphase nachhaltiger und robuster geplant werden, außerdem ermöglicht es die Software, Schwachstellen in urbanen Gebieten zu identifizieren.

In Zusammenarbeit mit potenziellen Anwendern wie Städteplanern, Architekten und der Polizei wurde im EU-Projekt VITRUV eine benutzerfreundliche Software entwickelt. Die grafische Benutzeroberfläche (GUI) beinhaltet eine dreidimensionale Visualisierung der Stadtgebiete und verwendet dabei gängige Dateiformate (JPEG, DXF, CityGML). Mit abrufbaren vordefinierten Gebäudetypen kann die betrachtete Stadt schnell nachgebildet werden.

Zur Schwachstellenanalyse in urbanen Gebieten sind verschiedene Vorgehensweisen integriert. Im ersten Schritt ermöglicht eine empirische Risikoanalyse die Bewertung der Anfälligkeit bestimmter Gebiete, indem sie historische Daten verarbeitet. Statistische Häufigkeiten (Suszeptibilitäten) werden in Abhängigkeit der Bedrohungsart, des bedrohten Objekts, der Region und der Exposition visualisiert. Anschließend kann der mögliche Schaden mithilfe eines validierten physikalischen Ingenieurmodells im Rahmen einer quantitativen Risikoanalyse berechnet werden.

Unterschiedliche Leistungskriterien wie die Anzahl betroffener Personen, struktureller oder monetärer Schaden, sind für Gebäude und Verkehrsinfrastrukturelemente abrufbar. Verschiedene Schutzmaßnahmen sind implementiert und ermöglichen eine Erhöhung der urbanen Resilienz, also der Robustheit von Städten gegenüber Störungen. Weiterhin bieten diese Maßnahmen eine Grundlage für Kosten-Nutzen Analysen für Entscheidungsträger.

Weitere Informationen unter www.vitruv-tool.eu

■ Transparentkeramik für den Ballistikschutz

Keramische Werkstoffe werden ständig weiter entwickelt und weisen mittlerweile Eigenschaftsprofile auf, die vor wenigen Jahren noch undenkbar waren. Dazu tragen wesentlich die immer weiter spezialisierten Herstellungsverfahren und maßgeschneiderte Rohstoffe bei. Transparente keramische Werkstoffe stellen in Bezug auf Reinheit, Porenfreiheit, Homogenität und Defektfreiheit höchste Ansprüche an die Herstellungstechnologie. Sie bieten aber mit den möglichen speziellen optischen Parametern in Kombination mit den genannten typischen keramischen Eigenschaften interessante Alternativen und Innovationspotenzial zu bekannten optischen Gläsern. So ermöglichen es beispielsweise transparente Schutzkeramiken, zivile und militärische Personen, Fahrzeuge und Ausrüstungen mit maximaler Ballistikschtzwirkung bei minimalem Gewicht auszustatten.

Das Fraunhofer IKTS ist seit Jahren weltweit führend in der Herstellung von transparenten Keramiken mit besonders feinkristallinen Gefügen und äußerst guten mechanischen Parametern. Zur Herstellung von Keramik-Backing-Verbunden wird die Schutzkeramik auf einem metallischen Grund (Backing) aufgebracht und außen von einem Splitterschutz überdeckt. Für transparente Sicherheitsfenster besteht das Backing aus Glas. Die besondere Wirkung ist, dass bei Einschlag eines Eindringkörpers die Keramik selbst bricht, ihre scharfkantigen Bruchstücke dann aber den Eindringkörper aufreißen. Dabei ermöglichen wenige Millimeter Sinterkeramik eine stärkere Schutzwirkung als dicker Panzerstahl oder 10 cm dickes Panzerglas mit einem Flächengewicht von 150 kg/m². Demgegenüber reduziert die Keramik im Verbund mit dem Backing die Gesamtmasse des Schutzsystems auf nahezu 50 Prozent – mit entsprechenden Vorteilen für Beweglichkeit, Reichweite und Sicherheit von Fahrzeug und Insassen.



