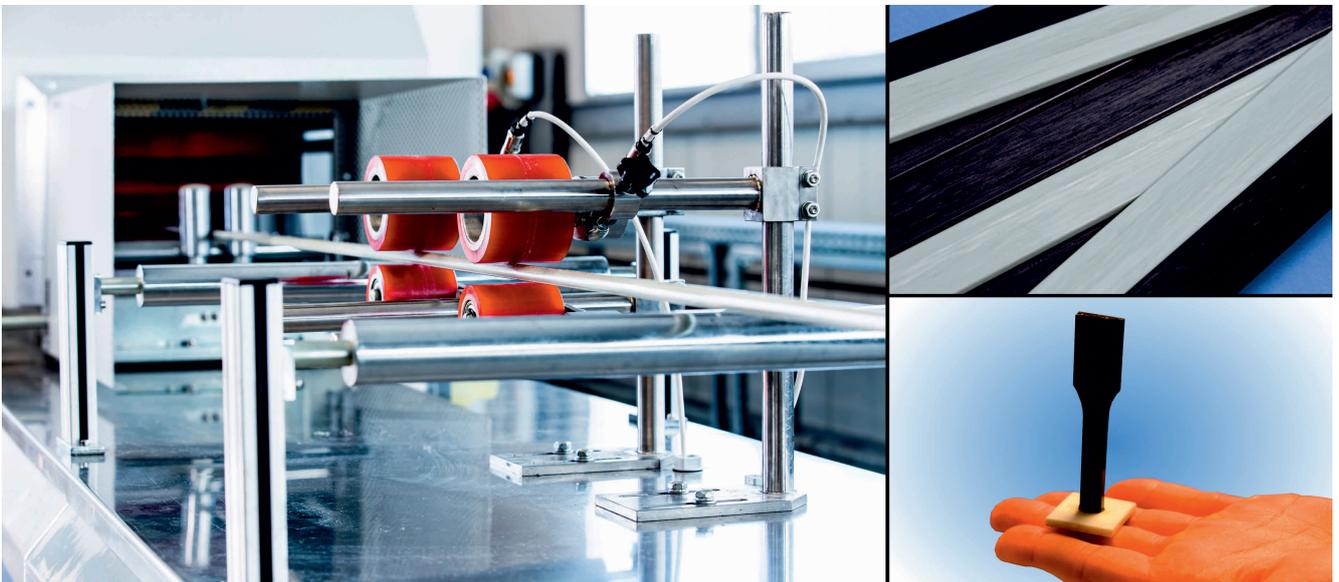


Funktionalisierung thermoplastischer FVK-Profile

Modularer Batteriebaukasten für ein Feuerwehrfahrzeug

Gleich mehrere Partner forschen an einer Lösung, um die Elektromobilität auch in kleinen Serien für Sonderfahrzeuge zu ermöglichen. Bei einem Feuerwehrfahrzeug, das mit elektrischen Modulen gespickt ist, spielt vor allem die EMV-Abschirmung eine wichtige Rolle. Drei Verfahren werden untersucht, um die thermoplastischen Profile erfolgreich zu funktionalisieren.



Mithilfe der In-situ-Pultrusion (links) werden Profile hergestellt (oben rechts), die im Anschluss funktionalisiert werden (unten rechts).

© Fraunhofer ICT/IKT

Um der Elektromobilität großflächig zum Siegeszug zu verhelfen, braucht es bei weitem nicht nur Elektrolösungen für die Pkw-Großserie, sondern auch flexibel anpassbare Leichtbaulösungen für Fahrzeuge, die in kleineren Stückzahlen auf den Markt kommen. Beispiele sind hoch spezialisierte Sonderfahrzeuge, wie sie etwa von der Feuerwehr benötigt werden.

