

Hochbelastbar und komplex

Analyse der Scherfestigkeit von duroplastisch hinterspritzten FVK-Bauteilen

Bei thermoplastischen Faserverbundkunststoffen (Organoblechen) lassen sich die Leichtbaueigenschaften endlosfaserverstärkter Kunststoffe mit der Bauteilkomplexität des Spritzgießens mittels integriertem Umformen und Hinterspritzen kombinieren. Der Einsatz duroplastischer Formmassen ermöglicht es nun erstmals, einen artgleichen Materialverbund mit hohen mechanischen Eigenschaften zu realisieren. Es zeigt sich, dass die Haftfestigkeit von duroplastisch hinterspritzten Bauteilen auf komplexe Weise von der Oberflächentopografie abhängt.

Im Transport- und Mobilitätssektor treiben die Forderungen nach reduzierten Schadstoffemissionen und geringerem Energieverbrauch die Entwicklung hin zu höheren Energiedichten (Downsizing) und kompakten Motorbauweisen voran. Dies erfordert immer bessere mechanische Eigenschaften und eine höhere thermische Formbeständigkeit der eingesetzten Werkstoffe sowie die Verwendung von Multimaterialsystemen. Konventionelle Werkstoffe stoßen dabei häufig an ihre Grenzen. Durch strukturellen Leichtbau in Verbindung mit der Nutzung hochfester faserverstärkter Kunststoffe (FVK) lässt sich das Gewicht deutlich reduzieren, wodurch wiederum der Energieverbrauch sinkt [1, 2].

Endlosfaserverstärkte Kunststoffe mit duroplastischer Matrix (DP-FVK) weisen innerhalb der Gruppe der FVK die höchsten Steifigkeits- und Festigkeitswerte bei gleichzeitig hoher Kriechfestigkeit und Temperaturbeständigkeit auf. Deshalb sind sie besonders für strukturelle Komponenten sowie Anwendungen im Motorraum prädestiniert [3]. Zur Fertigung von endlosfaserverstärkten DP-FVK-Bauteilen eignen sich Flüssigimprägnierverfahren, wie z. B. Vakuuminfusions- und Nasspressverfahren sowie die verschiedenen Varianten des RTM-Verfahrens (Resin Transfer Moulding). Aufgrund der eingeschränkten Preformkomplexität ist die geometrische Gestaltung und Funktionsintegration bei endlosfaserverstärkten DP-FVK-Bauteilen jedoch begrenzt, sodass diese häufig in nachgelagerten Pro-

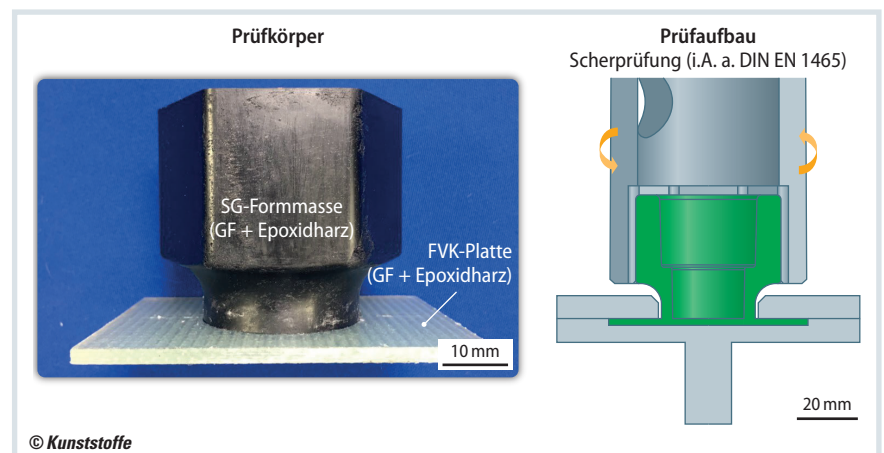


Bild 1. Sechskantprüfkörper zur Bestimmung der Scherfestigkeit eines stoffschlüssigen DP-DP-Polymerverbunds und zugehöriger Prüfaufbau (Quelle: IKV)

