

# ADHÄSIONS- UND GRENZFLÄCHEN-FORSCHUNG – VON ANALYSE UND SIMULATION ÜBER MATERIAL- UND PROZESSENTWICKLUNG BIS ZUR QUALITÄTSÜBERWACHUNG

Unter dem Begriff »Oberfläche« – oder umfassender »Grenzfläche« – versteht man üblicherweise die zweidimensionale Begrenzung von dreidimensionalen Objekten. Aber Grenzflächen zeichnen sich darüber hinaus durch vielfältige funktionelle Eigenschaften aus. Das zeigt sich im Alltag in Form unterschiedlichster Phänomene, beispielsweise bei der Entspiegelung von Brillengläsern oder bei der Benetzung von Oberflächen durch Wassertropfen. Weniger offensichtlich, aber von großer Bedeutung für die technologischen Fortschritte in der Welt von heute und morgen sind funktionelle Grenzflächen oder Grenzschichten in technischen Produkten. Die Eigenschaften und Funktionen vieler dieser Produkte sind einerseits durch die darin eingesetzten Werkstoffe und andererseits durch die Beschaffenheit der zugehörigen Materialoberflächen bestimmt. Das betrifft insbesondere auch die Grenzflächen bzw. Grenzschichten zwischen den verschiedenen Materialien, aus denen die Produkte aufgebaut oder mit denen sie beschichtet sind.

---

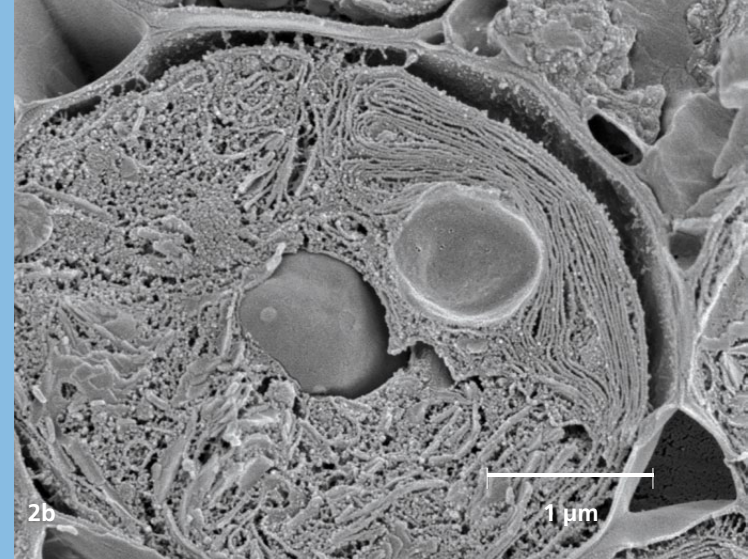
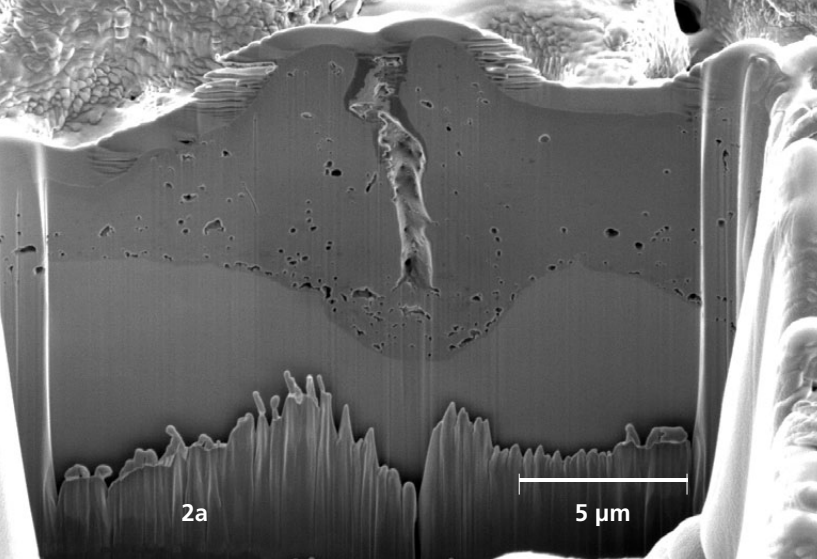
## Grenzflächen in multifunktionalen Materialien