Diese zeichnen sich durch ein ungewöhnlich breites und hochindividuelles Anforderungsspektrum aus – entsprechend hoch ist ihre Variantenvielfalt. Hinsichtlich ihrer Elektrifizierung gilt es daher, auf diese Vielfalt mit einem ganzheitlichen und modularen Batteriekonzept zu reagieren, das sowohl die Beson-

derheiten der individuellen elektrischen wie auch der mechanischen Ausgestaltung in den Blick nimmt.

Ziel: Entwicklung eines hochsteifen, aber leichten Batteriegehäuses

Genau dies steht im Mittelpunkt der Entwicklung eines modularen Batteriebaukastens für ein Feuerwehrfahrzeug im Rahmen des vom BMWK geförderten Konsortialprojekts „ModE-SoFa“ (Modulare skalierbare Batteriegehäuse zur Elektrifizierung von Sonderfahrzeugen). Ziel ist die Elektrifizierung eines Feuerwehrfahrzeugs durch die Firma Magirus GmbH. Dazu soll das Batteriegehäuse aus hochsteifen, aber dennoch leichten thermo-

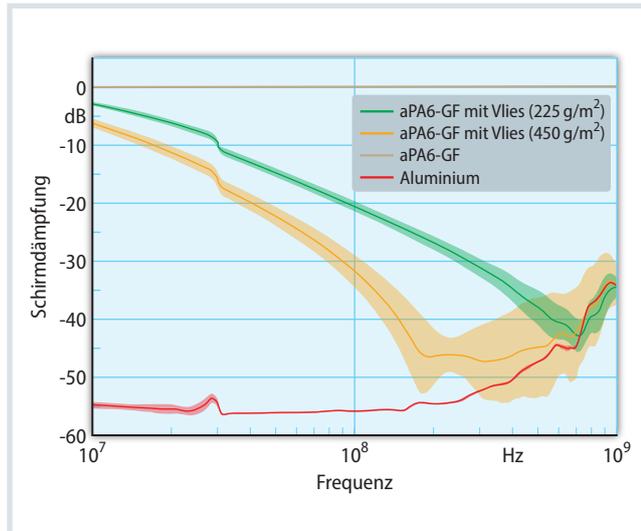
plastischen Pultrusionsprofilen konstruiert werden.

An diesem couragierten Teilprojekt, das letztlich dazu beitragen soll, das Fahrzeuggewicht niedrig zu halten, arbeiten drei erfahrene Partner zusammen: die CompriseTec GmbH aus Hamburg, das Fraunhofer Institut für Chemische Technologie (ICT) aus Pfinztal, sowie das Institut für Kunststofftechnik (IKT) der Universität Stuttgart. Die skalierbaren Batteriemodule und das entsprechende Batteriesystem werden von der GreenIng GmbH & Co. KG entwickelt, während die Selfbits GmbH ein umfassendes Trackingkonzept aller eingesetzter Rohmaterialien und Verarbeitungsschritte erarbeitet. Ziel dieses Teilprojekts

Bild 1. Elektromagnetische Schirmdämpfung (dB) über Frequenz (Hz) von aPA6/GF Pultrudaten mit Vlies und ohne sowie einer Referenz aus Aluminium. Die Schirmdämpfung ist auf einer Negativskala aufgetragen, der niedrigste Wert entspricht der höchsten Schirmdämpfung.

Quelle: Fraunhofer ICT;

Grafik: © Hanser



ist, den Weg aller Baugruppen ganzheitlich nachzuverfolgen und zu dokumentieren.

Im Detail basiert das von der CompriseTec entwickelte, modulare Batteriekastenkonzzept auf der Erzeugung von Bauteilflächen aus einzelnen, pultrudierten Profilen. Hierzu werden am IKT Schweißverfahren untersucht und für den Anwendungsfall befähigt. Die so erstellten Flächenelemente sollen anschließend zu Kästen zusammengefügt werden. Darüber hinaus sollen diverse zusätzliche Funktionselemente wie Kabelhalterungen, Durchführungen und Dichtungsleisten bedarfsgerecht auf die Flächen aufgebracht werden. Die Bauteilflächen sollen sich darüber hinaus durch eine weitere Besonderheit auszeichnen:

eine EMV-Abschirmung, die in einem mit elektrischen Modulen „gespickten“ Fahrzeug natürlich unabdingbar ist. Diese soll sichergestellt werden, indem das ICT elektrisch leitfähige Kohlenstoffaservliese bereits in situ in den Pultrusionsprozess integriert.