zessschritten um weitere Funktionselemente ergänzt werden. Dazu haben sich stoffschlüssige Fügeverfahren wie das Kleben sowie mechanische Fügeverfahren wie Nieten oder Verschrauben etabliert. Diese Verfahren basieren meist auf der Verwendung einer dritten Komponente in Form von Klebstoffen oder Niet- bzw. Schraubelementen.

Aktuelle Bestrebungen in Forschung und Industrie liegen daher u.a. in der Entwicklung von Verfahren, die die Funktionalisierung von FVK-Bauteilen bereits in die Bauteilfertigung integrieren.

Funktionsintegration durch Hinterspritzen

Am IKV wurde im Rahmen eines über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungs-

vereinigungen „Otto von Guericke“ (AiF) e. V. geförderten Projekts in einem neuen Ansatz untersucht, inwiefern eine Funktionsintegration und Steigerung der geometrischen Komplexität von endlosfaserverstärkten duroplastischen Leichtbauteilen durch Hinterspritzen mit rieselfähigen duroplastischen Formmassen erreicht werden können. Dabei wurden vollständig ausgehärtete endlosfaserverstärkte Bauteile mittels des RTM-Verfahrens hergestellt und nachfolgend im Duroplast-Spritzgießverfahren funktionalisiert. Mit dieser Strategie sollen die jeweiligen Vorteile der Flüssigimprägnierverfahren (gerichtete Faserverstärkung, hoher Faservolumengehalt, hohe mechanische Eigenschaften) und der urformenden Prozesse (hohe Bauteilkomplexität, hohe Funktionsintegration) kombiniert werden.

Zur Bewertung des Potenzials der Verfahrenskombination und zur Realisierung höchster mechanischer Eigenschaften wurden die Mechanismen im Fügebereich und die Einflussfaktoren auf die Haftfestigkeit des stoffschlüssigen DP-DP-Haftverbunds (duroplastisch-duroplastisch) untersucht. Dazu wurde ein Prüfkörper mit Sechskantgeometrie entwickelt, der durch Hinterspritzen auf eine FVK-Trägerplatte gefügt und in Anlehnung an DIN EN 1465 hinsichtlich der erreichbaren Scherfestigkeit charakterisiert wird (**Bild 1**).

Zur Fertigung der Prüfkörper wurden zunächst ebene RTM-Bauteile auf Basis eines niedrigviskosen und schnellhärtenden Epoxid-Injektionsharzsystems für Automotive-Anwendungen (Typ: Epikote/Epikure Trac 06150 Hersteller: Hexion GmbH, Duisburg) sowie einem Glasfasergelege mit quasiisotropem Lagenaufbau und einem Flächengewicht von 986 g/m² (Typ: Q-E-986 g/m²; Hersteller: Saertex GmbH & Co. KG, Saerbeck) hergestellt. Die gefertigten Platten weisen einen

Parameter	Einstellung
Prozessgas	Sauerstoff
Ausgangsleistung P	4000 W
Taktung T (on/off)	4/40 ms
Druck p	5 Pa
Volumenstrom V'	100 sccm(Stan-
Aktivierungszeit t	25 s ; 120 s

Tabelle 1. Prozessparameter bei der Funktionalisierung mittels Hinterspritzen (Quelle: IKV)

