

Die Umweltauswirkungen der Produktion von FVK-Bauteilen bewerten

## Wie nachhaltig ist Leichtbau wirklich?

Leichtbau mit Faserverbundkunststoffen spart im Betrieb von Automobilen und Flugzeugen Energieressourcen ein. Den Einsparungen stehen jedoch häufig höhere Verbräuche in der Produktion gegenüber. Deshalb rückt die Nachhaltigkeit bei der Fertigung verstärkt in den Fokus. Eine entsprechende Nachhaltigkeitsbetrachtung für die Verarbeitung von thermoplastischen UD-Tapes zu funktionsintegrierten Bauteilen hat das Forschungsinstitut Neue Materialien Bayreuth durchgeführt.

Nach einer Studie des Meinungsinstituts Agora Verkehrswende aus dem Jahr 2019 entfallen bei Elektrofahrzeugen über den kompletten Lebenszyklus im Schnitt 42 % der CO<sub>2</sub>-Emissionen auf die Herstellung, 56 % auf die Nutzungsphase und jeweils 1 % auf Entsorgung und Recycling sowie sonstige Verbräuche [1]. Leichtbau ermöglicht eine Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen während der Nutzungsphase. Für Leichtbau-

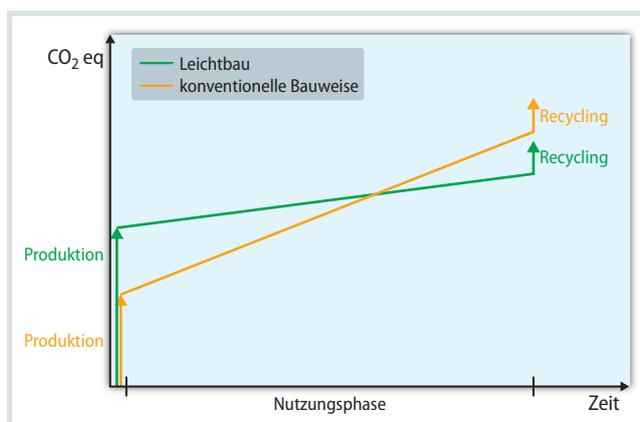
die bei Verbundwerkstoffen häufig ebenfalls höher sind.

Die wesentliche Frage für Leichtbaulösungen im Hinblick auf die Nachhaltigkeit ist deshalb, wie hoch der CO<sub>2</sub>-Ausstoß der Produktion sein darf, dass mit den Einsparungen in der Nutzungsphase am Ende noch ein Vorteil gegenüber konventionellen Lösungen besteht. Die Emissionseinsparungen durch den Leichtbau in der Nutzungsphase lassen

len Bewertung der Herstellung von Leichtbauteilen auf Basis kontinuierlich verstärkter thermoplastischer Tapes (UD-Tapes). Die Methode der Ökobilanzierung oder auch Lebenszyklusanalyse (engl. Life Cycle Assessment, LCA) nach DIN EN ISO 14040 und 14044 beschreibt die Vorgehensweise zur quantitativen Bewertung der potenziellen Umweltauswirkungen eines Produkts über seinen gesamten Lebensweg [2, 3]. Je nach Zweck einer LCA können als Rahmen auch Teilsysteme (z. B. cradle to gate, gate to gate, cradle to grave) betrachtet werden.

**Bild 1.** Leichtbau vs. konventionelle Bauweise: Schematische Darstellung des Energiebedarfs für Leichtbaulösungen im Vergleich zu konventionellen Lösungen in der Herstellung sowie anschließenden Nutzungsphase.

Quelle: NMB; Grafik: © Hanser



lösungen fallen jedoch im Vergleich zu konventionellen Bauweisen häufig höhere Energieverbräuche in der Produktion an (Bild 1). Bei Faserverbundkunststoffen erzeugt die Herstellung der Verstärkungsfasern, vor allem die energieintensive Herstellung von Kohlenstofffasern, bereits relativ hohe CO<sub>2</sub>-Emissionen, die die Leichtbaulösung in der Nutzungsphase erst wieder amortisieren muss. Am Ende des Produktlebenszyklus sind noch die Verbräuche des Recyclings zu berücksichtigen,