---

Bei Klebverbindungen sind die Grenzflächen bzw. Grenzschichten sowohl für die Adhäsion als auch beispielsweise für Isolations- und Dämpfungseigenschaften zwischen zwei Fügeteilen verantwortlich. Ähnliches gilt für den mehrlagigen Schichtaufbau von Oberflächenschutzsystemen für Metallstrukturen. Diese Schichtverbunde müssen neben der Haftung der einzelnen Schichten untereinander zusätzlich Barriereeigenschaften gegenüber äußeren Einflüssen oder weitere Funktionen, z. B. Korrosionsschutz, gewährleisten. Grenzflächen spielen zudem bei zukunftssträchtigen Composit-Materialien für Leichtbauanwendungen, beispielsweise in carbonfaserverstärkten Kunststoffen (CFK), eine wesentliche

Rolle. Hierbei bestimmt die adhäsive Wechselwirkung zwischen den Faseroberflächen und dem verwendeten Matrixharz die außergewöhnlichen mechanischen Eigenschaften der Materialklasse.

Im Fertigungsprozess werden Materialoberflächen durch gezielte technische Verfahren behandelt, um ihre Eigenschaften für die jeweilige Anwendung zu optimieren. Dabei ist das Ergebnis der Modifikationen in den meisten Fällen mit den menschlichen Sinnen weder zu erfassen noch zu beurteilen. Diese Oberflächeneigenschaften, die zum Beispiel für Adhäsion, Korrosionsschutz oder Gleiteigenschaften verantwortlich sind, manifestieren sich meist in einer extrem dünnen Oberflächenschicht – mit Dimensionen von wenigen Nanometern oder Moleküllagen. Dabei kommt der chemischen Zusammen-



setzung der Schichten sowie der Rauigkeit der Oberfläche eine entscheidende Bedeutung für nachfolgende Fertigungsschritte – wie Kleben oder Beschichten – zu.

### Grenzflächenspezifisches Know-how am Fraunhofer IFAM

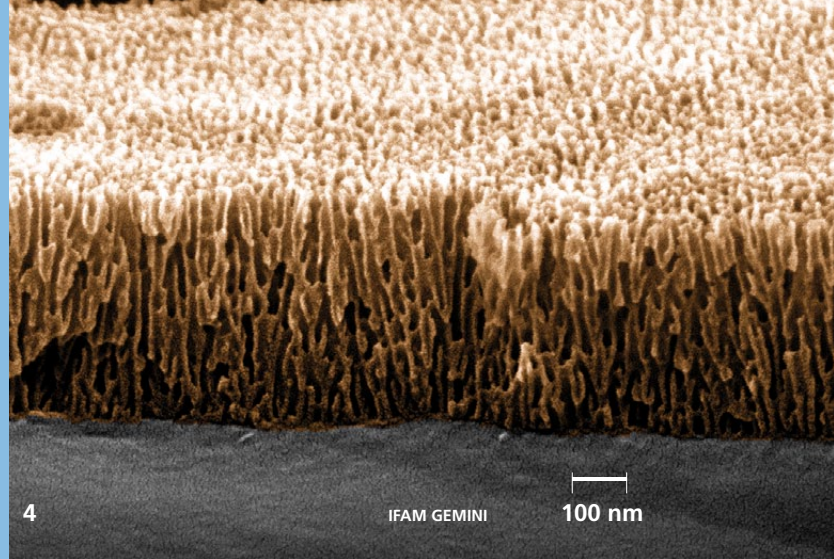
Der Nachweis und das Verständnis der technischen Auswirkungen der Eigenschaften von Oberflächen und Grenzflächen bzw. -schichten sowie die gezielte Nutzung dieses Wissens für die Entwicklung von Oberflächenbehandlungsprozessen, lack- und klebtechnischen Anwendungen sowie von neuen Materialien und Qualitätssicherungskonzepten stehen im Zentrum der Aktivitäten der Experten der Adhäsions- und Grenzflächenforschung am Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM. Ihnen steht eine Vielzahl von hoch entwickelten Analyseverfahren (Abb. 1, 2a + b), computergestützten Simulationstechniken, nasschemischen Oberflächenbehandlungsverfahren sowie Test- und Prüftechniken für ihre Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur Verfügung.

