

FASERVERBUNDKUNSTSTOFFE

Vom Matrixharz bis zur Großstrukturmontage



INHALT

FRAUNHOFER IFAM – ALLE FVK-KOMPETENZEN UNTER EINEM DACH	1	
! Berechnung, Auslegung, Herstellung, Prüfung und Fügen von FVK	2	
! Fasern und Harz: Die Chemie muss stimmen	2	
! Keine FVK-Oberfläche ohne Vorbehandlung	3	
! Lackieren und Funktionalisieren von FVK	4	
! Die richtige Fügetechnik: Viel kleben, etwas nieten	4	<i>Abbildung auf der Titelseite:</i>
! Know-how für Material- und Verfahrensoptimierung: Adhäsions- und Grenzflächenforschung	5	<i>Geklebter Träger aus glas-</i>
! Fügen und Montieren – Vom Labor in den 1:1-Maßstab	7	<i>faserverstärktem Kunststoff zum</i>
! Personalqualifizierung – Eine wichtige Voraussetzung	7	<i>Nachweis der Schwingfestigkeit</i>
KOMPETENZNETZWERK KLEBTECHNIK UND OBERFLÄCHEN	8	<i>von Rotorblattmaterialien.</i>

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 67 Institute und selbstständige Forschungseinrichtungen. Rund 23 000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, überwiegend mit natur- oder ingenieurwissenschaftlicher Ausbildung, bearbeiten das jährliche Forschungsvolumen von 2 Milliarden Euro. Davon fallen 1,7 Milliarden Euro auf den Leistungsbereich Vertragsforschung. Über 70 Prozent dieses Leistungsbereichs erwirtschaftet die Fraunhofer-Gesellschaft mit Aufträgen aus der Industrie und mit öffentlich finanzierten Forschungsprojekten. Knapp 30 Prozent werden von Bund und Ländern als Grundfinanzierung beigesteuert, damit die Institute Problemlösungen erarbeiten können, die erst in fünf oder zehn Jahren für Wirtschaft und Gesellschaft aktuell werden.

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 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.

Das Fraunhofer IFAM – Klebtechnik und Oberflächen – Kompetenz und Know-how

Der Institutsbereich Klebtechnik und Oberflächen des Fraunhofer-Instituts für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM ist die europaweit größte unabhängige Forschungseinrichtung auf dem Gebiet der industriellen Klebtechnik mit über 300 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern. Im Mittelpunkt stehen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten der Klebtechnik sowie der Plasmatechnik und Lacktechnik mit dem Ziel, der Industrie anwendungsorientierte Systemlösungen zu liefern.

Multifunktionale Produkte, Leichtbau und Miniaturisierung – erreicht durch die intelligente Kombination von Werkstoffen und Fügeverfahren – bieten neue Möglichkeiten, die im Bereich Klebtechnik und Oberflächen realisiert werden. Die Aktivitäten reichen von der Grundlagenforschung über die Fertigung bis zur Markteinführung neuer Produkte. Industrielle Einsatzfelder sind überwiegend der Transportmittel-, Maschinen- und Anlagenbau,

die Energietechnik, die Baubranche, die Verpackungs-, Textil und Elektroindustrie sowie Mikrosystem- und Medizintechnik.

Das Tätigkeitsfeld Klebtechnik umfasst die Entwicklung und Charakterisierung von Klebstoffen und Matrixharzen für Faserverbundwerkstoffe, die beanspruchungsgerechte konstruktive Auslegung und Simulation von Kleb-, Niet- und Hybridverbindungen sowie deren Charakterisierung, Prüfung und Qualifizierung. Planung und Automatisierung der industriellen Fertigung der Verbindungen ergänzen diese Arbeiten. Prozessreviews sowie zertifizierende Weiterbildungen im Kontext Klebtechnik und Faserverbundtechnologie runden das Profil ab.

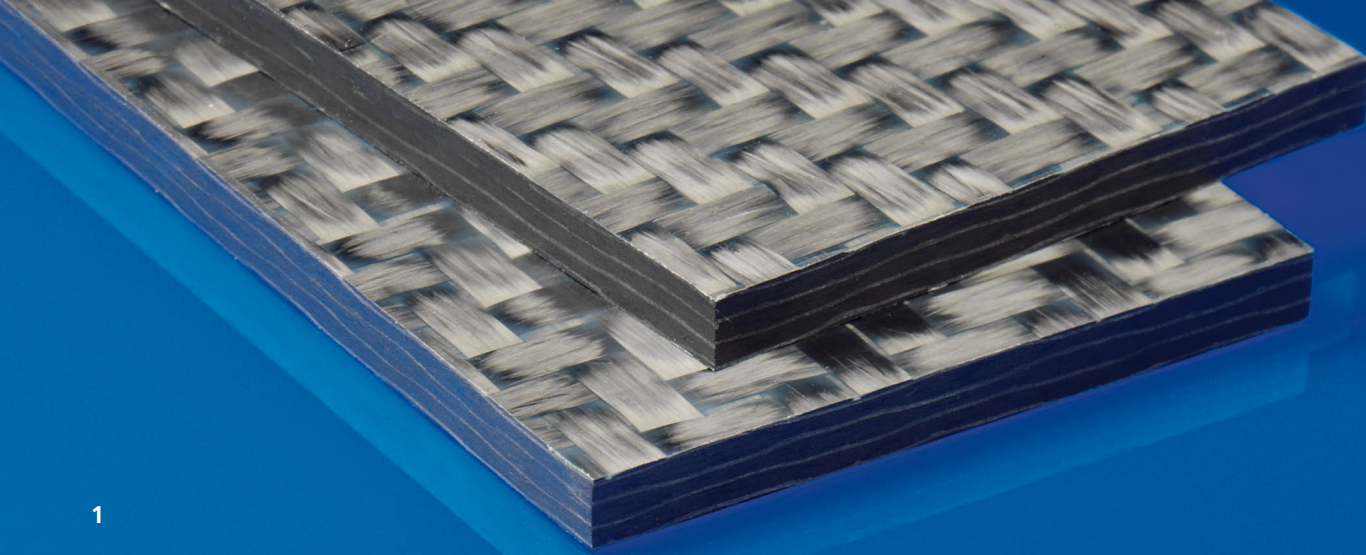
Der Arbeitsbereich Oberflächen gliedert sich in die Gebiete Plasmatechnik, Lacktechnik sowie Adhäsions- und Grenzflächenforschung. Maßgeschneiderte Oberflächenmodifizierungen – wie Oberflächenvorbehandlungen und funktionelle Beschichtungen – erweitern das industrielle Einsatzspektrum vieler Werkstoffe deutlich oder machen deren technische Verwendung überhaupt erst möglich. Die Adhäsions- und Grenzflächenforschung arbeitet u. a. an der Früherkennung von Degradationserscheinungen, der Validierung von Alterungsprüfungen und der prozessintegrierten Oberflächenkontrolle.