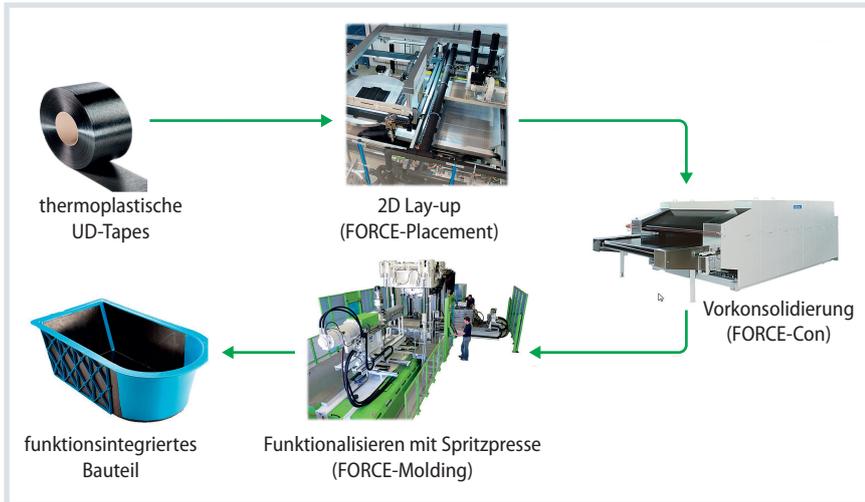
sich gut berechnen. Für eine Gesamtbilanz ist jedoch zusätzlich noch der Fußabdruck der Herstellung notwendig. Am Forschungsinstitut Neue Materialien Bayreuth (NMB) wurden entsprechende Untersuchungen zur CO<sub>2</sub>-Bilanz der Produktion von Bauteilen aus Faserverbundkunststoffen durchgeführt.

### Life Cycle Assessment in der Praxis

Ziel der Arbeiten der NMB war die Etablierung geeigneter Modelle zur ökobilanzziel-

### Den Untersuchungsrahmen und die Wirkungskategorie festlegen

Im ersten Schritt wird zuerst ein Untersuchungsrahmen festgelegt, der die Systemgrenzen, eine funktionelle Einheit und die Annahmen, Methoden und Randbedingungen definiert. Nachdem der Untersuchungsrahmen festgelegt ist, werden in dem folgenden Schritt der Sachbilanz (engl. Life Cycle Inventory) alle Medienflüsse der Produktionskette im Betrieb quantitativ erfasst und bei Bedarf mit Datenbankwerten ergänzt. Abschließend wird die gewünschte Wirkungskategorie festgelegt, nach der ausgewertet wird. Beispiele für solche Wirkungskategorien mit zugehörigem Wirkungsindikatorwert sind Treibhauseffekt oder Global-Warming-Potenzial in kg CO<sub>2</sub> eq. (Kilogramm CO<sub>2</sub>-Äquivalente), Flächenverbrauch und Flächeneinheit in km<sup>2</sup> oder Versauerung und Versauerungspotenzial in kg SO<sub>2</sub> eq. Die Auswertung der LCA findet bereits parallel zu allen Teilschritten statt.



**Bild 2.** Die FORCE Prozesskette ermöglicht die Herstellung funktionsintegrierter Faserverbundkunststoffbauteile im industriellen Maßstab auf Basis von UD-Tapes in kurzen Zykluszeiten.

Quelle: NMB; Grafik: © Hanser

In den letzten Jahren haben kontinuierlich faserverstärkte thermoplastische Verbundkunststoffe, primär Organobleche, in die automobilen Serienfertigung Einzug gefunden. UD-Tapes stellen dafür eine sinnvolle Ergänzung dar, da sie lastgerechte Preforms ermöglichen und konturabhängig den Verschnitt reduzieren. Thermoplastische Verbundwerkstoffe bieten Vorteile, wie kurze Zykluszeiten, Funktionsintegration über Spritzgießen sowie Recyclingfähigkeit. Neben der Anwendung im Automobilsektor besitzen sie auch ein großes Potenzial für weitere Anwendungen wie Sportartikel und die Luftfahrtindustrie. Die NMB hat in den zurückliegenden Jahren mit der FORCE-Prozesskette (FORCE = Functiona-

lized Oriented Composites) einen Ansatz für die Herstellung thermoplastischer Leichtbauteile im Industriemaßstab erarbeitet, der die Verarbeitung vom UD-Tape bis zum Overmolding-Bauteil umfasst (**Bild 2**) [4–6].