So können die Kunden sowohl das Expertenwissen als auch das Equipment der Tätigkeitsfelder Oberflächen- und Nanostrukturanalytik, Applied Computational Chemistry, Qualitätssicherung Oberfläche sowie Elektrochemie und Korrosionsschutz nutzen, um anwendungsorientierte Lösungskonzepte zu ihren jeweiligen Fragestellungen zu bekommen. Zudem stehen die fachspezifischen Erfahrungen anderer Abteilungen des Fraunhofer IFAM zur Verfügung, mit denen die Adhäsions- und Grenzflächenforschung eng zusammenarbeitet. Des Weiteren wird das vorhandene Know-how durch die Beteiligung an nationalen sowie internationalen Forschungsprojekten laufend aktualisiert und erweitert.

### Nasschemische Oberflächenbehandlungsverfahren – Erfolg durch material- und prozesstechnische Entwicklungen

So wurden beispielweise – über die vorhandenen Einrichtungen zur trockenchemischen Vorbehandlung im Bereich Plasmatechnik und Oberflächen des Fraunhofer IFAM hinaus – die Möglichkeiten der nasschemischen Vorbehandlung metallischer Werkstoffe gezielt weiter ausgebaut (Abb. 3). Eine geeignete Vorbehandlung dieser Werkstoffe ist für die nachfolgende Verarbeitung durch Lackieren oder Kleben zwingend erforderlich. Sie kann durch mechanische, trocken- oder nasschemische Verfahren erfolgen. Letztere nehmen nach wie vor den größten Anteil in der industriellen Fertigung ein. Wegen Gefahren für die Gesundheit und gesetzlichen Einschränkungen kann bei nasschemischen Verfahren immer weniger auf chromathaltige (Cr(VI)-haltige) Vorbehandlungen – die ausgezeichnete Oberflächeneigenschaften bezüglich Korrosionsbeständigkeit bzw. Haftfestigkeiten von Lacken oder Klebstoffen ermöglichen – zurückgegriffen werden.

- 1** Die Röntgenphotoelektronenspektroskopie (XPS) analysiert die Chemie von Oberflächen und Grenzflächen.
- 2a + 2b** Neueste Analysetechniken bieten Einblicke in den Mikro- und Nanokosmos – Focused-Ion-Beam-Präparation (FIB) in Kombination mit Raster- und Transmissionselektronenmikroskopie (REM, TEM):
- 2a:** Querschnitt eines oxidierten Titanwerkstoffs – REM-Aufnahme. Die In-situ-Querschnittspräparation erfolgte durch FIB-Technik.
- 2b:** Querschnitt (Cryo-Bruch) durch eine kugelförmige Seewasseralge als Beispiel der Cryo-REM von biologischen Proben.



Während der Umstieg auf Cr(VI)-freie Verfahren in vielen Bereichen, z. B. dem Automobilbau, bereits abgeschlossen ist, dauert die Entwicklung in anderen Bereichen noch an. Das betrifft u. a. die Bereiche Architektur und Luftfahrt, bei denen Oberflächen mit langen Lebensdauern sowie hoher Zuverlässigkeit bereitgestellt werden müssen. Das Fraunhofer IFAM arbeitet seit vielen Jahren eng mit Partnern aus der Luftfahrtindustrie zusammen, um Cr(VI)-freie Verfahren zur Vorbehandlung von Metallen vor dem Kleben und Lackieren zu entwickeln. Hierbei stehen vor allem die Leichtmetalle Aluminium und Titan sowie Stahl im Vordergrund. Dabei wird der gesamte Vorbehandlungsprozess betrachtet; einen Schwerpunkt bilden das Beizen, Passivieren und Anodisieren (Abb. 4).

Zukünftige Arbeiten zielen zum Beispiel auf Cr(VI)-freie lokale Vorbehandlungen für Reparatur- und Nacharbeiten, die Entwicklung von Klebebändern mit integrierter Beiz- oder Anodisierfunktion, weiterentwickelte Sealingverfahren von Anodisierschichten sowie die Behandlung neuer metallischer Werkstoffe ab.

### Vorhersage von Eigenspannungen und -verformungen geklebter Bauteile durch Simulationsverfahren

Neben den Entwicklungen von Oberflächenbehandlungsprozessen, Beschichtungsmaterialien und Klebstoffen ist auch die Betrachtung von Einflüssen des Produktions- bzw. Fertigungsprozesses von besonderer Bedeutung für die Qualität der erzeugten Produkte. Die in der Entwicklungsphase eines Produkts hergestellten Muster erlauben oftmals nur einen begrenzten Ausblick auf die komplexen Einflussfaktoren, die im späteren industriellen Herstellungsprozess auftreten können.