Textilien mit InnoSolTex®-Beschichtung.

© Fraunhofer ISC

■ InnoSolTEX® – funktionalisierte Textilien

An Textilien werden heute vielfältige Anforderungen gestellt. Sie dienen nicht mehr nur als Bekleidung, sondern erfüllen als High-Tech-Materialien technische oder schützende Funktionen. Durch die vielfältigen Einsatzbereiche ergeben sich neue Herausforderungen, denn Schutzkleidung ist je nach Einsatzbereich bestimmten Normen unterworfen. Die Textilien sollen nach Bedarf zum Beispiel vor mechanischen Einwirkungen, vor Hitze und Flammen, vor Nässe oder auch vor chemischen Stoffen sowie Mikroorganismen Schutz bieten und eine antistatische Funktion besitzen. Verschiedenste Ausführungen von Schutzkleidung können gegen eine oder mehrere dieser Einwirkungen schützen.

Sechs Funktionen in einer Textilbeschichtung

Weil nicht alle verlangten Eigenschaften über die Faserstoffe und die textile Struktur erfüllt werden können, werden die Textilien entsprechend veredelt. Bisher war es nicht möglich, alle Schutzeigenschaften in einem Produkt zu vereinen. Das Fraunhofer ISC hat nun gemeinsam mit seinen Kooperationspartnern ein neues hybrides Beschichtungssystem auf Basis von anorganisch-organischen Hybridpolymeren entwickelt.

Das InnoSolTEX®-Beschichtungssystem ermöglicht es, bis zu sechs Funktionen miteinander zu kombinieren. Basis für die Beschichtung ist die am Fraunhofer ISC entwickelte Stoffklasse der ORMOCER®e, anorganisch-organische Hybridpolymere. Ihre Eigenschaften lassen sich je nach Anforderung variieren. So erfüllen sie hydrophobe, flammfeste und waschbeständige Funktionen und ermöglichen gleichzeitig eine antistatische Oberfläche, eine verbesserte Abriebbeständigkeit und eine antimikrobielle Wirksamkeit. Mit dem Baukastensystem können die Beschichtungseigenschaften spezifischen Kundenwünschen entsprechend zusammengestellt werden.

Nur ein Arbeitsschritt bei der Herstellung

Die neue Beschichtung kann sowohl auf Garne als auch auf fertige Stoffe appliziert werden. Ein weiteres Plus: Bereits bestehende Produktionsanlagen können mit dem System aufgerüstet werden. Zudem ist die Beschichtung der Textilien in einem einzigen Arbeitsschritt möglich. Die neuen InnoSolTex®-Lacke sind mit Wasser verdünnbar und können problemlos bei einer Temperatur von 6 °C einige Wochen lang gelagert werden.

Parallel zu den Materialentwicklungen am Fraunhofer ISC wurde bei den Partnern der Produktionsmaßstab aufskaliert, sodass Chargengrößen von 30 Kilogramm herstellbar sind. Erste Industrietests zeigen, dass sich die beschichteten Fäden hervorragend zu Flächengebilden verarbeiten lassen. Sie kleben und reißen nicht und lassen sich auch gut bei höheren Maschinengeschwindigkeiten von der Spule abziehen. Die Textilien können bei maximal 60 °C Pflegeleichtwäsche mit Feinwaschmittel oder Desinfektionsmittel gereinigt werden, bleiben auch nach mehreren Waschgängen beständig und behalten ihre antimikrobielle Funktion.

So vereint das neue Beschichtungssystem InnoSolTEX® mehrere Vorteile: Weniger Prozessschritte bei der Herstellung, niedrigere Energie- und Produktionskosten und ein leistungstärkeres Produkt, das problemlos auf herkömmlichen Industrieanlagen verarbeitet werden kann.



© Fraunhofer ISC



Das One World Trade Center in New York – Hier wurde DUCON für mehr Sicherheit eingesetzt.