In-situ-Pultrusion mit Vliesintegration

Bei der reaktiven thermoplastischen In-situ-Pultrusion (**Titelbild**) wird das Monomer e-Caprolactam als Matrix eingesetzt, welches bei der Verarbeitung zu Polyamid 6 polymerisiert. Der Verfahrensablauf bei der In-situ-Pultrusion ist mit Ausnahme einer Faservorheizung vor dem Eintritt der trockenen Faserovings

in die Injektions- und Imprägnierkammer analog zur klassischen Pultrusion mit vernetzenden Harzsystemen. Die in der Injektions- und Imprägnierkammer zugeführten Monomere imprägnieren das Faserbündel und werden anschließend im Werkzeug durch Wärmeeintrag auspolymerisiert. Nach Verlassen des Werkzeugs kühlt das Profil ab und wird kontinuierlich durch einen Abzug, der den gesamten Prozess aufrechterhält, abgezogen [1, 2].

Die zentrale Herausforderung dabei, die In-situ-Pultrusionsprofile für den Einsatz in Batteriekästen zu befähigen, stellt die Integration von Kohlenstoffaservliesen dar. Die Vliese dienen zur elektromagnetischen Abschirmung sowie einer Verbesserung der mechanischen Eigenschaften in Querrichtung.

Das ICT verarbeitet die im Airlay- und im Kardierverfahren hergestellten Vliese im Pultrusionsprozess so, dass diese mittig zwischen zwei Decklagen aus unidirektionalen Glasfaserrovings in die Injektions- und Imprägnierkammer eingezogen werden. Durch den Einsatz der Vliese können die mechanischen Eigenschaften in Querrichtung erhöht werden; so nimmt beispielsweise die Querkzugfestigkeit von 32 MPa auf 52 MPa zu, wenn als Sandwichmaterial ein kardiertes Vlies mit 450 g/m² eingesetzt wird. Der Einfluss unterschiedlicher Faserorientierungen und Flächengewichte der untersuchten Vlieskonfigurationen kann ermittelt und zur weiteren Auslegung verwendet werden.

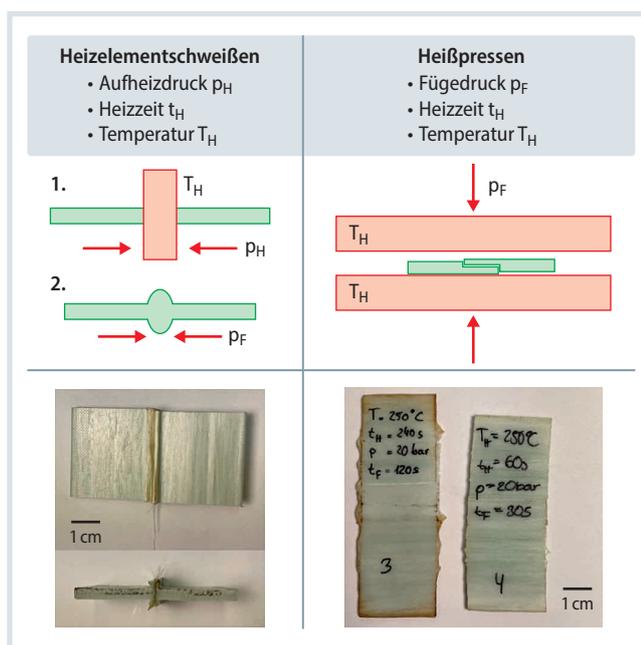
Die elektromagnetische Abschirmung der Batteriekomponenten gegenüber der Umwelt stellt eine zentrale Funktion des Batteriekastens dar, sodass die Prüfung der Schirmdämpfung, deren Ergebnisse in **Bild 1** dargestellt sind, von hoher Bedeutung ist. Die Kurvenverläufe in Bild 1 verdeutlichen eine Verbesserung der Abschirmung durch die Integration von Kohlenstoffaservliesen gegenüber rein glasfaserverstärkten Profilen.