Mit der Abteilung Automatisierung und Produktionstechnik baut das Fraunhofer IFAM seine Aktivitäten hinsichtlich CFK-Großstrukturen zukunftsweisend aus – Fügen, Montieren, Bearbeiten, Reparieren und zerstörungsfreies Prüfen von CFK-Großstrukturen im 1:1-Maßstab. Dadurch wird auf dem Arbeitsgebiet CFK-Technologie die Lücke zwischen Labor- bzw. Technikumsmaßstab und industrieller Anwendung geschlossen.

Der gesamte Institutsbereich Klebtechnik und Oberflächen ist nach DIN EN ISO 9001 zertifiziert. Die Prüflaboratorien Werkstoffprüfung, Korrosionsprüfung und Lacktechnik sind zusätzlich nach DIN EN ISO/IEC 17025 akkreditiert. Das Klebtechnische Zentrum ist über DVS-PersZert® nach DIN EN ISO/IEC 17024 als akkreditierte Personalqualifizierungsstelle für die klebtechnische Weiterbildung international anerkannt. Das Kunststoff-Kompetenzzentrum ist – wie das Klebtechnische Zentrum – nach AZAV zertifiziert und erfüllt die Qualitätsanforderungen der DIN EN ISO/IEC 17024. Die »Anerkannte Stelle« für das Kleben von Schienenfahrzeugen und -fahrzeugteilen ist nach DIN 6701-2 und in Anlehnung an DIN EN ISO/IEC 17021 durch das Eisenbahn-Bundesamt akkreditiert.

www.ifam.fraunhofer.de

© Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik
und Angewandte Materialforschung
– Klebtechnik und Oberflächen –



FRAUNHOFER IFAM – ALLE FVK-KOMPETENZEN UNTER EINEM DACH

Es sind einzigartige Werkstoffe, die von der Industrie gerne verarbeitet werden: Faserverbundwerkstoffe. In der Regel werden dabei Fasern aus Kohlenstoff, Glas oder anderen Materialien in eine Harzmatrix eingebettet. Der Vorteil: Je nach Anforderungsprofil können die Fasern in mehreren Lagen mit unterschiedlicher Ausrichtung übereinandergelegt werden. Nach dem Aushärten ist ein Laminat oder ein Bauteil entstanden, das bei geringem Gewicht eine enorm hohe Zugfestigkeit aufweist. Leicht, hochstabil und auf die jeweilige Anwendung anpassbar: Faserverbundkunststoffe (FVK) sind Produkte, die sich trotz vergleichsweise komplexer Herstellung großer Beliebtheit erfreuen – die zahlreichen Vorzüge rechtfertigen den Aufwand.

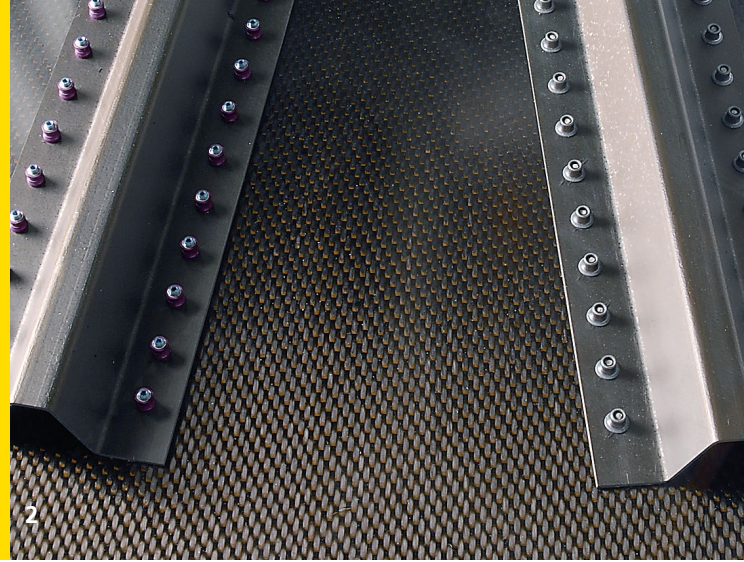
Wichtig zu wissen ist dabei, dass Faserverbundkunststoffe ohne die Klebtechnik gar nicht denkbar sind. Von der molekularen Ebene bis hin zum Zusammenfügen großer FVK-Bauteile im industriellen Alltag hat sich das Fraunhofer IFAM deshalb über mehrere Jahrzehnte auf diesem Gebiet eine umfassende Kompetenz angeeignet. Viele Entwicklungsschritte der hochmodernen Technologie hat das Institut aktiv begleitet.

Die mit Kohlenstofffasern verstärkten Kunststoffe (CFK; Abb. 1) haben sich ebenso wie die durch Glasfasern verstärkten Kunststoffe (GFK) in der Industrie etabliert. Die Anwendungen sind ungemein vielfältig und reichen von Padelbooten, die aus harzgetränkten Glasfasermatten geformt werden, bis hin zu den aus CFK gefertigten Flügelstrukturen bei neueren Airbus-Großraumflugzeugen. Weitere plakative Anwendungen sind oftmals Entwicklungen für den Hochleistungssport oder Hochtechnologiebereiche: Tennisschläger, Rennradrahmen oder Ski aus CFK sind ebenso beispielhaft wie Glasfaseranwendungen im Schiffbau und bei Windenergieanlagen. Im Luftfahrtbereich spielt zusätzlich auch noch

glasfaserverstärktes Aluminium – kurz GLARE – eine Rolle: Schichten, die abwechselnd aus Aluminium und Glasfaserschichten zusammenlaminiert sind.

Die Fachgebiete des Institutsteils Klebtechnik und Oberflächen des Fraunhofer IFAM sind in Fragestellungen eingebunden, die bei der Herstellung und Anwendung von Faserverbundkunststoffen eine Rolle spielen. Dabei sind die Übergänge nicht selten fließend: Die enge Zusammenarbeit der einzelnen Arbeitsgruppen garantiert eine umfassende, ganzheitliche Bearbeitung der gestellten Aufgaben und ihre Beurteilung aus unterschiedlichen Blickwinkeln.

1 Carbonfaserverstärkter Kunststoff (CFK).



Berechnung, Auslegung, Herstellung, Prüfung und Fügen von FVK

Im Bereich Werkstoffe und Bauweisen stehen sowohl Berechnung und Auslegung von FVK-Werkstoffen als auch ihre Herstellung und mechanische Prüfung sowie Fragen des Klebens und Nietens dieser Materialien im Fokus. Bei der Herstellung von FVK-Laminatplatten bis zu zwei Quadratmetern Größe kommen vorrangig Harzinfusions- oder Prepregverfahren zum Einsatz. Dabei werden entweder trockene Fasermatten in eine Form eingelegt und im weiteren Prozessverlauf mit Harzen getränkt oder – beim Prepregverfahren – bereits getränkte Matten auf Formen aufgelegt und dann in einem speziellen Behälter mit Druck und Hitze ausgehärtet. Gerade das letztgenannte Verfahren erfordert ein umfassendes Know-how, ermöglicht aber auch qualitativ besonders hochwertige Ergebnisse, wie sie beispielsweise für die Luftfahrtindustrie notwendig sind.