Ein Beispiel ist das Aushärten reaktiver Klebstoffe, bei denen während der Fertigung eine Vernetzung und damit ein Schrumpfen des Volumens auftreten. Dieser »Härtungs-

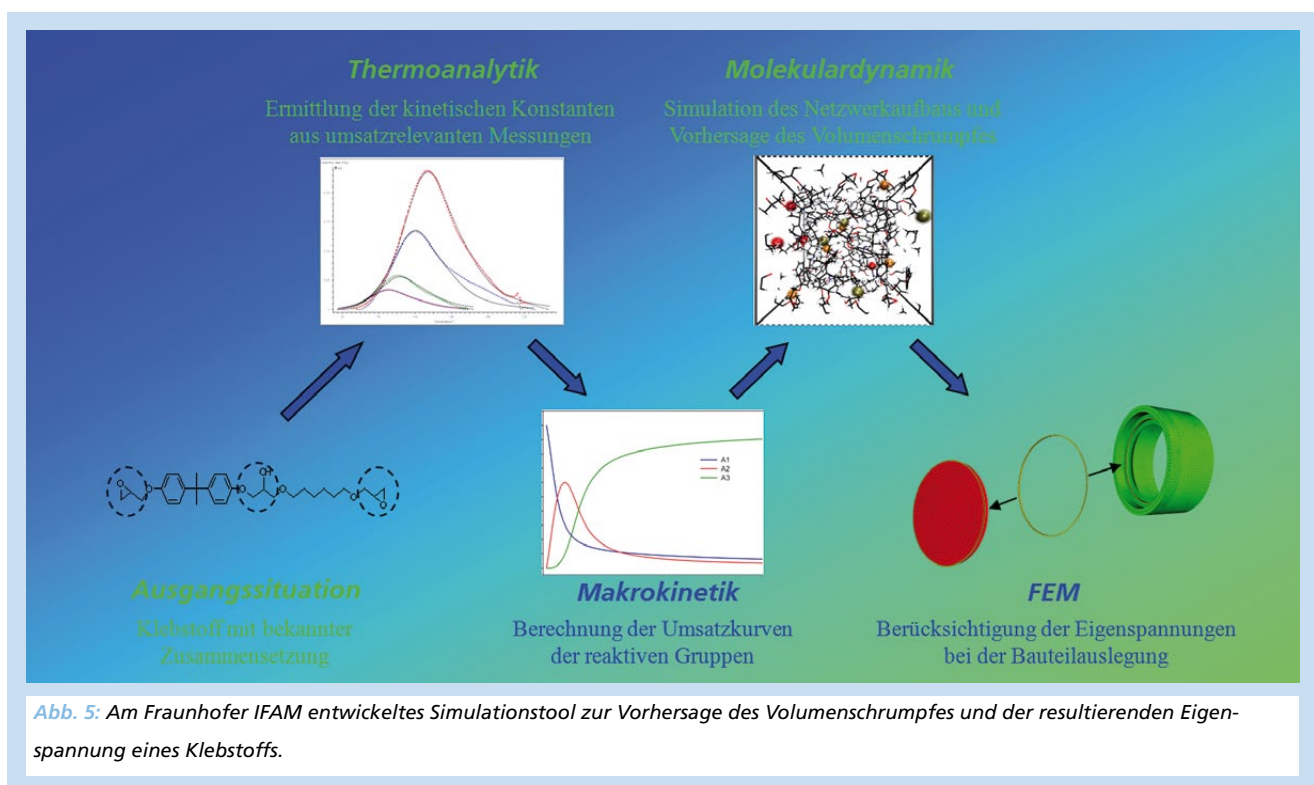
schrumpf« lässt sich bisher nicht voraussagen, sondern muss durch aufwendige und zeitintensive Messreihen in seiner Auswirkung auf die Bauteileigenschaften bestimmt werden. Seine Berücksichtigung wäre aber schon bei der Auslegung der Klebungen wünschenswert, um die während der Härtung auftretenden Spannungen im Füge teil bzw. Verschiebungen der geklebten Komponenten relativ zum restlichen Bauteil berücksichtigen zu können.