Am Beispiel der FORCE-Prozesskette lässt sich gut das Ökobilanzierungsverfahren einer Faserverbundbauteilproduktion verdeutlichen. Für die ökobilanzielle Betrachtung wird der Ablauf dieser Prozesskette (Flussdiagramm in **Bild 3**) in der Software GaBi (Version 9.2.1, Hersteller: Sphera Solutions) modelliert. Für die Nachhaltigkeitsbewertung wird als Systemgrenze ein „cradle to gate“-Ansatz gewählt. Das beinhaltet alle Daten von Beginn der Herstellung, auch der Roh-

materialien und Halbzeuge, bis zum „Fabrikator“, wenn das Bauteil die Produktionsstätte verlässt. Die Herstellung der Rohmaterialien wird über die Datenbanken „Professional“ und „Carbon Composites Extension“ der GaBi-Software abgebildet. Als funktionelle Einheit und somit als Bezugsgröße der Bewertung wird „ein Bauteil“ gewählt. Dadurch können auch die Auswirkungen des Einsatzes unterschiedlicher Materialien und Lagenaufbauten für ein und dasselbe Bauteil verglichen werden. Die Aufwände zur Schaffung der Infrastruktur und für Personal und Transportwege werden im Rahmen dieser Bilanz nicht berücksichtigt.

Als Bauteil für die Untersuchungen wurde ein komplexes Overmolding-Bauteil aus dem Forschungsprojekt 2D-Mul- ➤

### Info

#### Autoren

**Dipl.-Ing. Mathias Mühlbacher** ist Teamleiter Faserverbundwerkstoffe und stellvertretender Bereichsleiter Kunststoffe bei der Neue Materialien Bayreuth GmbH (NMB); mathias.muehlbacher@nmbgmbh.de

**B.Sc. Kathrin Kirchmeier** hat sich bei der NMB im Rahmen ihrer Bachelorarbeit mit dem Thema Nachhaltigkeitsbewertung der Fertigung thermoplastischer Faserverbundbauteile beschäftigt.

**Dr. Thomas Neumeyer** leitet den Geschäftsbereich Kunststoffe der NMB.

**Prof. Volker Altstädt** war bis 2021 Geschäftsführer der NMB.

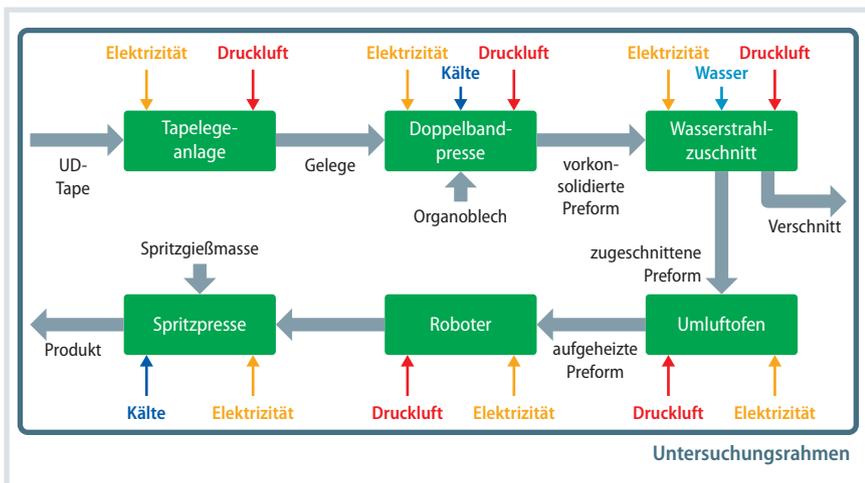
#### Dank

Die Autoren bedanken sich bei den Projektpartnern Brose Fahrzeugteile, Rehau Automotive und SWMS Systemtechnik Ingenieurgesellschaft für die gute Zusammenarbeit, dem Bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie (StMWi Bayern) für die Förderung von „2DMultiMat“ (Förderkennzeichen: NW-1506-0008), dem Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz für die Förderung von „OptiTape“ (Förderkennzeichen: ZF4064162PO8) sowie dem StMWi Bayern sowie der Europäischen Union für die Institutionelle Förderung der NMB.