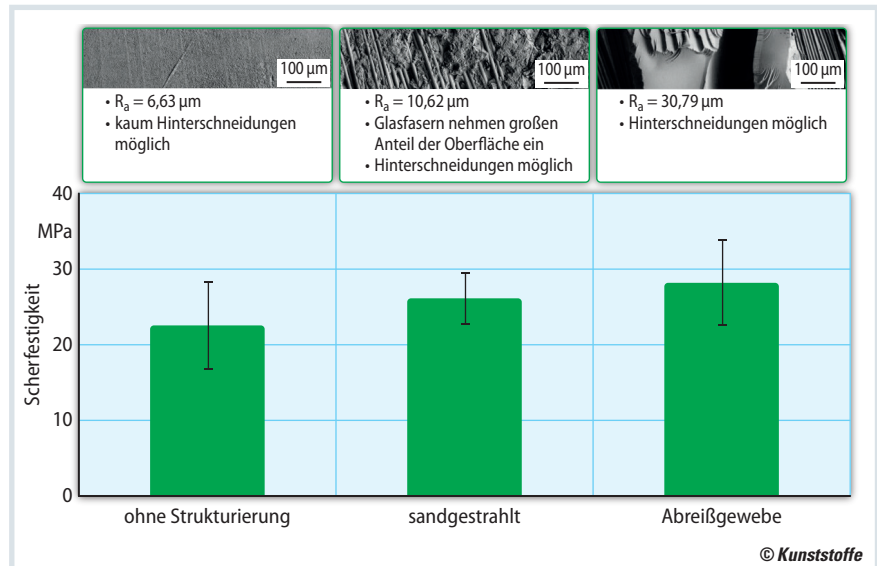


Bild 2. Oberflächenbeschaffenheit: Rauheit (oben) und resultierende Haftfestigkeit in Abhängigkeit der Strukturierungsart (Quelle: IKV)

Faservolumengehalt von etwa der Hälfte auf.

Für die Hinterspritzversuche wurde eine rieselfähige Epoxidharz-Formmasse (Typ: Epoxidur EP 3582 B MS, Hersteller: Raschig GmbH, Ludwigshafen) eingesetzt. Die Formmasse ist zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften mit Glasfasern und anorganischen Harzträgern verstärkt und zeichnet sich durch eine hohe Temperaturbeständigkeit aus. Die Funktionalisierung erfolgte auf einer Duroplast-Spritzgießmaschine (Typ: Allrounder 370 A; Hersteller: Arburg GmbH + Co KG, Loßburg). Die Prozessparameter bei der Herstellung der Prüfkörper sind in **Tabelle 1** angegeben.

Oberflächeneigenschaften bestimmen den Haftverbund

In der Theorie werden bei der Ausbildung eines DP-DP-Haftverbundes stoffschlüssige Wirkungsmechanismen ausgenutzt [4, 5]. Die Haftfestigkeit einer stoffschlüssigen Verbindung ist auf mechanische und spezifische Adhäsion zurückzuführen (siehe **Kasten**). Ziel der Arbeiten war es, die Relevanz und den Einfluss der beschriebenen Theorien der mechanischen und spezifischen Adhäsion bei der Ausbildung des Haftverbunds innerhalb der Prozesskette zu untersuchen. Dazu wurde die Oberfläche der endlosfaserverstärkten RTM-Bauteile durch Anpassung »

JEC
COMPOSITES

Besuchen Sie uns in Paris
vom 03. - 05. März 2020:
Halle 5, Stand C80

**Pressensysteme,
so individuell wie
Ihre Ansprüche.**

RUCKS Maschinenbau GmbH

Austraße 2, 08371 Glauchau

Telefon: 037 63/6003-0, E-Mail: info@rucks.de

www.rucks.de



Bild 3. Oberflächenenergieniveaus der unstrukturierten Proben vor und nach der Behandlung mit Niederdruckplasma. Der polare Anteil ist jeweils heller dargestellt (Quelle: IKV)