© Fraunhofer EMI

■ **DUCON: Ein leistungsfähiger Werkstoff bei dynamischen Einwirkungen**

Immer mehr Menschen leben in Städten eng beieinander, damit steigen auch die Gefahren durch Extrembelastungen infolge von Naturkatastrophen, Unfällen und terroristischen Anschlägen. Beim Bau großer Wohnhäuser oder kritischer Infrastrukturen können neue Werkstoffe dazu beitragen, diese Gebäude sicherer gegen derartige extreme Einwirkungen zu machen. Ein prominentes Beispiel hierfür ist das One World Trade Center in New York City, das auf Ground Zero im Jahr 2013 fertiggestellt wurde.

Der Sicherheitsaspekt spielte hier auch in der Auswahl der verwendeten Baustoffe eine große Rolle. Hier kam der Hochleistungswerkstoff DUCON® zum Einsatz, der vom Fraunhofer EMI gemeinsam mit der Firma DUCON entwickelt und optimiert wurde.

Dieses Material ist ein Verbundwerkstoff, in das eine Mikrostaahlbewehrung in eine hochfeste Betonmatrix eingebettet ist. Es bietet eine hohe Schutzwirkung bei dynamischen Einwirkungen. Mit einer Druckfestigkeit von über 150 Megapascal und einer hohen Zugfestigkeit von mehr als 6 Megapascal zeichnet sich die Betonmatrix ebenso durch eine optimierte Mikrostruktur mit geringer Porosität aus, was zu einem hervorragenden Verbund mit der Staahlbewehrung führt. Erst dadurch können die positiven Eigenschaften erreicht werden. Die Verwendung von Hochleistungskomponenten sowie die Zugabe von feinen Zuschlägen führen zu einer Optimierung der Packungsdichte. Die geringere Porosität, aber auch die hohen Festigkeitswerte können die Anwendungsbreite von Betonwerkstoffen erheblich vergrößern.

Die Verwendung der Bewehrung in Form von Mikrostaahlmatten bewirkt nicht nur eine Reduktion der Sprödigkeit, sondern auch eine Verbesserung des Verhaltens bei Maximalbelastung und führt zu einer deutlichen Steigerung der Bruchenergie.

DUCON® eignet sich aufgrund seiner speziellen Mikrostruktur auch für den Einsatz in aggressiven Umgebungen, wie zum Beispiel Meerwasser. Versuche am Ernst-Mach-Institut haben gezeigt, dass die Anwendung des Materials in kritischen Bauteilen ein signifikant höheres Schutzniveau ermöglicht.



Das One World Trade Center in New York City.