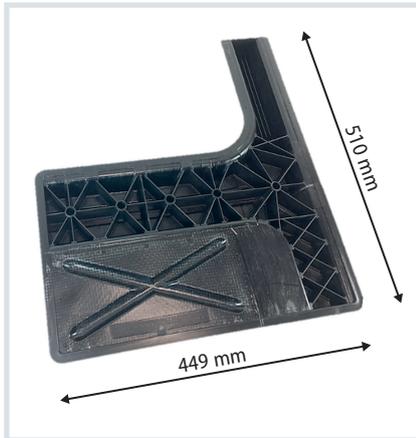
#### Literatur & Digitalversion

Das Literaturverzeichnis und ein PDF des Artikels finden Sie unter

[www.kunststoffe.de/onlinearchiv](http://www.kunststoffe.de/onlinearchiv)



**Bild 3.** Das Flussdiagramm zeigt die im Betrieb gemessenen Medienflüsse in der FORCE-Prozesskette zur Produktion von Bauteilen aus Faserverbundkunststoffen und den gewählten Untersuchungsrahmen. Quelle: NMB; Grafik: © Hanser



**Bild 4.** Demonstratorbauteil gefertigt mit Laminaten aus Gewebe-Organoblechen und UD-Tapes (CF oder GF-CF-Hybrid) © NMB

tiMat verwendet (**Bild 4**), entwickelt gemeinsam mit den Unternehmen Brose Fahrzeugteile und Rehau Automotive. Es besteht aus einem Gewebe-Organoblech und einer UD-Mehrlagenstruktur auf Basis von Polypropylen (PP). Verglichen wurde ein rein kohlenstofffaserverstärktes (CF) Bauteil mit einer kostenoptimierten, hybriden Preform aus Kohlenstoff- und Glasfasern (CF-GF-Hybrid) [7]. Für die Funktionsintegration im Spritzgießschritt wurde langglasfaserverstärktes PP verwendet. Die Preforms wurden mit der FORCE-Legetechnik hergestellt mit anschließender Formgebung und Funktionsintegration durch Spritzgießen in einem One-Shot-Prozess auf einer 25 000-kN-Spritzpresse.

### Die dominanten Faktoren für die Bilanz

In einem ersten Schritt wurde die Herstellung eines Demonstratorbauteils auf Laminatbasis lediglich bestehend aus PP-CF-UD-Tapes mittels FORCE-Prozesskette untersucht. Die Auswertung ergibt CO<sub>2</sub>-Emissionen von insgesamt 17 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalent für die funktionelle Einheit eines Bauteils. Die dominanten Beiträge zur CO<sub>2</sub>-Gesamtbilanz sind die in der Herstellung energieintensiven CF-Tapes sowie der Verarbeitungsschritt des Tapelegens. Bei der Tapelegeanlage dominiert der Energieverbrauch aus den Legesystemen, die mit Unterdruck arbeiten. Zu berücksichtigen ist dabei, dass die FORCE-Placement-Anlage für großflächige Lamine bis 1500 mm x 1500 mm ausgelegt ist, bei dem untersuchten Bauteil jedoch lediglich ein Viertel der

möglichen Legefläche ausgenutzt wurde. Eine Legeanlage für ein Serienbauteil wäre hingegen optimal auf die spezifische Bauteilgröße angepasst. Daher wurde im nächsten Schritt die Tapelegeanlage für das Bauteil optimiert und der Legeprozess in einem separaten Projekt auf Optimierungspotenziale untersucht.