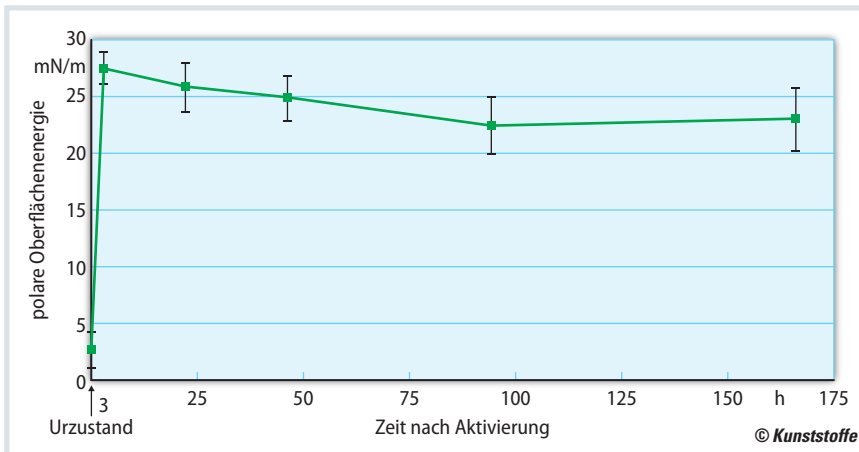
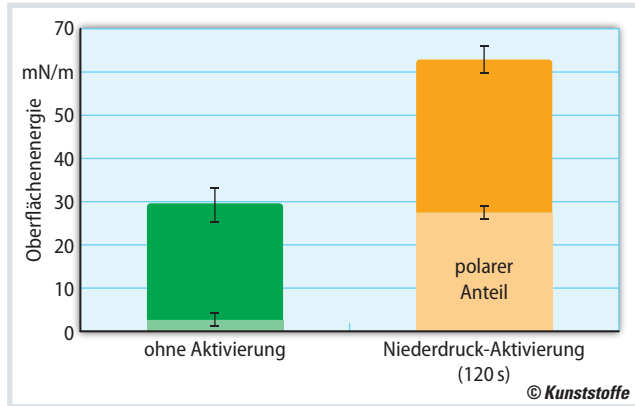


Bild 4. Zeitliche Beständigkeit des Aktivierungseffekts. Die Prozessparameter der Aktivierung sind in Tabelle 1 zu finden (Quelle: IKV)

der Rauheit (mechanische Adhäsion) sowie durch Erhöhung der Oberflächenenergie mittels Plasma-Aktivierung (spezifische Adhäsion) variiert.

Einfluss der Oberflächenrauheit

Die Anpassung der Oberflächenrauheit erfolgte durch nachträgliches Sandstrah-

len sowie Entfernen eines in den RTM-Prozess eingebrachten unbeschichteten Abreißgewebes (Typ: Leinwandbindung, Flächengewicht 95 g/m²; Hersteller: R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH, Waldenbruch). Auf diese Weise sollen mikroskopische Überhänge erzeugt werden, an denen sich Mikroformschlüsse (mechanische Adhäsion) ausbilden können [siehe

auch 10, 11]. Proben ohne Strukturierung wiesen eine vergleichsweise glatte Oberfläche mit geringer Rauheit ($R_a = 6,63 \mu\text{m}$) auf; die sandgestrahlten Platten zeigten dagegen eine höhere Rauheit ($R_a = 10,62 \mu\text{m}$). Die Oberfläche der sandgestrahlten Proben war darüber hinaus aufgrund einer Freilegung des Glasfaserhalbzugs deutlich heterogener als der Referenzzustand ohne Strukturierung (**Bild 2**). Dabei wurde deutlich, dass im Strahlprozess große Mengen des Matrixwerkstoffs abgetragen wurden, sodass die oberste Faserschicht größtenteils freigelegt wurde.

Die größte Rauheit ($R_a = 30,79 \mu\text{m}$) entstand durch Entfernen des Abreißgewebes. Neben scharfen Kanten durch gebrochenes Matrixmaterial waren auch vergleichsweise große Hohlräume erkennbar, in die die Spritzgießmasse potenziell eindringen kann. Im Gegensatz zu den sandgestrahlten Proben legte das Abreißgewebe nur selten Glasfasern frei und die Oberfläche bestand größtenteils aus Matrixmaterial.