© Fraunhofer EMI

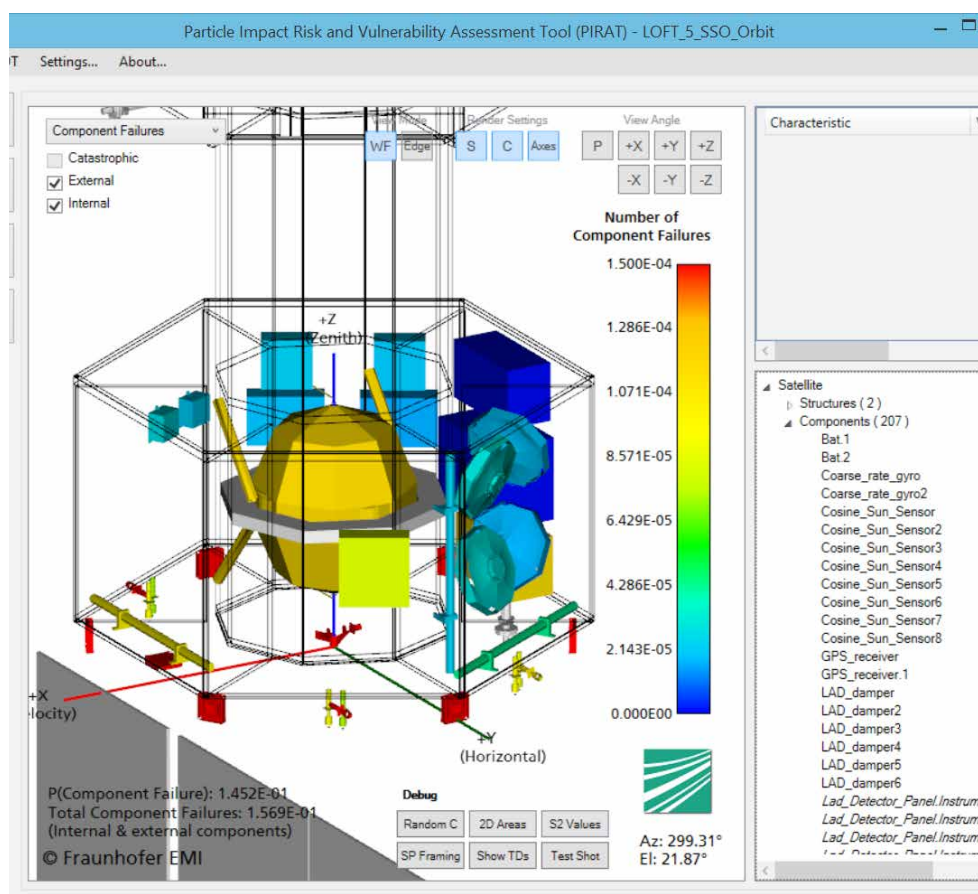


■ Satelliten-Verwundbarkeitsanalyse-Software »PIRAT«

Weltraumschrott ist ein Oberbegriff für Objekte in Erdumlaufbahnen, die eine Kollisionsgefahr für Raumfahrzeuge darstellen. Weltraumschrott entsteht unter anderem als Abfallprodukt bei Raketenstarts, bei der Trennung von Oberstufen, bei der Freisetzung der

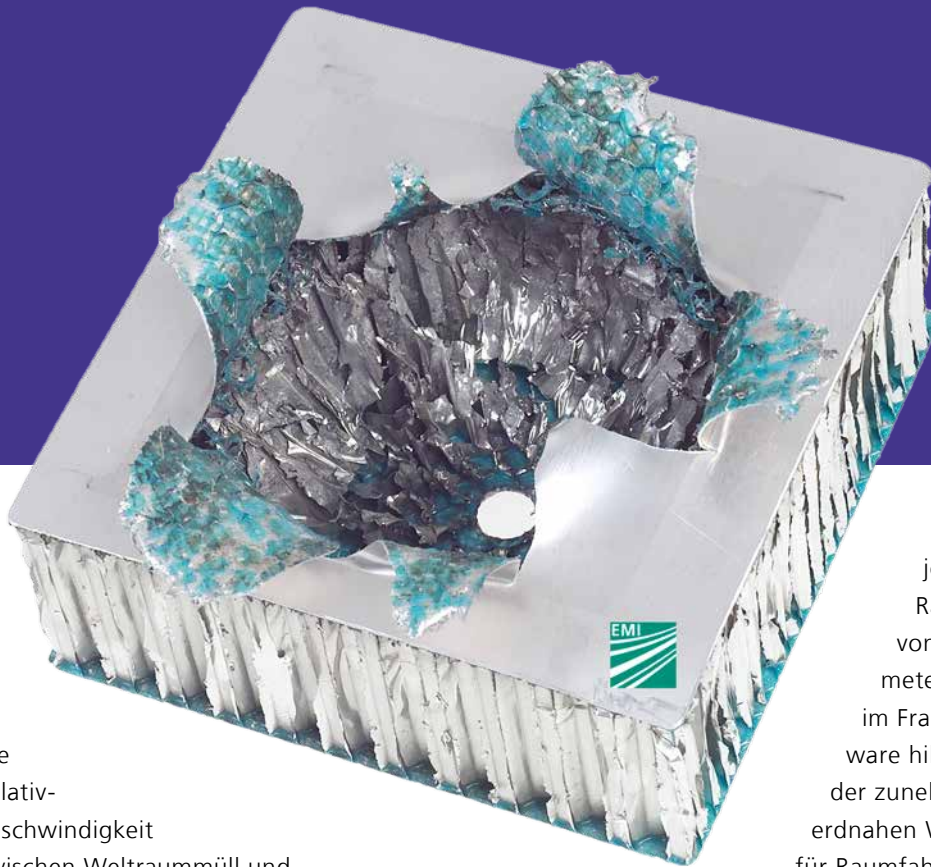
Satelliten oder bei der Zerlegung von Raumfahrzeugen durch Explosion von Resttreibstoffen oder Batterien sowie durch Kollisionen zwischen Objekten in erdnahen Umlaufbahnen. Eine weitere Ursache sind abgebrannte Treibstoffe von Feststoffmotoren.