### Optimierung des Tapelegens mit digitalem Zwilling

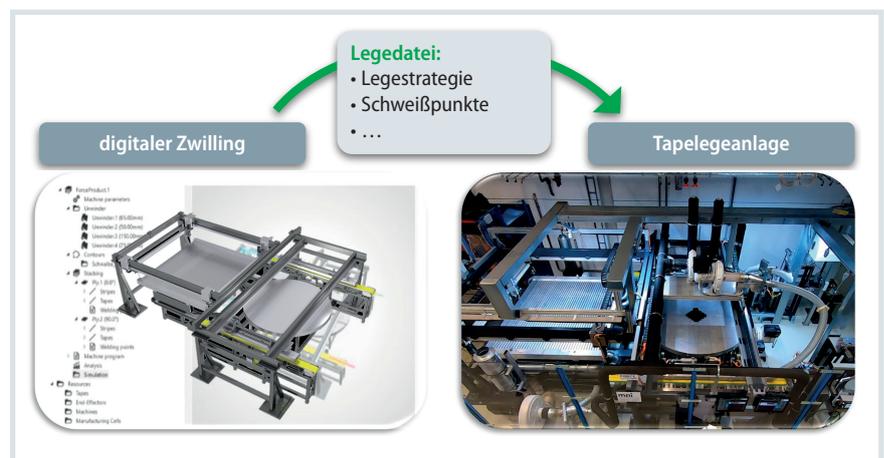
Der größte Einfluss auf die Umweltauswirkungen eines Leichtbauteils wird in den frühen Phasen der Produktentwicklung genommen. Durch Prototyping und Produktionsbeginn steigt zwar die Datenqualität für eine Nachhaltigkeitsbetrachtung, da Werkstoffe festgelegt sind und Energieverbräuche in der Produktion exakt erfasst werden können. Das Ergebnis lässt sich somit gut bewerten. Jedoch kann es an diesem Punkt kaum noch beeinflusst werden. Daher bieten digitale Tools wie digitale Zwillinge inzwischen die Möglichkeit, nicht nur das Bauteil, sondern auch den Herstellungsprozess in den frühen Phasen der Produktentstehung zu simulieren und auf Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit zu optimieren.

Für den Prozess des Tapelegens hat die NMB mit ihrem Partner SWMS Systemtechnik Ingenieurgesellschaft im Projekt OptiTape die Legesoftware CAESA um den digitalen Zwilling der FORCE-Placement-Tapelegeanlage erweitert (**Bild 5**). Damit wird vorab der komplette Legeprozess simuliert und visualisiert. Als Input können die Variablen Laminatde-

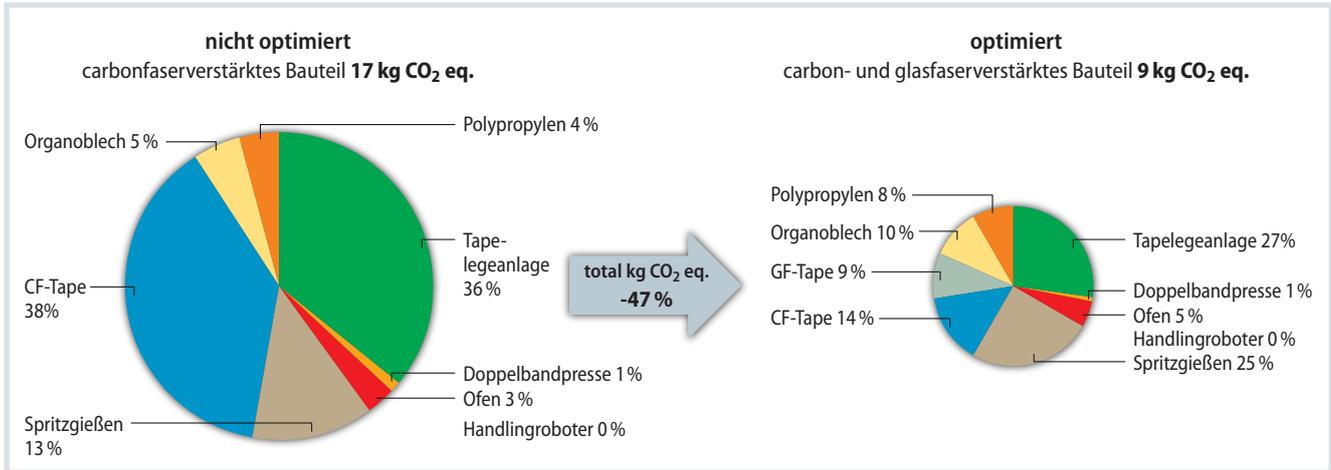
sign, Tapeeigenschaften (etwa Preis, CO<sub>2</sub>-Footprint der Halbzeuge, Breite), zulässige Toleranzen, Schrägschnitt und eine auf einem Algorithmus basierende Optimierungsstrategie gewählt werden. Je nach gewünschtem Ziel stehen verschiedene Optimierungsalgorithmen zur Verfügung. Es kann nach Emissionen, Kosten oder Legezeit optimiert werden. Dabei wird für das vorgegebene Laminatdesign die optimale Legestrategie ermittelt, visualisiert und validiert. Falls die UD-Tapes noch nicht in einer bestimmten Breite vorliegen, weil beispielsweise eine Mutterspule direkt aus der Produktion zur Verfügung steht, kann die Software auch optimale Tapebreiten für das Schneiden der Mutterspule ermitteln. Die Legeanlage kann parallel zwei verschiedene Tapebreiten verarbeiten oder Werkstoffe in eine Preform legen. Abschließend werden für jedes Bauteil die Legedauer, Ressourcenverbräuche und der Verschnitt angegeben.