Die Analyse der Haftverbundeigenschaften in Abhängigkeit der Oberflächenrauheit erfolgte anhand von jeweils acht Prüfkörpern. Die Referenzproben ohne Strukturierung erreichten eine Scherfestigkeit von ca. 23 MPa, die strukturierten Proben geringfügig höhere Werte (**Bild 2**). Demnach hat die Oberflächenrauheit keinen signifikanten Einfluss auf die Haftverbundeigenschaften der endlosfaserverstärkten FVK-Trägerplatte.

Einfluss der Oberflächenenergie

Um polare und reaktive (funktionelle) Molekülgruppen in die Oberfläche einzubringen und somit die Benetzungsfähigkeit zu verbessern, wurde die Oberflächenenergie der RTM-Bauteile mittels Niederdruckplasma-Aktivierung erhöht (**Tabelle 2**) und mittels Kontaktwinkelmessung bestimmt (mit hochreinem destilliertem Wasser und Diiodmethan nach dem OWRK-Ansatz von Owens, Wendt, Rabel und Kaelble [12–14]).

Im Urzustand betrug die Oberflächenenergie der Proben ca. 30 mN/m, wobei der polare Anteil bei ca. 3 mN/m lag (**Bild 3**). Durch Niederdruckaktivierung mit dem Prozessgas Sauerstoff konnte die Oberflächenenergie auf ca. 64 mN/m bei einem polaren Anteil von ca. 28 mN/m gesteigert werden.

Ursachen für Adhäsion

Mechanische Adhäsion tritt auf, wenn eine flüssige Reaktionsmasse in die Porosität oder in Risse des Substratwerkstoffs eindringt und dort vernetzt. Dadurch entstehen mikroskopische Hinterschneidungen und Verzahnungen zwischen den Fügepartnern, die zu einer mikroformschlüssigen Verbindung führen können [4].

Die **spezifische Adhäsion** beschreibt hingegen alle nichtmechanischen Effekte und beruht auf der Wechselwirkung von Nebervalenzkräften in den Oberflächen der Fügepartner. Danach ist die Oberflächenenergie eines Werkstoffs die Summe der nicht abgesättigten Valenzkräfte. Sie besteht aus einem polaren und einem dispersen Anteil. Der polare Anteil der Oberflächenenergie hat seine Ursache in den unterschiedlichen Elektronegativitäten der Atome eines Moleküls, während der disperse Anteil aus temporär unsymmetrischen Ladungsverteilungen zwischen den Molekülen herrührt. Je höher der polare Anteil der Oberflächenenergie der Kunststoffoberfläche, desto höher ist die potenzielle Verbundfestigkeit zwischen Kunststoff und Formmasse [6–9].

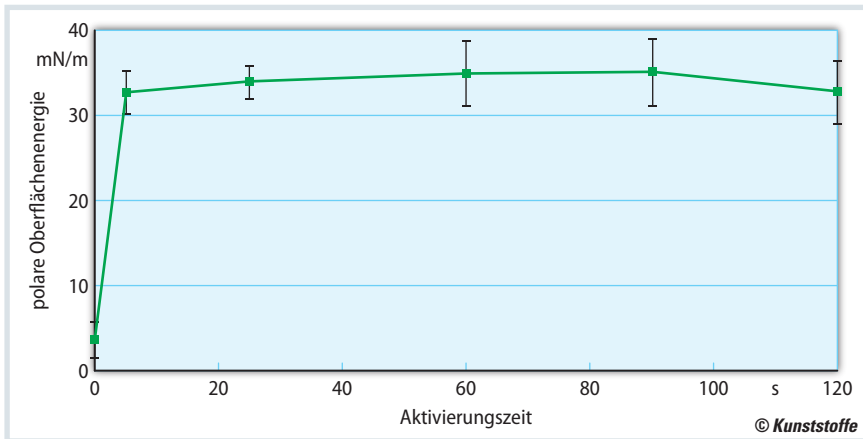


Bild 5. Die Dauer der Plasmaaktivierung hat keinen signifikanten Einfluss auf die polare Oberflächenenergie (Quelle: IKV)