Prozessentwicklung für das Fügen von pultrudierten Profilen

Der erste Schritt im Montageprozess des modularen Batteriekastens ist das Fügen der einzelnen, pultrudierten Profile zu flächigen Paneelen. Dies erfordert ein geeignetes Fügeverfahren, »

Bild 2. Darstellung des Heizelementschweißens und des Heißpressens.

Quelle: IKT; Grafik: © Hanser



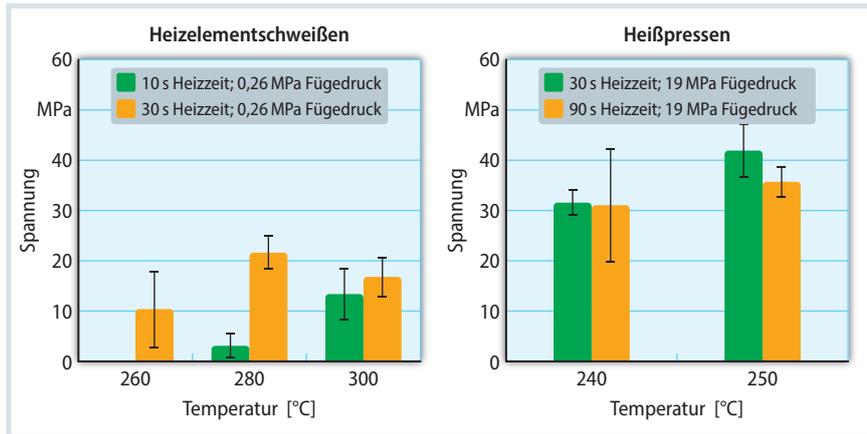


Bild 3. Ergebnisse aus dem Zugversuch für die geschweißten und gepressten Prüfkörper.

Quelle: IKT; Grafik: © Hanser

das auch das Fügen von zwei unterschiedlich lang ausgedehnten Platten ermöglicht. Als vielversprechendste Kandidaten wurden das Heizelementschweißen [3] und das Heißpressen identifiziert. Am IKT wurden quadratische 30 mm x 30 mm Zuschnitte aus pultrudierten Profilen (ICT) mit einem Faservolumengehalt von 71 % und einer Wanddicke von 4 mm untersucht. **Bild 2**

fasst die Verfahrensprinzipien und zentralen Prozessparameter zusammen.

Beim Heizelementschweißen werden die Fügepartner unter definierter Temperatur und Druck an einer Heizplatte aufgeschmolzen und anschließend unter Druck miteinander verbunden. Dabei resultiert eine Schweißnaht, die auch durch die Ausbildung einer Schweißwulst deutlich erkennbar ist.

Beim zweiten Verfahren, dem Heißpressen, werden die Fügepartner zuvor so bearbeitet, dass sie als Halbzeuge einen L-förmigen Querschnitt besitzen. Diese werden dann in eine beheizbare Labor-Plattenpresse eingelegt und unter Druck und Temperatur miteinander verpresst. Die Zykluszeiten sind länger als beim Heizelementschweißen, dafür sind die einstellbaren Fügedrucke höher. Vorversuche zeigten, dass zu hohe Temperaturen oder lange Heizzeiten die Pultrudate lokal zersetzen können (in **Bild 2** an der Verfärbung der linken Probe zu erkennen). Brachte man hingegen zu wenig Energie ein, wurde kein ausreichender Stoffschluss erzeugt.