Ebenso wichtig ist die langjährige Erfahrung bei der Prüfung von Faserverbundwerkstoffen. Ob das Einsatzgebiet die Flugzeugbranche, der Jachtbau oder Windenenergiesektor ist: Von statischen oder schwingenden Beanspruchungen bis hin zum Crashtest sind die Experten des Fraunhofer IFAM in der Lage, die Belastbarkeit und das Ermüdungsverhalten von FVK-Werkstoffen sicher zu bestimmen. Bei der Berechnung und Auslegung der Bauteile kommt es ebenso auf Erfahrungswissen an. Denn Faserverbundkunststoffe können mit völlig unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften hergestellt werden – der Lagenaufbau und die Harzeigenschaften lassen sich ideal auf die spätere Verwendung abstimmen.

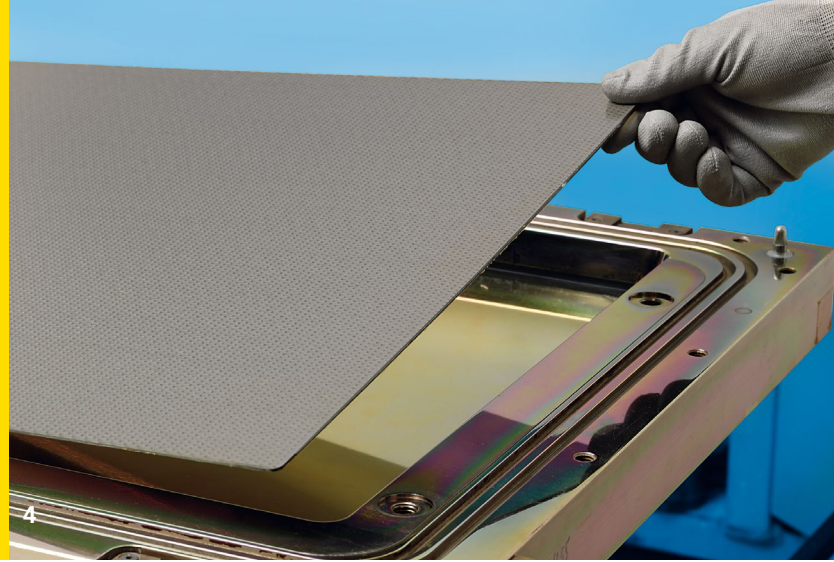
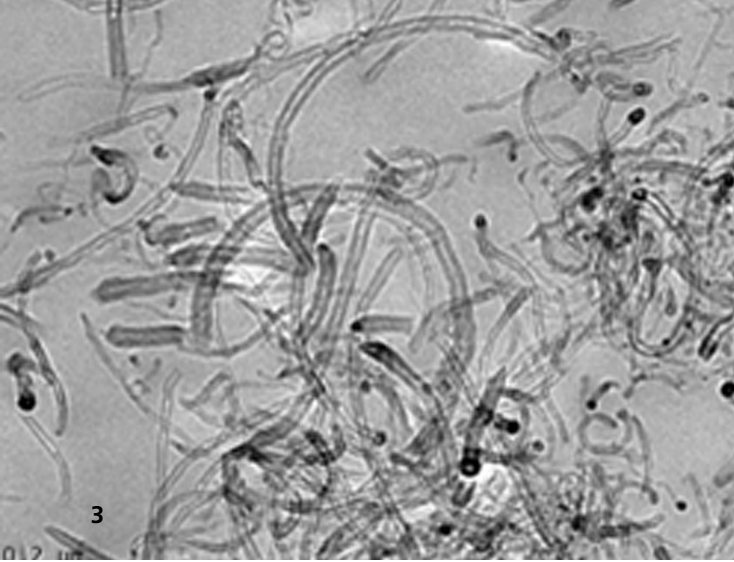
Schließlich bearbeiten die Spezialisten von Werkstoffe und Bauweisen auch Fragen der weiteren Verarbeitung von FVK-Bauteilen. Diese können geklebt werden, was dünnwandige, leichte Strukturen sowie eine flächige Lasteinleitung erlaubt – ideal für die zunehmend nachgefragten Leichtbauweisen.

Ebenso ist aber auch die Mischbauweise von FVK und anderen Werkstoffen möglich. Vor allem im Flugzeugbau, in dem vorrangig CFK-Werkstoffe zum Einsatz kommen, werden diese in strukturellen Bereichen oft noch genietet. Das Nieten von CFK und das Hybridfügen – also die Integration von Klebtechnik und Nieten – gehören zu Forschungs- und Entwicklungsbereichen, in denen das Fraunhofer IFAM wertvolles Wissen aufgebaut hat (Abb. 2).

Fasern und Harz: Die Chemie muss stimmen

Voraussetzung für eine optimale Fertigung und den erfolgreichen Einsatz von Faserverbundwerkstoffen ist die genaue Kenntnis der Beziehungen zwischen Fasern und Harzen samt ihrer jeweiligen Eigenarten. Je nachdem, wie der fertige CFK- oder GFK-Werkstoff zusammengesetzt ist, unterscheidet er sich beispielsweise in Gewicht und Festigkeit. Der Bereich Klebstoffe und Polymerchemie beschäftigt sich intensiv mit den Matrixharzen, der optimalen Anbindung der Fasern an die Matrix sowie der Modifizierung der Harze, um das Eigenschaftsprofil zu optimieren.

Als Matrixharze werden Duromere oder Thermoplaste eingesetzt, wobei beim Fraunhofer IFAM der Fokus auf den Duromeren liegt. Sie weisen nach der Härtung oft eine gewisse Sprödigkeit auf, die eine der Hauptursachen für Schäden an FVK ist. Zwar lässt sich mit verschiedenen Zusatzstoffen die Zähigkeit der Materialien verbessern; allerdings senken diese oft die Festigkeit. Es wird intensiv daran gearbeitet, Wege aufzuzeigen, um die heute bestehenden Grenzen zu überwinden. Weitere wichtige Punkte, die es bei der Produktion von FVK zu optimieren gilt, sind die rheologischen Eigenschaften der Harze und die Härtungsbedingungen.



Bei den eingesetzten Zusatzstoffen liegt ein besonderes Augenmerk auf modifizierten Nanopartikeln. Positive Erfahrungen mit diesen Partikeln wurden bereits im Bereich der Klebstoffe gemacht. Als Material kommt vor allem unterschiedlich vorbehandeltes Siliziumdioxid zum Einsatz, aber auch elastische Nanopartikel, Aluminiumoxid oder Kohlenstoffnanoröhrchen (»Carbon Nanotubes«, kurz CNT; Abb. 3).