Durch Weltraumschrott in Erdumlaufbahnen können Satelliten zerstört und andere Objekte beschädigt werden.



PIRAT Software Tool des EMI zur Untersuchung der Verwundbarkeit von Satellitenkomponenten gegen Einschläge von Weltraummüll und Mikrometeoroiden.

© Fraunhofer EMI



*Aluminium- Strukturwand für Satelliten nach Durchschlag eines Aluminiumkügelchens.
© Fraunhofer EMI*

Die Relativgeschwindigkeit zwischen Weltraummüll und einem Raumfahrzeug kann bis zu 16 Kilometern pro Sekunde in erdnahen Umlaufbahnen betragen. Kollisionen mit Weltraumschrott-Teilchen bereits ab einer Größe von einem Millimeter können ernste Konsequenzen für Satelliten haben, denn Teilchen ab dieser Größe können Satellitenwände durchdringen, und im Innern des Satelliten auf Komponenten wie Druckleitungen und -Tanks, Treibstofftanks, Kabel und elektronische Geräte aufprallen und diese beschädigen oder zerstören. Komponenten auf der Außenseite des Satelliten sind besonders von Einschlägen betroffen, lassen sich aber kaum dagegen schützen.

Wie wahrscheinlich es ist, dass Komponenten eines Satelliten durch Weltraumschrott zerstört werden, konnte bisher nur abgeschätzt werden. Mit der neu entwickelten Verwundbarkeitsanalyse-Software »PIRAT« (»Particle Impact Risk and Vulnerability Assessment Tool«) kann nun die Versagenswahrscheinlichkeit für

jede einzelne Komponente des Raumfahrzeugs durch Einschläge von Weltraumschrott und Mikrometeoroiden berechnet werden. Die im Fraunhofer EMI entwickelte Software hilft, die Gefährdung, die von der zunehmenden Verschmutzung des erdnahen Weltraums durch Weltraummüll für Raumfahrzeuge ausgeht, quantitativ zu ermitteln.

PIRAT ermöglicht es, die Verwundbarkeit einzelner Komponenten sowie des gesamten Raumfahrzeugsystems schon während früher Entwicklungsphasen (Phasen O/A/B) zu erfassen und dadurch frühzeitig Schutzmaßnahmen für besonders exponierte Raumfahrzeugkomponenten im Design einzuplanen. PIRAT wurde 2014 in der Concurrent Design Facility der European Space Agency (ESA) als ein Software-Tool zur Unterstützung von ESA-Ingenieuren während Phasen O/A im Raumfahrzeugdesign eingeführt. PIRAT ist auch eine Methode, mit der Effekte, die durch den Einschlag von Weltraumschrott-Teilchen und Mikrometeoroiden entstehen, auf Systemebene in Satelliten untersucht und prognostiziert werden können.

Lizenzen für die PIRAT Software sind beim Fraunhofer EMI erhältlich.