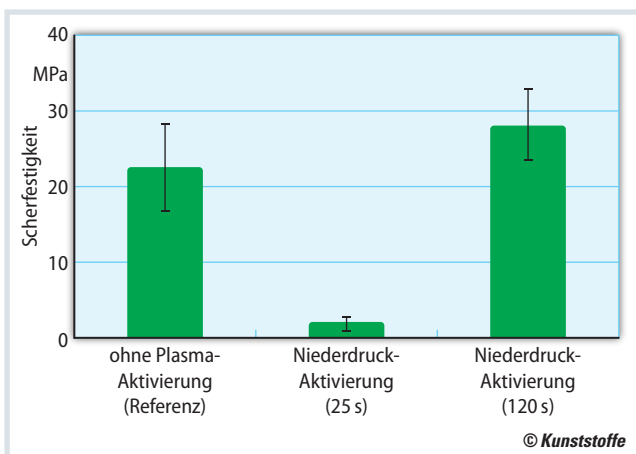


Bild 6. Die Aktivierungszeit wirkt sich im Vergleich zur Referenz ohne Plasmaaktivierung bei unstrukturierten FVK-Platten deutlich auf den Haftverbund aus (Quelle: IKV)

Der Effekt der Plasmaaktivierung ist selbst nach etwa einer Woche (166 Stunden) noch deutlich nachweisbar (Bild 4). Zu diesem Zeitpunkt war die polare Oberflächenenergie noch mindestens sechs-

mal so hoch wie im unbehandelten Zustand (Urzustand). Die Dauer der Aktivierung zeigte dabei keinen signifikanten Einfluss auf die polare Oberflächenenergie (Bild 5), allerdings deutliche Unterschiede hinsichtlich der Haftverbundeigenschaften (Bild 6): Eine Aktivierungszeit von 25 s führte zu einem signifikanten Abfall der Scherfestigkeit auf ca. 2 MPa, während eine Aktivierungszeit von 120 s die Haftfestigkeit auf ca. 28 MPa erhöhte.

Bei den mechanischen Eigenschaften zeigen Strukturierung und Plasmaaktivierung in Abhängigkeit der Oberflächenrauheit gegenläufige Effekte (Bild 7): So verringerte eine Niederdruckplasma-Aktivierung die Scherfestigkeit bei sandgestrahlten Proben deutlich. Bei Proben, von denen nach der Herstellung ein Abreißgewebe entfernt wurde, konnte die Haftfestigkeit durch eine Aktivierung hingegen nochmals gesteigert werden und erreichte maximale Festigkeiten von ca. 35 MPa.

Dieser Effekt wird auf die unterschiedliche Oberflächenbeschaffenheit der Pro-

ben nach den Strukturierungen zurückgeführt.

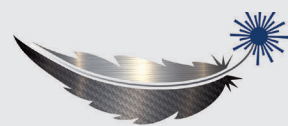
Bild 8 zeigt Schlißbilder nach einer mikroskopischen Analyse des Fügebereichs. Bei den sandgestrahlten Proben konnte wie oben beschrieben ein vermehrtes Freiliegen von Glasfaserschichten aufgrund des Strahlprozesses festgestellt werden. Bei der Funktionalisierung entsteht der Haftverbund dabei maßgeblich direkt zwischen den freigelegten Fasern und der Spritzgießmasse. Bei einer Plasmaaktivierung von sandgestrahlten Proben vor der Funktionalisierung mittels Hinterspritzen kann es so zu einer unerwünschten Glättung der Glasfaseroberfläche und damit einhergehend zu einer Herabsetzung der effektiven Oberflächengröße und der Wechselwirkungsmöglichkeit kommen. Untersuchungen von Ivanova et al. zeigen, dass dieser Effekt die positive Wirkung eines Plasmas überkompensieren kann [15]. Dadurch ist es möglich, dass im vorliegenden Fall eine Herabsetzung der Scherfestigkeiten bei plasmaaktivierten, sandgestrahlten Proben auftritt. »