Keine FVK-Oberfläche ohne Vorbehandlung

Eine wesentliche Bedeutung kommt bei FVK-Werkstoffen auch der Oberflächenvorbehandlung zu – eine Aufgabe, der sich die Experten von Plasmatechnik und Oberflächen (PLATO) widmen. Die Vorbehandlung beginnt schon bei den einzelnen Kohlenstofffasern, die durch gezielte Oxidationsprozesse bei der industriellen Herstellung bereits beeinflusst werden können. Anschließend lassen sich die Oberflächen dieser Fasern je nach Anwendungsfall noch weiter modifizieren, etwa durch Plasmavorbehandlung oder nasschemische Prozesse. Zusammen mit der zuvor beschriebenen Optimierung der Matrixharze schafft das Fraunhofer IFAM so die Voraussetzungen für FVK-Produkte mit den bestmöglichen Eigenschaften.

Bei der Herstellung der FVK-Bauteile oder -Lamine in Formen wirkt das Matrixharz in der Regel wie ein Klebstoff. Deshalb sind dünne Trennschichten notwendig, beispielsweise aus Wachs oder Silikon, damit die gefertigten FVK-Teile wieder aus den Formen gelöst werden können. Ein Problem sind jedoch zurückbleibende Trennmittelrückstände auf den Bauteilen, die ein sicheres Kleben und/oder Lackieren verhindern und deshalb zunächst entfernt werden müssen. PLATO hat für die Reinigung neuartige Oberflächenvorbehandlungsverfahren entwickelt. Dazu zählen abtragende Techniken wie das CO₂-Schneestrahlen oder das Vakuum-Saugstrahlen. Ergänzend dazu werden die Oberflächen durch Plasmabehandlung oder mit energiereicher Strahlung aus dem vakuum-ultravioletten

Spektralbereich (VUV) aktiviert, was auf molekularer Ebene eine bessere Anbindung von Klebstoffen oder Lacken ermöglicht.

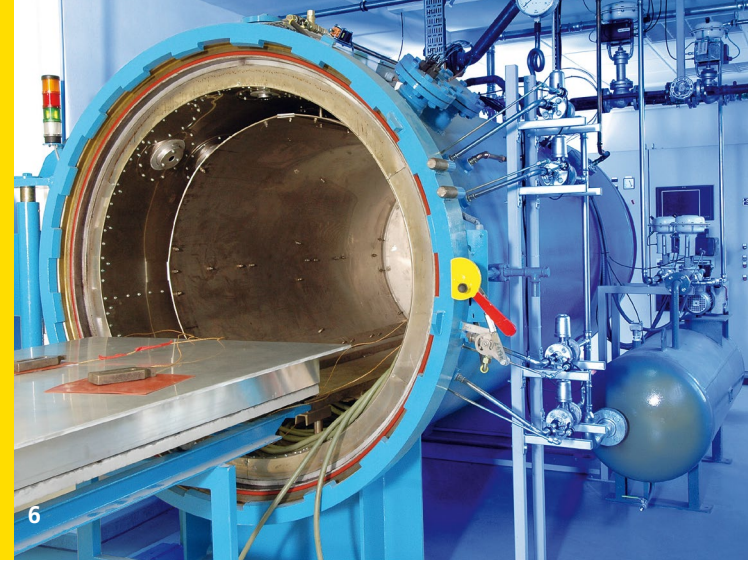
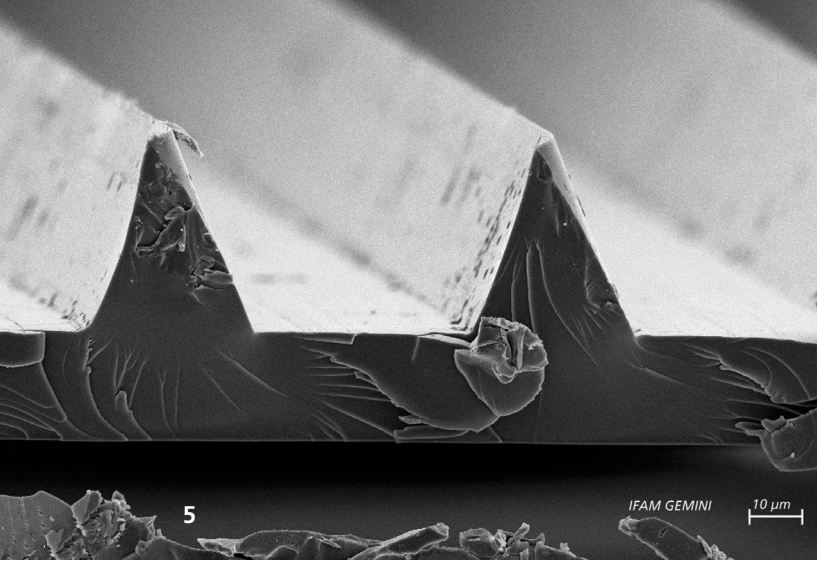
Eine alternative Technik zur Entformung der CFK-Bauteile ist die Beschichtung der Formen mit einer permanent wirkenden Trennschicht. Hier wird im Gegensatz zu herkömmlichen Trennmitteln das Formwerkzeug mit einer von PLATO entwickelten plasmapolymerten Trennschicht versehen, die auch nach vielen Entformungszyklen sehr gute Trennwirkung zeigt. Zudem weisen die CFK-Bauteile nach Entformung keine Kontaminationen auf, sind also »ready-to-paint« bzw. »ready-to-bond«. Abbildung 4 zeigt ein plasmapolymere beschichtetes Formwerkzeug bei Entnahme eines CFK-Bauteils.

Auch in anderen Bereichen der Herstellung und Verarbeitung von FVK-Werkstoffen kommt es auf die Expertise von Plasmatechnik und Oberflächen an. Das gilt beispielsweise für das Plasmaätzen: Um die Unversehrtheit von Kohlenstofffaserkomponenten während des Alltagseinsatzes – z. B. als Flugzeugbauteil – überprüfen zu können, sollen zukünftig Glasfasern als Sensoren in die CFK-Bauteile eingebracht werden, um so den Zustand der Bauteile während des Betriebs anzuzeigen (structural health monitoring; SHM). Beim Zusammenfügen derartiger CFK-Komponenten müssen auch die einzelnen Glasfasern miteinander verbunden werden. Dazu ist es erforderlich, sie möglichst schonend freizulegen – dies ist durch Plasmaverfahren bei Atmosphärendruck möglich.

Ein weiteres Thema für PLATO ist der Korrosionsschutz beim Verbund von Faserverbundwerkstoffen mit anderen Leichtbaumaterialien, etwa Aluminium. Weil es durch die sogenannte Kontaktkorrosion dabei oft zu Schäden kommt, werden im Bereich der Nähte korrosionsverhindernde plasmapolymere Schichten aufgetragen.