Derartige Fragestellungen – und damit ein Bedarf für entsprechende Simulationsverfahren – bestehen beispielsweise beim positionsgenauen Kleben von Linsen in optischen Geräten bzw. von Sensoren im Messtechnik- und Mikrotechnikbereich, bei denen eine hohe Präzision sowie Zuverlässigkeit der Hochleistungsklebstoffe bis hin zur Nanometerskala erreicht werden muss. Durch Verknüpfung verschiedener Simulations- und Analysemethoden konnten die Experten des Fraunhofer IFAM ein Simulationstool zur Vorhersage der Volumenänderung des entsprechenden Klebstoffs entwickeln (Abb. 5).

Dazu wurde ein makrokinetisches Reaktionsmodell für die Beschreibung der im Klebstoff ablaufenden Vernetzungsreaktionen erstellt. In Kombination mit thermokinethischen Messungen lassen sich mit diesem Modell zu jedem Zeitpunkt die Zahl der vorhandenen reaktiven Gruppen – und damit der Reaktionsumsatz – berechnen. Molecular-Modelling-Verfahren ermöglichen die Simulation der Polymernetzwerke auf molekularer Ebene und die Berechnungen der zugehörigen Dichte sowie des Polymervolumens. Bei einem Klebstoff mit bekannter Zusammensetzung lässt sich so die härtungsbedingte Volumenänderung zu einem beliebigen Zeitpunkt

**3** *Schnell und flexibel – die Mini-Galvanik des Fraunhofer IFAM zur kundenspezifischen Entwicklung und Optimierung von Vorbehandlungsprozessen für metallische Werkstoffe.*

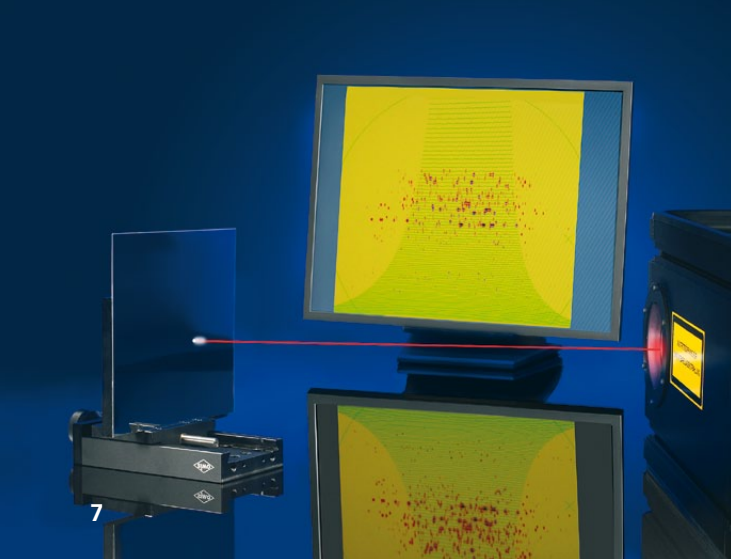
**4** *Anodisierschicht auf der Oberfläche eines Aluminiumwerkstoffs. Die REM-Aufnahme der Bruchkante zeigt einen Querschnitt der nanoporigen Schichtstruktur.*



voraussagen. Die Auswirkung des Schrumpfverhaltens auf die Bauteilauslegung kann anschließend durch eine Verwendung der molekular bestimmten Kenngrößen in Finite-Elemente-Methoden vorhergesagt und bei der Auslegung eines realen Bauteils berücksichtigt werden (Abb. 6).

Dieser Ansatz ermöglicht die Zurückführung der makroskopisch erfassbaren Eigenspannungen und -verformungen geklebter Bauteile auf die Chemie der Netzbildung. Das macht die Methode unabhängig von Schwindungsmessungen und für verschiedenste Klebstoffe und Anwendungen einsetzbar. Der Simulationsansatz ist neben den beschriebenen Präzisionsklebungen in kleinen Dimensionen auch für das Kleben bzw. für die Aushärtung von Matrixharzen großer Bauteile von Interesse. Daher soll diese Methode in zukünftigen Arbeiten auch auf das Fügen und die Herstellung von Großstruk-

turen – beispielsweise Rotorblätter von Windenergieanlagen, Flugzeugstrukturbauteile und Komponenten im Automobil-, Schienenfahrzeug- sowie Schiffbau – übertragen werden.