Parameter	Einstellung
Werkzeugtemperatur	180 °C
Extrudertemperatur (Einzug/Düse)	30/90 °C
Dosiervolumen	66 cm ³
Dekompressionsvolumen	2 cm ³
Geschwindigkeit Schneckenumfang	9 m/min
Einspritzgeschwindigkeit	5 cm ³ /s
Einspritzdruckbegrenzung	1500 bar
Umschaltvolumen	0 cm ³
Nachdruck (abfallende Rampe)	1000–800 bar
Nachdruckdauer	20 s
Nachdruckmassenstrom	3 cm ³ /s
Vernetzungszeit	120 s

Tabelle 2. Prozessparameter der Niederdruckplasmabehandlung zur Aktivierung der Kunststoffoberfläche (Quelle: IKV)

LASERANWENDUNGEN FÜR:
LUFTFAHRT
AUTOMOBILBAU
SCHIENENVERKEHR
SCHIFFFAHRT

SYMPOSIUM
PHOTONISCHER
LEICHTBAU



Hannover,
24./25. März
2020

www.photonischer-leichtbau.de

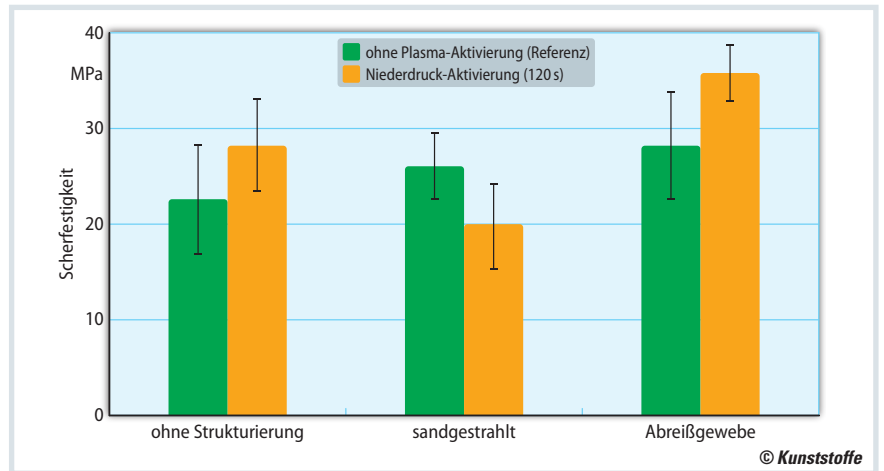


Bild 7. Abhängig von der Strukturierung senkt oder erhöht die Oberflächenaktivierung die Haftverbundeigenschaften (Quelle: IKV)

Die Autoren

Prof. Dr.-Ing. Christian Hopmann ist Leiter des Instituts für Kunststoffverarbeitung (IKV) an der RWTH Aachen, Geschäftsführer der Fördervereinigung des IKV und Inhaber des Lehrstuhls für Kunststoffverarbeitung an der RWTH Aachen.

Dipl.-Wirt.-Ing. Nicolay Bergmann ist als wissenschaftlicher Mitarbeiter am IKV tätig;

nicolay.bergmann@ikv.rwth-aachen.de

Robert Müller, M.Sc., ist als wissenschaftlicher Mitarbeiter am IKV tätig.