3 *Klebstoff mit eindispersierten Kohlenstoffnanoröhrchen (CNT).*

4 *Permanente Trennschicht zur Entformung in der Fertigung von CFK.*



Lackieren und Funktionalisieren von FVK

Die Oberfläche ist auch für die Arbeit der Spezialisten der Lacktechnik der entscheidende Ausgangspunkt. Sie suchen intensiv nach Möglichkeiten, um unerwünschte Oberflächenfehler messen und abstellen zu können. Dazu beschäftigen sie sich mit verschiedenen Fehlerquellen. Insbesondere hochwertige CFK-Bauteile erfordern fehlerfreie Oberflächen. Doch das hergestellte Bauteil kann nur so gut wie seine Form sein. Weist die Form als »Negativ« Fehler auf, finden sich diese auch auf der Oberfläche des Bauteils – dem »Positiv« – wieder. Dadurch entstehen beispielsweise sogenannte Lunker: Poren, die anschließend extra verspachtelt werden müssen und deshalb wieder eine zusätzliche Oberflächenvorbereitung mit Reinigen, Schleifen und Aktivieren nötig machen.

Falls sich Harz und Fasern durch Temperatur- und Feuchtigkeitsschwankungen unterschiedlich ausdehnen, können Faserstrukturen – selbst nach der Lackierung – an der Oberfläche sichtbar werden. Damit dennoch eine akzeptable Lackoberfläche erzeugt werden kann, beschäftigt sich das Fraunhofer IFAM auch mit solchen Fragestellungen.

Vorteilhaft für die Produktion ist es, wenn ein Bauteil schon lackiert aus der Form genommen werden kann. Das Fraunhofer IFAM arbeitet deshalb an der Entwicklung spezieller Lacke, die direkt in der Form verarbeitet werden können. Das kann beispielsweise durch eine Trennfolie geschehen, in die eine oder mehrere Lackschichten integriert sind. Vor der Herstellung des Bauteils werden die speziellen Folien in die Form tiefgezogen. In interdisziplinärer Kooperation mit PLATO verbessern die Lackexperten diese »In-Mould-Lacke« weiter und optimieren sie für die Anwendung.

Für die Lackierung von Bauteilen aus Kohlenstofffaserwerkstoffen hat die Lacktechnik des Fraunhofer IFAM ein umfassendes Wissen aufgebaut. Es umfasst die Qualifizierung von Lacksystemen ebenso wie von Reinigungs-, Vorbehandlungs-

und Lackierverfahren. Die Qualität der Oberfläche kann hinsichtlich Farbton, Glanz, Staubeinschlüssen, Verlauf und vielem mehr gemessen und bewertet werden.

Außerdem ist die funktionelle Veredelung der Oberflächen mit Systemen wie selbstreparierendem Lack, Anti-Schmutz- und Anti-Eis-Beschichtungen, Anti-Erosions-Beschichtungen und Riblet-Strukturen (»Haifischhaut«; Abb. 5) möglich. Gerade die letztgenannte Oberflächenveredelung ist aufgrund ihrer aerodynamischen Wirkung für die Luftfahrt und die Schifffahrt von großem Interesse.

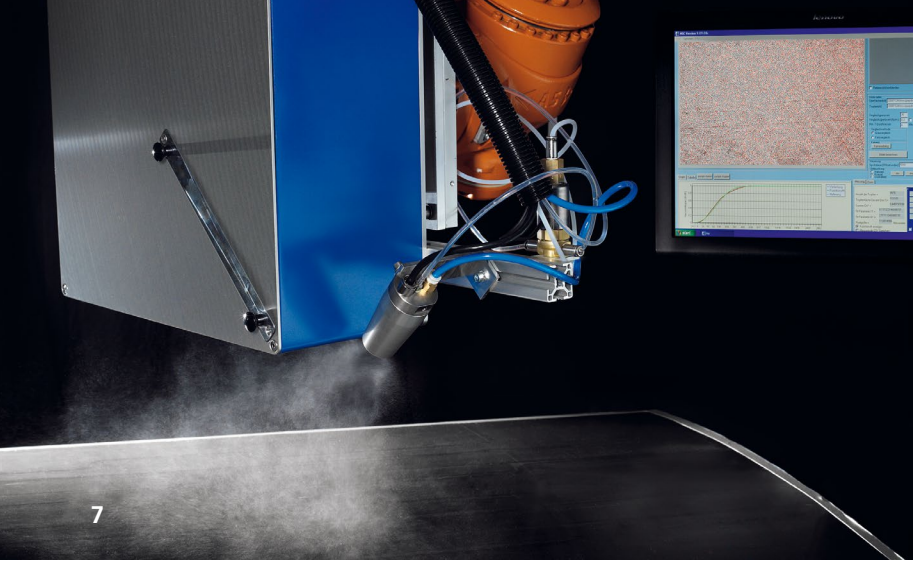
Die richtige Fügetechnik: Viel kleben, etwas nieten

Um Bauteile aus Faserverbundkunststoffen miteinander hoch belastbar und auf die jeweilige Anwendung hin bestmöglich miteinander zu verbinden, braucht es optimierte und gleichzeitig wirtschaftliche Fügeverfahren. Dies gilt sowohl für Anwendungen auf kleinstem Raum wie für Großstrukturen: Solange es beispielsweise das »Flugzeug aus einem Stück« noch nicht gibt, müssen Rumpf und Flügel, Leitwerke und Fahrwerk miteinander verbunden werden – idealerweise durch die Klebtechnik, die von jeher die Kernkompetenz des Fraunhofer IFAM darstellt.

FVK-Werkstoffe werden in der Regel nach der Aktivierung der Oberfläche mit Filmklebstoffen oder mit heiß härtenden Klebstoffen gefügt. Dabei werden die Klebvorgänge oft mithilfe eines Autoklavkessels vorgenommen, in dem die Klebverbindungen unter Druck und Hitze aushärten (Abb. 6). Eines der Probleme ist, dass die Größe der Druckkessel auch die

5 *Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer riblet-strukturierten Lackoberfläche aus dem Fraunhofer IFAM.*

6 *Autoklav zur Herstellung von Faserverbundkunststoffen.*



Größe der zu fügenden Bauteile beschränkt: Autoklave in der Größe von Flugzeugrümpfen gibt es nicht und ihre Konstruktion wäre nicht wirtschaftlich. Deshalb erforscht das Fraunhofer IFAM Klebstoffe, die für diese Zwecke bei niedrigeren Temperaturen aushärten. Ebenfalls wünschenswert ist z. B., lange Klebstoffnähte in unterschiedlicher Dicke auftragen zu können – je nach Spaltmaß zwischen den einzelnen Fügeteilen.

Mit solchen Herausforderungen beschäftigt sich u. a. die Klebtechnische Fertigung im Fraunhofer IFAM. Sie untersucht beispielsweise eingehend, wie der Klebstoff für das Fügen von FVK beschaffen sein muss, welche Fließeigenschaften er hat und bei welcher Temperatur er sich am besten verarbeiten lässt. Die Experten entwickeln auch komplette Prozessketten: Unter Berücksichtigung der jeweiligen Fertigungsumgebung und der von den Klebstoffen sowie Bauteilen vorgegebenen Rahmenbedingungen werden die notwendigen Ressourcen von Personal, Maschinen und Platz ermittelt.