DIE FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT

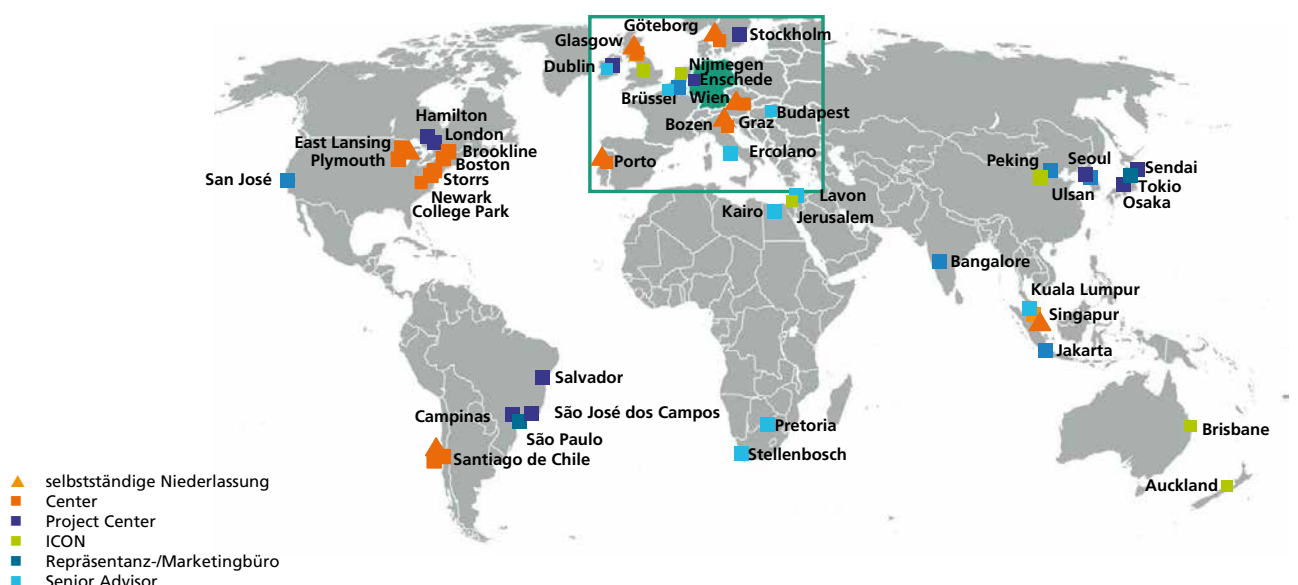
Forschen für die Praxis ist die zentrale Aufgabe der Fraunhofer-Gesellschaft. Die 1949 gegründete Forschungsorganisation betreibt anwendungsorientierte Forschung zum Nutzen der Wirtschaft und zum Vorteil der Gesellschaft. Vertragspartner und Auftraggeber sind Industrie- und Dienstleistungsunternehmen sowie die öffentliche Hand.

Die Fraunhofer-Gesellschaft betreibt in Deutschland derzeit 72 Institute und Forschungseinrichtungen. Mehr als 25 000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, überwiegend mit natur- oder ingenieurwissenschaftlicher Ausbildung, erarbeiten das jährliche Forschungsvolumen von 2,3 Milliarden Euro. Davon fallen knapp 2 Milliarden Euro auf den Leistungsbereich Vertragsforschung. Rund 70 Prozent dieses Leistungsbereichs erwirtschaftet die Fraunhofer-Gesellschaft mit Aufträgen aus

der Industrie und mit öffentlich finanzierten Forschungsprojekten. Rund 30 Prozent werden von Bund und Ländern als Grundfinanzierung beigesteuert, damit die Institute Problemlösungen entwickeln können, die erst in fünf oder zehn Jahren für Wirtschaft und Gesellschaft aktuell werden.

Internationale Kooperationen mit exzellenten Forschungspartnern und innovativen Unternehmen weltweit sorgen für einen direkten Zugang zu den wichtigsten gegenwärtigen und zukünftigen Wissenschafts- und Wirtschaftsräumen.

Mit ihrer klaren Ausrichtung auf die angewandte Forschung und ihrer Fokussierung auf zukunftsrelevante Schlüsseltechnologien spielt die Fraunhofer-Gesellschaft eine zentrale Rolle im Innovationsprozess Deutschlands und Europas. Die



FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT

Namensgeber der als gemeinnützig anerkannten Fraunhofer-Gesellschaft ist der Münchner Gelehrte Joseph von Fraunhofer (1787–1826). Er war als Forscher, Erfinder und Unternehmer gleichermaßen erfolgreich.