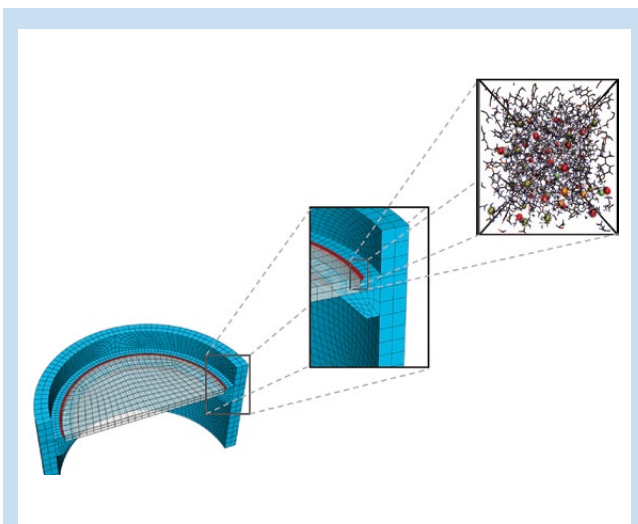


## Qualitätssicherungskonzepte

Zusätzlich zur Analyse der Auswirkungen von fertigungsbedingten Einflüssen ist eine prozessintegrierte Kontrolle von Oberflächeneigenschaften für zahlreiche Industriezweige und Produktionsbereiche von hohem Interesse. Aktivierungen und Vorbehandlungen von Werkstoffoberflächen nehmen im Transportmittelbau – Automobil, Nutzfahrzeug, Flugzeug, Schienenfahrzeug, Schiff – einen ebenso großen Raum ein wie bei der Herstellung elektronischer Baugruppen oder in der Medizintechnik. Große Windenergieanlagen, ob Onshore oder Offshore, benötigen oft hochwertige, fehlerfreie Be-

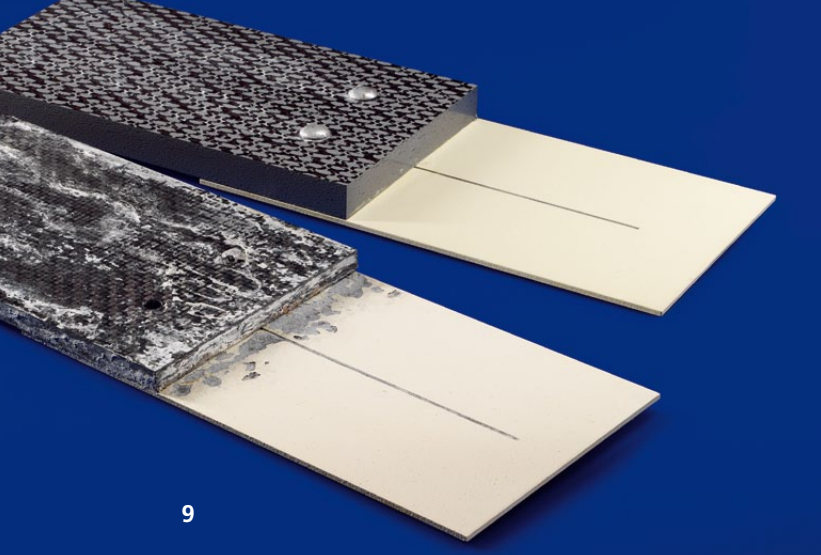
schichtungen und Lackierungen, etwa als Korrosionsschutz. Die lückenlose Überwachung der betreffenden Fertigungsprozesse ist hier ein Ziel der entwickelten Inline-Verfahren. Damit lässt sich eine durchgängige Überwachung des Zustands von Bauteiloberflächen in die individuellen Fertigungsprozesse des Kunden integrieren.