Darüber hinaus steht auch die Applikation, also das Aufbringen des Klebstoffs, im Fokus. Dabei werden die Forderungen nach einem Toleranzausgleich unterschiedlicher Spaltmaße einerseits und möglichst geringer Überdosierung andererseits durch ein neu entwickeltes System erfüllt. Die Bauteile und ihre Konturen werden mit einem Laserscanner erfasst und nach einer Datentransformation im PC virtuell montiert. Dabei wird das – variierende – Spaltmaß orts aufgelöst ermittelt. Durch die Kombination dieser Informationen mit dem Bahnprogramm des Roboters wird der Klebstoff anschließend bedarfsgerecht appliziert.

Eine besondere Herausforderung beim Fügen der Faserverbundkunststoffe ist das Nieten dieser Materialien. Das ist vorrangig im Luftfahrtbereich gängige Praxis: Wenn heute Flügel und Rumpf eines Flugzeugs verbunden werden, vertrauen Flugzeugbauer noch nicht allein auf das Kleben, sondern fordern immer auch Nietverbindungen. Hier sind vor allem die Auswahl der richtigen Niettypen und das Bohren der Nietlöcher Gebiete, mit denen sich das Fraunhofer IFAM stark

beschäftigt. Eine der Aufgaben ist, die Beeinträchtigung der besonderen FVK-Materialeigenschaften durch die Materialverletzung so gering wie möglich zu halten. Auch das sogenannte Hybridfügen – die Kombination von Kleb- und Niettechnik – vernetzt diverse Kompetenzen des Fraunhofer IFAM in besonders vorteilhafter Weise.

Know-how für Material- und Verfahrensoptimierung: Adhäsions- und Grenzflächenforschung

Gerade die Luftfahrt stellt besondere Herausforderungen an die Klebtechnik, wenn es um das strukturelle Kleben tragender Teile geht. Aus Sicherheitsgründen muss gewährleistet sein, dass die Klebverbindung auch hält, es also nicht zu einem plötzlichen Versagen von Klebnähten kommt. Dazu lässt sich die Klebung mit zerstörungsfreien Prüfmethoden untersuchen. Dabei stößt man oft auf das Problem von »Kissing Bonds«: scheinbar einwandfreie Klebverbindungen mit stoffschlüssiger Verbindung, die dennoch keine ausreichende Klebkraft entwickeln. Grund dafür ist eine nur schwache Verbindung und mangelhafte Wechselwirkung des Klebstoffs mit den Fügeteilen auf molekularer Ebene.

Ein anderer Weg zum Nachweis der Fertigungssicherheit ist die Prozesskontrolle. Der eigentliche Klebvorgang bzw. Fügeprozess wird intensiv überprüft: Stimmt die Qualität der Oberflächenvorbehandlung? Ist der richtige Klebstoff in der richtigen Menge an der richtigen Stelle appliziert worden? Stimmt der Anpressdruck? Sind die optimalen Umgebungsvariablen wie Temperatur und Luftdruck eingehalten worden?

- 7 *Untersuchung der Benetzungseigenschaften von Oberflächen mithilfe der im Fraunhofer IFAM entwickelten Aerosol-Benetzungsprüfung.*
- 8 *Laserscanningmikroskopaufnahme von Kohlenstofffasern an der Oberfläche eines im Resin-Transfer-Molding-Verfahren (RTM) hergestellten CFK-Bauteils.*

Diese Kontrolle lässt sich besonders gut auch in den Produktionsprozess integrieren und ist eine der Aufgaben, mit denen sich die Adhäsions- und Grenzflächenforschung des Fraunhofer IFAM befasst. Nach der Oberflächenvorbereitung und vor dem Klebstoffauftrag wird ermittelt, ob die Oberfläche in einem optimalen klebfähigen Zustand ist (Abb. 7).

Die Oberflächencharakterisierung – also das Ermitteln von Oberflächenchemie sowie der Makro- und Mikrostrukturen – spielt eine wichtige Rolle, wenn es um die Haftung von Klebstoffen und Lacken geht. Vor der Oberflächenvorbereitung ist es daher von Bedeutung, grundlegende Informationen über die mikroskopisch dünne Grenzschicht zu erhalten, in der sich der eigentliche adhäsive Vorgang bei der Anbindung von Klebstoff oder Lack abspielt (Abb. 8).

Mithilfe der Adhäsions- und Grenzflächenforschung lassen

sich Oberflächenvorbereitungen untersuchen und bewerten – etwa der Einsatz von Trennmitteln, das Maß der Verunreinigung und die Auswirkungen von Trennmittelresten auf die Haftfestigkeit der Klebverbindungen. Im mikro- bzw. submikroskopischen Bereich spielen sich auch die Untersuchungen der für das mechanische Verhalten von CFK-Materialien wichtigen adhäsiven Wechselwirkungen zwischen Kohlenstofffasern und Matrixharzen ab. Für diese Untersuchungen werden sowohl moderne analytische Verfahren als auch computergestützte Simulationen verwendet.

Zudem stellen die Bewertung und die Optimierung von Konzepten zur Vermeidung galvanischer Korrosion bei der Verbindung von CFK mit Leichtmetallen samt der notwendigen langzeitbeständigen elektrischen Isolation der Materialien ein weiteres und speziell für den Flugzeugbau wichtiges Aufgabengebiet der Adhäsions- und Grenzflächenforschung dar.