Wirkung der angewandten Forschung geht über den direkten Nutzen für die Kunden hinaus: Mit ihrer Forschungs- und Entwicklungsarbeit tragen die Fraunhofer-Institute zur Wettbewerbsfähigkeit der Region, Deutschlands und Europas bei. Sie fördern Innovationen, stärken die technologische Leistungsfähigkeit, verbessern die Akzeptanz moderner Technik und sorgen für Aus- und Weiterbildung des dringend benötigten wissenschaftlich-technischen Nachwuchses.

Ihren Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern bietet die Fraunhofer-Gesellschaft die Möglichkeit zur fachlichen und persönlichen Entwicklung für anspruchsvolle Positionen in ihren Instituten, an Hochschulen, in Wirtschaft und Gesellschaft. Studierenden eröffnen sich aufgrund der praxisnahen Ausbildung und Erfahrung an Fraunhofer-Instituten hervorragende Einstiegs- und Entwicklungschancen in Unternehmen.

Kompetenzen bündeln

Zur Abstimmung institutsübergreifender FuE-Strategien organisieren sich fachlich verwandte Fraunhofer-Institute in acht kompetenzbasierten Fraunhofer-Verbünden:

- Innovationsforschung – INNOVATION (seit 2017)
 - IUK-Technologie
 - Life Sciences
 - Light & Surfaces
 - Mikroelektronik
 - Produktion
 - Werkstoffe, Bauteile – MATERIALS
- sowie
- Verteidigungs- und Sicherheitsforschung VVS

Darüber hinaus kooperieren Institute oder Abteilungen von Instituten mit unterschiedlichen Kompetenzen in Fraunhofer-Allianzen, um ein bestimmtes Geschäftsfeld gemeinsam zu bearbeiten und zu vermarkten.

Stand der Zahlen: Januar 2018

www.fraunhofer.de

IMPRESSUM

Herausgeber

Fraunhofer-Verbund MATERIALS
Geschäftsstelle
c/o Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit
und Systemzuverlässigkeit LBF
Bartningstraße 47
64289 Darmstadt

Telefon +49 6151 705-262
Fax +49 6151 705-214
info-verbund-materials@lbf.fraunhofer.de
www.materials.fraunhofer.de

Vorsitzender des Verbunds

Prof. Dr. Ralf B. Wehrspohn

Stv. Vorsitzender des Verbunds

Prof. Dr. Bernd Mayer

Redaktion

Dr. phil. nat. Ursula Eul,
Geschäftsführung Fraunhofer-Verbund MATERIALS

Koordination

Tanja Beisel-Hallstein,
Assistenz Fraunhofer-Verbund MATERIALS

Konzeption

Dr. phil. nat. Ursula Eul, Fraunhofer-Verbund MATERIALS
innos - Sperlich GmbH, Göttingen, www.innos-sperlich.de

Design/Layout/PrePress

innos - Sperlich GmbH, Göttingen,
www.innos-sperlich.de

Fotografie

Titelcollage/-composing: innos - Sperlich GmbH
Urheber Einzelbilder (www.fotolia.com):
Marco2811, Thaut Images, Gerd Gropp, hfng, James Thew

© Geschäftsstelle Fraunhofer-Verbund MATERIALS,
c/o Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit, Darmstadt,
November 2018

Alle Rechte, insbesondere das Recht der Vervielfältigung und
Verbreitung sowie der Übersetzung, vorbehalten.





Fraunhofer
MATERIALS

Geschäftsstelle:

Dr. phil. nat. Ursula Eul
c/o Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit
und Systemzuverlässigkeit LBF
Bartningstraße 47
64289 Darmstadt
Telefon +49 6151 705-262
ursula.eul@materials.fraunhofer.de

www.materials.fraunhofer.de