Innerhalb der Adhäsions- und Grenzflächenforschung des Fraunhofer IFAM bringen die Experten des Tätigkeitsfelds »Qualitätssicherung Oberfläche« neue innovative Verfahren der permanenten Oberflächenüberwachung im Produktionsprozess zur Anwendungsreife. Ein Beispiel für eine gelungene Anwendung von Inline-Messverfahren ist der Nachweis von fertigungsbedingten Trennmittelrückständen auf Faserverbundbauteilen mittels Laserinduzierter Plasma-Spektroskopie (LIPS), um nachfolgend schadhafte Klebungen oder Lackierungen zu vermeiden (Abb. 7). Ein weiteres Beispiel ist ein im Fraunhofer IFAM entwickelter Wasserbenetzungstest, die »Aerosol-Benetzungsprüfung«, mit dem die Qualität der Vorbehandlung großflächiger Oberflächen überprüft werden kann (Abb. 8). Speziell entwickelte Bilderfassungssysteme sowie Auswertungsroutinen ermöglichen sichere Aussagen und sind optimal in laufende Produktionsprozesse integrierbar.



**Abb. 6:** Der aus dem atomaren Strukturmodell des Klebstoffs (oben rechts) berechnete Volumenschrumpfung geht direkt als Parameter in die Auslegung des Bauteils (unten links) ein. So lassen sich Volumenänderung des Klebstoffs in der Klebfuge (Mitte, rot hervorgehoben) und die sich aufbauenden Eigenstressungen im Bauteil vorhersagen.

- 7 Laserinduzierte Plasma-Spektroskopie (LIPS) zur Untersuchung der Elementzusammensetzung der Probenoberfläche.
- 8 Untersuchung der Benetzungseigenschaften von Oberflächen mithilfe der im Fraunhofer IFAM entwickelten Aerosol-Benetzungsprüfung.



9



10

## Korrosionsschutz

Durch den zunehmenden Einsatz von Faserverbundwerkstoffen für Leichtbaukonstruktionen gilt es, für Materialverbunde zwischen CFK und metallischen Werkstoffen wirksame Schutzkonzepte zur Vermeidung von Kontaktkorrosion bereitzustellen (Abb. 9). Letztere würde sonst insbesondere bei Verbindungen zwischen CFK und Aluminiumlegierungen nicht nur unweigerlich, sondern auch rasch zu Korrosionsschäden am Aluminiumwerkstoff führen. Hier helfen sowohl klebtechnische Lösungen als auch maßgeschneiderte Korrosionsschutzkonzepte, die von den Experten für Elektrochemie und Korrosionsschutz erarbeitet werden.

Korrosion ist auch ein maßgeblicher limitierender Faktor für den Einsatz von Offshore-Windenergieanlagen (Abb. 10). Die Sicherstellung bzw. Verlängerung der Lebensdauer der Anlagen ist ein wichtiges Ziel, das durch geeignete Korrosionsschutzmaßnahmen erreicht werden soll. Hier kommt die jahrelange Erfahrung des Bereichs Elektrochemie und Korrosionsschutz zum Tragen, um geeignete Korrosionsschutzbeschichtungen zu bewerten und um Konzepte für die regelmäßige Kontrolle des »Ist-Zustands« der Schutzfunktion (»Monitoring«) sowie der Instandsetzung im Bedarfsfall zu entwickeln. Aktuell werden für Offshore-Windenergieanlagen in diesem Zusammenhang gemeinsam mit Entwicklern von Beschichtungsmaterialien, Wartungsfirmen, Anlagenbetreibern, Stahlbauern und Konstrukteuren nachhaltige Reparaturkonzepte geplant.

Als Beitrag für neue Korrosionsschutzbeschichtungen arbeitet die Adhäsions- und Grenzflächenforschung des Fraunhofer IFAM auch an der Entwicklung neuer Korrosionsinhibitoren, die die EU-Chemikalienverordnung REACH (Registration, Evaluation, Authorization and Restriction of CHemicals) erfüllen. Hier werden beispielsweise im Rahmen eines öffentlich geförderten Projekts polymere Wirkstoffe mit korrosionsschützenden Eigenschaften für eine breite Palette von Metallen entwickelt und erprobt (Abb. 11).