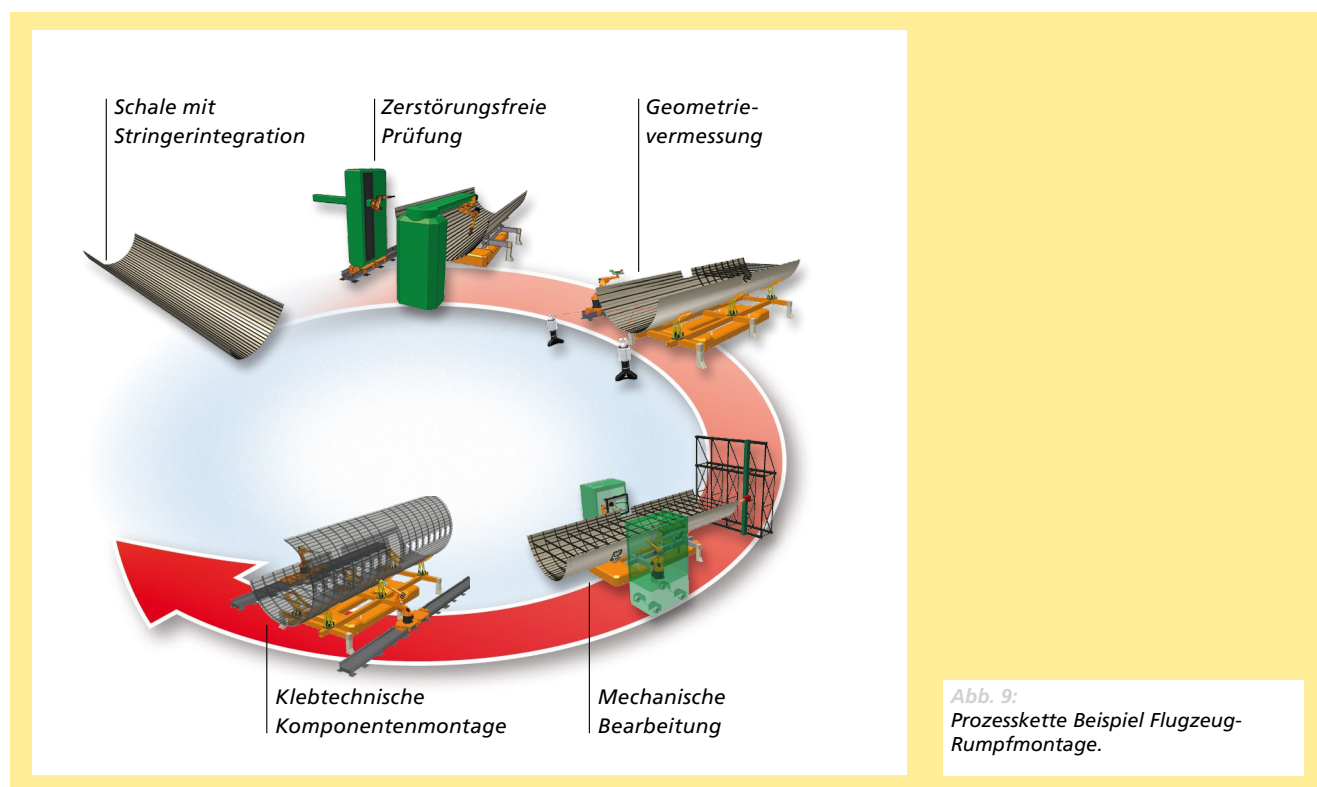


Abb. 9: Prozesskette Beispiel Flugzeug-Rumpfmontage.



10

Fügen und Montieren – Vom Labor in den 1:1-Maßstab

Alle bis hier genannten Kompetenzen des Fraunhofer IFAM auf den verschiedenen Ebenen der Herstellung und Anwendung von Faserverbundkunststoffen sind auch bei der Fertigung von Großstrukturen, wie z. B. für den Flugzeugbau, von hoher Bedeutung. Dieses Gebiet erschließt sich das Fraunhofer IFAM über die Abteilung Automatisierung und Produktionstechnik im Großforschungszentrum CFK NORD in Stade.

Für Kunden aus verschiedenen Branchen wie der Luftfahrt, der Windenergie, dem Automobil- und Nutzfahrzeugbau entwickeln die Wissenschaftler der Automatisierung und Produktionstechnik auf 4000 m² Hallenfläche Montageanlagen und -verfahren bis in den 1:1-Maßstab.

Neben dem Fügeverfahren Kleben, welches auch mit dem Nieten kombiniert werden kann, liegt der Fokus auf der hochpräzisen Bearbeitung (Bohren, Senken, Kanten- und Flächenfräsen) von Großstrukturen. Ein wichtiges Instrument dabei ist die Fehlervermeidung durch Monitoring sensibler Prozessparameter.

Wesentliche Ziele sind die Kostensenkung und Effizienzsteigerung von Anlagen und Prozessen durch Automatisierung und den Einsatz mobiler, hochgenau steuerbarer Bearbeitungsmodule, die weitgehende Produktflexibilität erlauben und kein Schwerlastfundament benötigen (Abb. 9).

Personalqualifizierung – Eine wichtige Voraussetzung

Keine Innovation schafft jedoch den Durchbruch und schöpft alle Vorteile einer neuen Technologie aus, wenn sie falsch angewendet wird. Deshalb kommt der Aus- und Weiterbildung von Menschen, die mit Faserverbundwerkstoffen arbeiten und sie nutzen, eine überaus große Bedeutung zu. Das Fraunhofer IFAM hat diese wichtige Grundlage schon 1994 im Zusammenhang mit der boomenden Klebtechnik erkannt. Heute ist das Klebtechnische Zentrum des Instituts die führende Weiterbildungseinrichtung im Bereich der Klebtechnik.

Weil das Verarbeiten und Fügen von Faserverbundkunststoffen vom Kleben nicht zu trennen ist und dennoch einige Besonderheiten aufweist, hat das Fraunhofer IFAM das Kunststoff-Kompetenzzentrum ins Leben gerufen. Dort werden die Weiterbildungen zur Faserverbundkunststoff-Verarbeiter/in, Faserverbundkunststoff-Fachkraft bzw. zum Faserverbundkunststoff-Instandsetzer/in durchgeführt (Abb. 10). Die Qualifizierung im Umgang mit FVK ist vor allem für den Bereich der kunststoffverarbeitenden Industrie von zunehmender Bedeutung: Windenergieanlagenbau, Schiffbau, Automobil- sowie Luft- und Raumfahrtindustrie brauchen gut ausgebildete Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter.

10 Personalqualifizierung zum FVK-Verarbeiter/in im Kunststoff-Kompetenzzentrum.

KOMPETENZNETZWERK KLEBTECHNIK UND OBERFLÄCHEN

www.ifam.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM

Klebtechnik und Oberflächen

Institutsleiter

Prof. Dr. Bernd Mayer

Telefon +49 421 2246-419

bernd.mayer@ifam.fraunhofer.de

Klebtechnische Fertigung

Dipl.-Ing. Manfred Peschka MBA

Telefon +49 421 2246-524

manfred.peschka@ifam.fraunhofer.de

Fertigungsplanung; Dosier- und Auftragstechnik; Automatisierung; Hybridfügen; Fertigung von Prototypen; Auswahl, Charakterisierung, Qualifizierung von Kleb-, Dicht- und Beschichtungsstoffen; Schadensanalyse; elektrisch/optisch leitfähige Kontaktierungen; adaptive Mikrosysteme; Dosieren kleinster Mengen; Eigenschaften von Polymeren in dünnen Schichten; Fertigungskonzepte.

- Mikrosystem- und Medizintechnik
- Klebstoffe und Analytik
- Prozessentwicklung und Simulation
- Applikationsverfahren

Plasmatechnik und Oberflächen – PLATO –

Dr. Ralph Wilken

Telefon +49 421 2246-448

ralph.wilken@ifam.fraunhofer.de

Oberflächenmodifizierung (Reinigung, Aktivierung für z. B. Kleben, Bedrucken, Lackieren) und Funktionsschichten (z. B. Haftvermittlung, Korrosionsschutz, Kratzschutz, antimikrobielle Wirkung, Easy-to-clean, Trennschicht, Permeationsbarriere) für 3-D-Teile, Schüttgut, Bahnware; Anlagenkonzepte und Pilotanlagenbau.