Daniel Schneider, M.Sc., ist als Abteilungsleiter für die Abteilung Faserverstärkte Kunststoffe und Polyurethane am IKV tätig.

Dr.-Ing. Kai Fischer ist als wissenschaftlicher Direktor für den Bereich Leichtbau am IKV tätig.

Dank

Das IGF-Forschungsvorhaben 9 EWN der Forschungsvereinigung Kunststoffverarbeitung wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Allen Institutionen gilt unser Dank.

Service

Literatur & Digitalversion

Das Literaturverzeichnis und ein PDF des Artikels finden Sie unter www.kunststoffe.de/2020-02

Im Vergleich dazu zeigten die mikroskopischen Untersuchungen, dass es beim Entfernen eines Abreißgewebes nicht zu einem Freilegen der Fasern kommt. Die Oberfläche bestand wie bei den unstrukturierten Proben weitgehend aus Matrixmaterial. Durch die Strukturierung mittels Abreißgewebe kann es im Vergleich zu den unstrukturierten Oberflächen zudem zu einer Vergrößerung der Oberfläche und der mittleren Matrixschichtdicke kommen, wodurch sich funktionelle Gruppen in größerer Zahl anlagern können und die Aktivierung verstärken.

Fazit

Die Funktionalisierung von endlosfaserverstärkten duroplastischen Leichtbauteilen mittels Hinterspritzen von rieselfähigen duroplastischen Formmassen er-

möglicht die Herstellung funktionsintegrierter Prüfkörper mit hohen Scherfestigkeiten von ca. 35 MPa. Die erzielten Scherfestigkeiten sind dabei vergleichbar mit denen einer strukturellen Klebung. Der DP-DP-Haftverbund basiert den Untersuchungen zufolge maßgeblich auf der Theorie der spezifischen Adhäsion. So zeigte eine Analyse des Einflusses der mechanischen Adhäsion (Mikroformschluss) keinen signifikanten Zusammenhang zwischen der Oberflächenrauheit der endlosfaserverstärkten Komponente und der erreichbaren Haftfestigkeit. Durch eine Plasmaaktivierung zur Erhöhung der Oberflächenenergie (spezifische Adhäsion) konnten hingegen nochmals höhere mechanische Eigenschaften erzielt werden. Der positive Effekt einer Plasmaaktivierung ist dabei jedoch abhängig von der Oberflächentopografie der Bauteile. ■

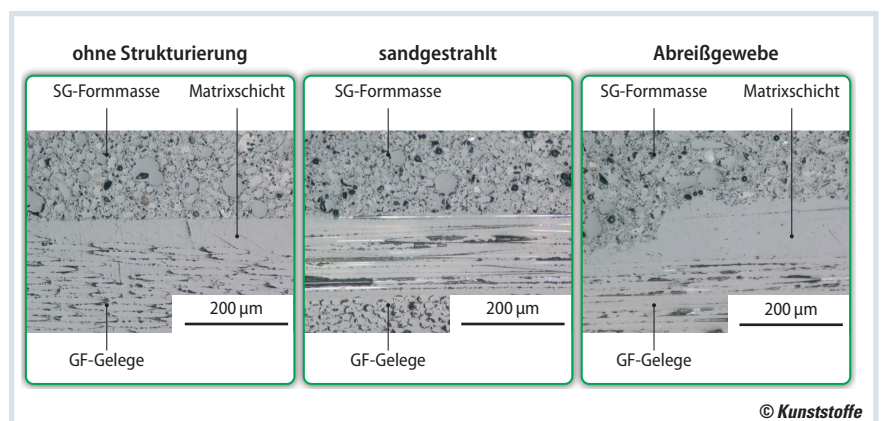


Bild 8. Schliffbilder des Fügebereichs nach der Funktionalisierung. In der Mitte ist jeweils die Matrixschicht zwischen Spritzgieß-Formmasse (oben) und Glasfaser-Gelege (unten) zu sehen

(Quelle: IKV)