Zugversuche brachten dazu detailliertere Erkenntnisse. **Bild 3** zeigt, welche Parameter-Variationen beim Heizelementschweißen signifikante Auswirkungen auf die Zugfestigkeit haben. Bei zu niedrigen Temperaturen reicht die thermische Energie nicht aus, um die Kunststoffmatrix aufzuschmelzen. Aber auch (zu) hohe Temperaturen können die Zugfestigkeit negativ beeinträchtigen – möglicherweise zurückzuführen auf

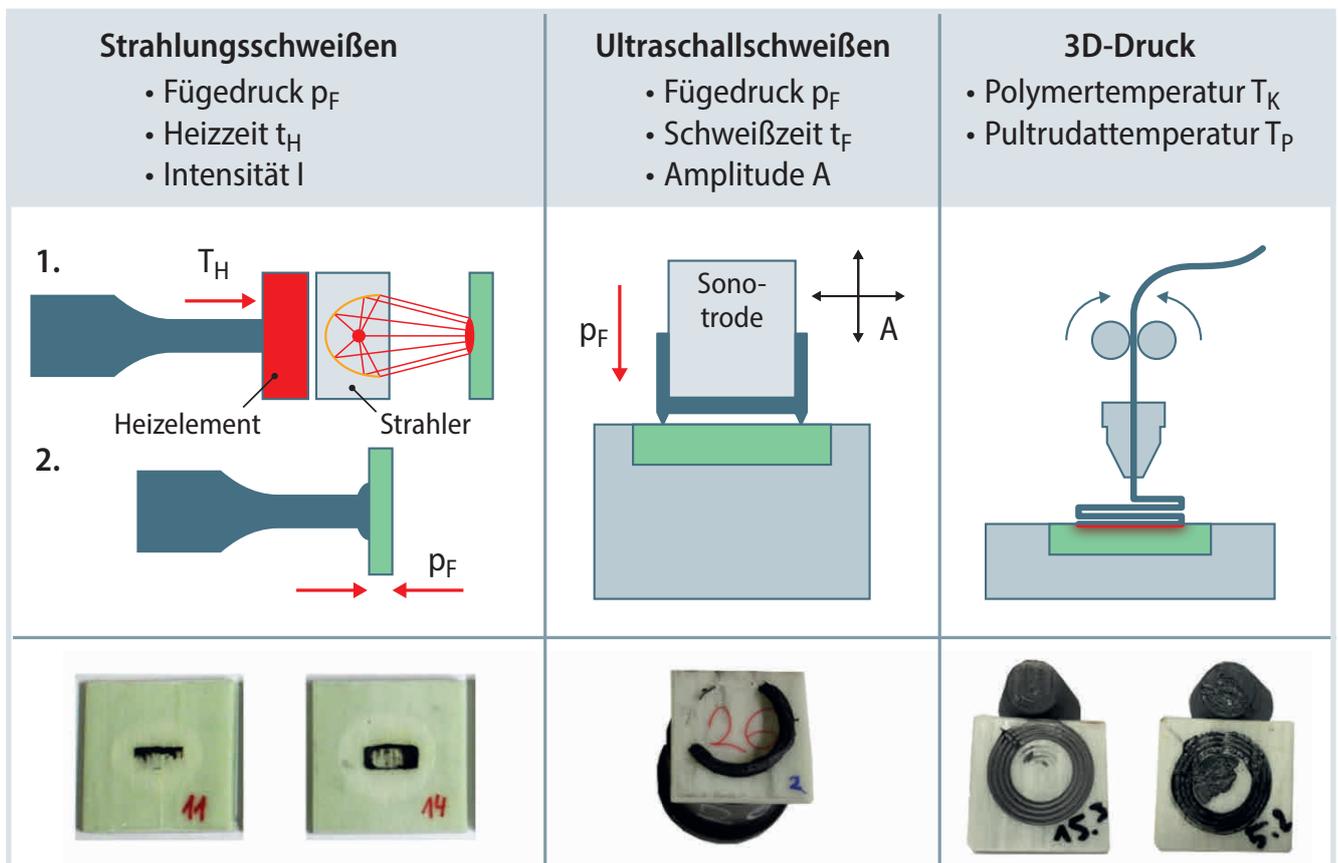


Bild 4. Zusammenfassende Darstellung des Strahlungsschweißens, Ultraschallschweißens und der Funktionalisierung mittels 3D-Druck-Verfahren. Die Prüfkörperbilder zeigen die verschiedenen Versagensarten. Quelle: IKT/CompriseTec; Grafik: © Hanser

Zersetzungsvorgänge in der Kunststoffmatrix. Es ist festzustellen, dass trotz des hohen Faservolumenanteils bereits beim einfachen Heizelementschweißen Festigkeiten von über 20 MPa erreichbar sind.

Im Vergleich dazu sind beim Heißpressen geringere Aufheiztemperaturen nötig. Hier wirken sich auch die Presskräfte deutlich aus: Hohe Presskräfte ergeben höhere Festigkeitswerte. Hinzu kommt, dass bei den gepressten Prüfkörpern die Struktur der ursprünglichen Fügepartner kaum mehr sichtbar ist (kaum erkennbare Schweißnaht). Im Gegensatz zum Heizelementschweißen zeichnet sich das Heißpressen im Ergebnis also durch etwa doppelt so hohe Zugfestigkeiten und eine homogenere Oberflächenstruktur aus.