- Niederdruck-Plasmatechnik
- Atmosphärendruck-Plasmatechnik
- Anlagentechnik/Anlagenbau

Klebstoffe und Polymerchemie

Prof. Dr. Andreas Hartwig

Telefon +49 421 2246-470

andreas.hartwig@ifam.fraunhofer.de

Entwicklung und Charakterisierung von Polymeren; Nanokomposite; Formulierung von Klebstoffen, Matrixharzen und Funktionspolymeren; vorbeschichtbare Klebstoffe; Leitklebstoffe; Verbesserung der Langzeitbeständigkeit; Kleben ohne Vorbehandlung (Polyolefine, Leichtmetalle, beölte Bleche mit 2K, thermoplastische Composite); Photohärtung; Härtung bei niedriger Temperatur, aber langer offener Zeit; Curing on Demand, Schnellhärtung; Haftklebstoffe; Vergussmassen; Auswahl und Qualifikation von Klebstoffen; Versagensanalyse; Klebstoffe auf Basis natürlicher Rohstoffe; Peptid-Polymer-Hybride; Kleben in der Medizin; biofunktionalisierte und biofunktionale Oberflächen.

- Klebstoffformulierung
- Verbundwerkstoffe
- Bioinspirierte Materialien

Lacktechnik

Dr. Volkmar Stenzel

Telefon +49 421 2246-407

volkmar.stenzel@ifam.fraunhofer.de

Entwicklung von Funktionsbeschichtungen, z. B. Anti-Eis-Lacke, Anti-Fouling-Systeme, schmutzabweisende Systeme, selbstheilende Schutzbeschichtungen, strömungsgünstige Beschichtungen; Rezepturoptimierung; Rohstoffuntersuchung; Entwicklung von Richtrezepturen; Charakterisierung und Qualifizierung von Lacksystemen sowie Rohstoffen; Produktfreigaben; Farbmanagement; Optimierung von Beschichtungsanlagen; Qualifizierung von Beschichtungsanlagen (Vorbehandlung, Applikation, Trocknung); Schadensuntersuchungen; anwendungsbezogene Methodenentwicklung; akkreditiertes Prüflabor Lacktechnik.

- Entwicklung von Beschichtungsstoffen und Funktionsbeschichtungen
- Anwendungs- und Verfahrenstechnik

Adhäsions- und Grenzflächenforschung

Dr. Stefan Dieckhoff

Telefon +49 421 2246-469

stefan.dieckhoff@ifam.fraunhofer.de

Oberflächen-, Grenzflächen-, Schichtanalytik; Untersuchung von Adhäsions-, Trenn- und Degradationsmechanismen; Analyse reaktiver Wechselwirkungen an Werkstoffoberflächen; Schadensanalyse; Qualitätssicherung durch fertigungsintegrierte Analysen von Bauteiloberflächen; entsprechende Konzeptentwicklung



für klebtechnische, lacktechnische und oberflächentechnische Anwendungen; Korrosion an metallischen Werkstoffen, unter Beschichtungen und in Klebverbindungen; Untersuchung von Anodisierungsschichten; elektrolytische Metallabscheidung; akkreditiertes Korrosionsprüflabor; Modellierung molekularer Mechanismen bei Adhäsions- und Degradationsphänomenen; Strukturbildung an Grenzflächen; Anreicherungs- und Transportprozesse in Klebstoffen und Beschichtungen.

- Oberflächen- und Nanostrukturanalytik
- Applied Computational Chemistry
- Elektrochemie/Korrosionsschutz
- Qualitätssicherung Oberfläche

Werkstoffe und Bauweisen

Dr. Markus Brede

Telefon +49 421 2246-476

markus.brede@ifam.fraunhofer.de

Werkstoff- und Bauteilprüfung; Crash- und Ermüdungsverhalten von Niet- und Klebverbindungen; Faserverbundbauteile; Leicht- und Mischbauweisen; Auslegung und Dimensionierung von Klebverbindungen; Qualifizierung von mechanischen Verbindungselementen; Optimierung mechanischer Fügeprozesse; Auslegung und Dimensionierung von Nietverbindungen; akkreditiertes Prüflabor Werkstoffprüfung.

- Strukturberechnung und numerische Simulation
- Mechanische Fügeotechnik

Weiterbildung und Technologietransfer

Prof. Dr. Andreas Groß

Telefon +49 421 2246-437

andreas.gross@ifam.fraunhofer.de

www.kleben-in-bremen.de

www.kunststoff-in-bremen.de

Qualifizierung zum European Adhesive Bonder, EAB (Klebpraktiker/-in), European Adhesive Specialist, EAS (Klebfachkraft) und European Adhesive Engineer, EAE (Klebfachingenieur/-in) mit europaweit anerkannten DVS®/EWF-Zeugnissen; Inhouse-Lehrgänge; Beratung; Fertigungsqualifizierung; Studien; Arbeits- und Umweltschutz; Weiterbildung zur/zum Faserverbundkunststoff-Verarbeiter/in, Faserverbundkunststoff-Fachkraft und zur/zum Faserverbundkunststoff-Instandsetzer/in.

- Klebtechnisches Zentrum
- Kunststoff-Kompetenzzentrum

Automatisierung und Produktionstechnik

Dr. Dirk Niermann

Forschungszentrum CFK NORD

Ottenbecker Damm 12

21684 Stade

Telefon +49 4141 78707-101

dirk.niermann@ifam.fraunhofer.de

Automatisierte Montage von Faserverbundkunststoff-(FVK-)Großstrukturen bis in den 1:1-Maßstab: Kleben, Kombinationen aus Kleben und Nieten; adaptive Präzisionsbearbeitung; automatisierte Mess- und Positionierverfahren; Form- und Lagekorrektur von biegeschlaffen Großstrukturen im Montageprozess.

- Fügetechnologien
- Präzisionsbearbeitung
- Montage- und Anlagentechnik
- Messtechnik und Robotik

Business Development

Prof. Dr. Bernd Mayer

Telefon +49 421 2246-419

bernd.mayer@ifam.fraunhofer.de

Anerkannte Stelle des Eisenbahn-Bundesamtes nach DIN 6701

Dipl.-Ing. (FH) Frank Stein

Telefon +49 421 2246-655

frank.stein@ifam.fraunhofer.de

Beratung; Prüfung und Zulassung von Schienenfahrzeugbaubetrieben und ihrer Zulieferer hinsichtlich ihrer Fähigkeit, Klebarbeiten gemäß den Vorgaben der DIN 6701 ausführen zu können.

Prozessreviews

Dipl.-Ing. Manfred Peschka MBA

Telefon +49 421 2246-524

manfred.peschka@ifam.fraunhofer.de

Analyse von Entwicklungs- und/oder Fertigungsprozessen unter klebtechnischen Aspekten und unter Berücksichtigung der Richtlinie DVS® 3310; Prozess- und Schnittstellen; Design; Produkt; Nachweis der Gebrauchssicherheit; Dokumente; Fertigungsumgebung.

**Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik
und Angewandte Materialforschung IFAM
– Klebtechnik und Oberflächen –**

Wiener Straße 12
28359 Bremen

Telefon +49 421 2246-400
Fax +49 421 2246-430
info@ifam.fraunhofer.de

Institutsleiter

Prof. Dr. Bernd Mayer

www.ifam.fraunhofer.de

Weitere Informationen zu den Bereichen

- |** Klebtechnik
- |** Oberflächen