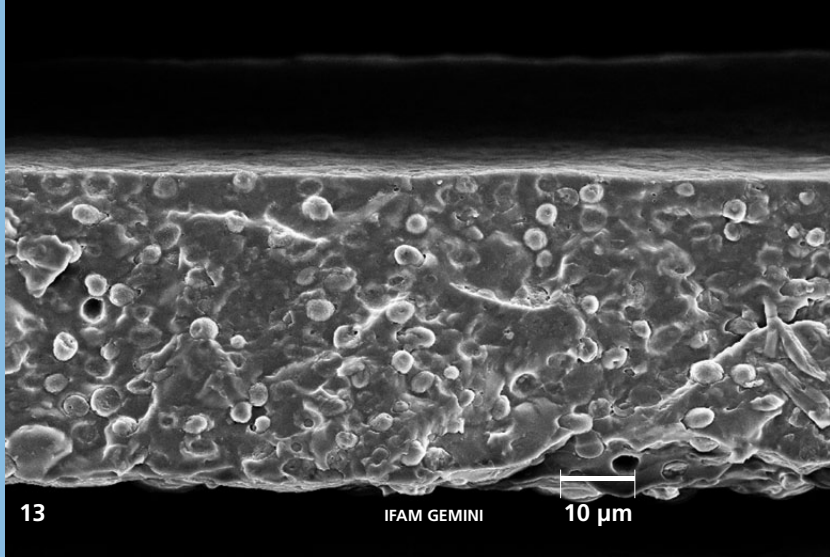
## Wirkstoffverkapselung

Darüber hinaus werden Strategien zur Verkapselung von Wirkstoffen für die Einarbeitung in polymere Materialien oder Beschichtungen erarbeitet. Diese Wirkstoffe, bei denen es sich neben Korrosionsinhibitoren auch um Substanzen zur Hemmung von Eisbildung oder um Duftstoffe handeln kann, werden bei Bedarf – d. h. aufgrund eines äußeren Reizes, in Form einer mechanischen Verletzung oder einer Temperaturänderung – gezielt aus ihren verkapselten Depots freigesetzt. Als Kapselmaterial werden dabei nanoskalige Zeolithe (Abb. 12) oder funktionelle Biokapseln (Abb. 13) verwendet. Letztere leisten als nachwachsende Rohstoffe einen Beitrag sowohl zum Umweltschutz als auch zum nachhaltigen Materialeinsatz und bieten hinsichtlich ihrer Eigenschaften bei Verarbeitung bzw. Einsatz gegenüber synthetischen Polymerkapseln Vorteile in Bezug auf Größenverteilung, Belastbarkeit sowie Speichereigenschaften.

In den genannten Beispielen – wie auch bei vielen anderen Tätigkeiten der Adhäsions- und Grenzflächenforschung des Fraunhofer IFAM – ist die Beschaffenheit von Oberflächen bzw. Grenzflächen von besonderer Bedeutung für die technischen Eigenschaften und Funktionen der betrachteten Materialien, Bauteile sowie Produkte. Der Nachweis und das Verständnis dieser Zusammenhänge dienen zur gezielten Entwicklung neuer Materialien sowie Oberflächenbehandlungsprozesse, zum Einsatz maßgeschneiderter Qualitätssicherungs- und Korrosionsschutzkonzepte sowie zur fundierten Schadensanalyse. Expertenwissen, langjährige Erfahrung und

**9** Die vom Fraunhofer IFAM entwickelten Korrosionsschutzkonzepte helfen, die Kontaktkorrosion zwischen CFK und Aluminium zu vermeiden.

**10** Korrosionsschutzkonzepte für Offshore-Windenergieanlagen – die Expertise aus dem Fraunhofer IFAM (Quelle: REpower Thornton Bank 12; Foto: Christian Eiche).



hoch entwickeltes Equipment – das sind die Grundlagen für die erfolgreiche praxisorientierte Bearbeitung von oberflächen- bzw. klebtechnischen kundenspezifischen Fragestellungen.



## KONTAKT

*Dr. Stefan Dieckhoff*  
*Adhäsions- und Grenzflächenforschung*  
*Telefon +49 421 2246-469*  
*stefan.dieckhoff@ifam.fraunhofer.de*

**Institut**  
*Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und*  
*Angewandte Materialforschung IFAM,*  
*Bereich Klebtechnik und Oberflächen, Bremen*

- 11** Salzsprühnebelgerät im akkreditierten Korrosionsprüflabor des Fraunhofer IFAM.
- 13** Lackschicht mit Biokapseln, die Wirkstoffbeladungen von bis zu 50 Massenprozenten enthalten können, um Lackschichten z. B. mit korrosionsinhibierender oder antimikrobieller Funktionalität auszustatten. Die REM-Aufnahme der Bruchfläche zeigt einen Lackschichtquerschnitt und die darin enthaltenen fein verteilten, einheitlich großen Biokapseln.