Bedarfsgerechte Funktionalisierung

Das Aufbringen von Funktionselementen kann die Einsatzmöglichkeiten von thermoplastischen Pultrusionsprofilen erweitern. Im vorliegenden Fall wurde die Funktionalisierung durch Aufschweißen und per 3D-Druck genauer untersucht. **Bild 4** fasst die drei hier analysierten Verfahren sowie die zentralen Untersuchungsparameter zusammen.

Die Funktionselemente aus Polyamid (Typ: Ultramid B3S, BASF) wurden durch Stumpfschweißen mit einer Strahlungsheizung als Energiequelle (fokussierte Flächenleistung von $11,5 \text{ W/cm}^2$) sowie per Ultraschallschweißen aufgefügt [4]. Beide Verfahren bieten den Vorteil, dass die Prozessenergie präzise und gezielt eingebracht wird. Das kann von Bedeutung sein, wenn kleine Funktionselemente wie Schraubdome oder Schnapphaken angebracht werden sollen.

Im Gegensatz zum Schweißen kann im FFF-Druck kein relevanter Fügedruck aufgebaut werden, sodass in diesem Falle lediglich die Polymer- und Substrattemperatur als einstellbare Prozessparameter zur Verfügung stehen.

Bild 5 zeigt die Ergebnisse der Zugprüfungen. Sie zeigen den Einfluss der jeweils zentralen Parameter beim Fügen mit den verschiedenen Verfahren. Beim Strahlungsschweißen etwa ist eine gewisse Menge an thermischer Energie notwendig, um überhaupt eine stoffschlüssige Verbindung herzustellen. Durch Anpassung der Intensität und des

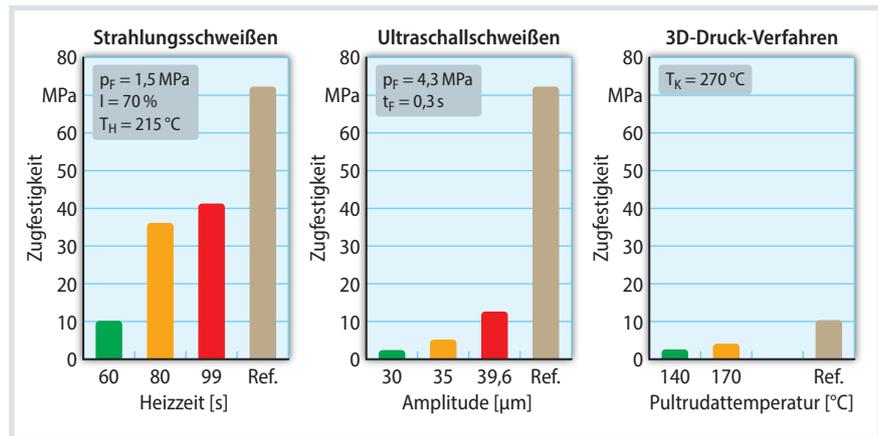


Bild 5. Ergebnisse aus dem Zugversuch für die drei untersuchten Fügeverfahren.

Quelle: IKT/CompriseTec; Grafik: © Hanser

Fügedrucks konnten maximale Festigkeiten von 41 MPa erreicht werden. Im Vergleich dazu erbrachte das Ultraschallschweißen nur eine maximale Festigkeit von etwa 12 MPa. Als Referenz diente hier ein Zugstab aus reinem PA6.

Die Ergebnisse für das 3D-Druck-Verfahren deuten an, dass sowohl die Substrat-/Pultrudatterperatur als auch die Düsen-/Schmelzetemperatur so hoch wie möglich sein müssen, um eine gute Anbindung an das Pultrudat zu gewährleisten. So versagen die gedruckten Prüfkörper bei einer Substrattemperatur von 170°C vornehmlich im gedruckten Körper und nicht in der Grenzschicht zwischen Druck und Pultrudat. Insgesamt wurden im Vergleich zu den Schweißverfahren geringere Festigkeiten erzielt. Als Referenz wurde hier ein gedruckter Zugstab herangezogen.

Alle Ziele erreicht: EMV-Abschirmung, Fügen und Funktionalisierung

Zusammenfassend konnten die Projektpartner nicht nur das Fügen von thermoplastischen Profilen mit EMV-Abschirmung realisieren, sondern nun stehen mit dem Strahlungsschweißen und dem Ultraschallschweißen sowie dem FFF-3D-Druck drei Verfahren zur Verfügung, um diese zu funktionalisieren. Diese Verfahren erlauben es, ein breites Spektrum an komplexen Geometrien zu realisieren sowie gewisse Lasten zu übertragen. Die ermittelten Festigkeiten helfen, zielgerichtet einen konkreten Prozess auszuwählen, mit dem sich die vorgesehenen Funktionalitäten im Batteriekasten umsetzen lassen. ■

Info

Text

Calvin Ebert, M.Sc., ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Kunststofftechnik (IKT) der Universität Stuttgart und dort in der Abteilung Verarbeitungstechnik tätig; calvin.ebert@ikt.uni-stuttgart.de

Hannah Decker, M.Sc., ist wissenschaftliche Mitarbeiterin der Gruppe Strukturleichtbau am Fraunhofer ICT; hannah.decker@ict.fraunhofer.de

Dipl.-Ing. Linus Tönnishoff ist als Projekt-Ingenieur in der integrierten Produktentwicklung bei der CompriseTec GmbH tätig; toennishoff@comprisetec.de

Prof. Dr.-Ing. Christian Bonten leitet seit 2010 das Institut für Kunststofftechnik der Universität Stuttgart.

Michael Wilhelm, M.Sc., ist Gruppenleiter der Forschungsgruppe Strukturleichtbau am Fraunhofer ICT und entwickelt seit 2019 den In-situ-Pultrusionsprozess; michael.wilhelm@ict.fraunhofer.de

Dr.-Ing. Lorenz Wruck ist Teamleiter Integrierte Produktentwicklung bei der CompriseTec GmbH und arbeitet seit sieben Jahren an Pultrusionsthemen; wruck@comprisetec.de

Dank

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) für die Förderung des Projekts „ModE-SoFa“ (FKZ: 01MV22016F, aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages).

Literatur

Das Literaturverzeichnis finden Sie unter www.kunststoffe.de/onlinearchiv