### Optimierung der CO<sub>2</sub>-Bilanz für das Demonstratorbauteil

Für die Optimierung der CO<sub>2</sub>-Bilanz wurden zwei Wege verfolgt: Einerseits die Anpassung des Materialmix im Bauteil (Lagenaufbau) und andererseits die energetische Optimierung des Tapelegeprozesses. Beide Faktoren tragen wesentlich zu den Emissionen des reinen CF-Bauteils bei. Beim Lagenaufbau kann durch schmalere Tapes der Verschnitt reduziert werden. Jedoch führt das zu einer längeren Maschinenbelegungszeit und damit auch zu einem höheren



**Bild 5.** Der digitale Zwilling der FORCE-Placement Tapelegeanlage auf Basis der CAESA-Software ermöglicht Optimierungen hinsichtlich Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit in der frühen Produktphase. Quelle: NMB; Grafik: © Hanser



**Bild 6.** Durch den Ersatz der CF-Tapes durch GF-CF-Hybrid-Varianten und die energetische Optimierung des Herstellungsprozesses lässt sich der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck des Demonstratorbauteils um insgesamt 47 % reduzieren. Das Beispiel verdeutlicht das große Einsparpotenzial durch Anpassungen bei den Materialien und der Herstellung. Quelle: NMB; Grafik: © Hanser

Energieverbrauch der Tapelegeanlage, da sich die Nutzungszeit des Vakuumsystems verlängert. Wirtschaftlich wie auch ökologisch ist die optimale Tapebreite ein Kompromiss zwischen geringstem Verschnitt und kürzester Maschinenlaufzeit. Für eine optimierte Ressourceneffizienz des Bauteils wurde die Lagenstruktur durch einen GF-CF-Hybridbau optimiert [7]. Während im Ausgangslaminat nur mit CF-Tapes verstärkt wurde, reduziert sich dadurch der Anteil an CF-Tapes auf 16 Gew.-%. Der Rest sind GF-Tapes. Die CF-Tapes werden dabei nur an den hochbelasteten Lastpfaden im Bauteil eingesetzt. Dadurch sinken die Materialkosten um 50 %, die Legezeit um 18 %, während das Bauteilgewicht um 16 % steigt und die Bauteilsteifigkeit je nach Lastfall um 10 bis 30 % vermindert wird.

Ergänzend zur Materialsubstitution wurden von der NMB erste energetische

Optimierungen an der Tapelegeanlage durchgeführt. Die Unterdrucksysteme werden nur noch in den benötigten Bereichen eingesetzt. Außerdem kann bei Tapes mit geringen Eigenspannungen weniger Unterdruck für das Ansaugen der Tapes verwendet werden. Ergänzend kann auf dem großen Legetisch ein Nesting für den Aufbau von bis zu vier parallelen Preforms erfolgen. In Summe ließen sich dadurch die CO<sub>2</sub>-Äquivalente je Bauteil um 47 % von 17 auf 9 kg senken (**Bild 6**). Nach den Optimierungen dominieren den Energieverbrauch im Prozess nun die Tapelegeanlage mit 27 % und die Spritzpresse mit 25 % gefolgt von den CF-Tapes mit 14 %. Vergleicht man die addierten Anteile an den CO<sub>2</sub>-Emissionen, tragen die Werkstoffe durch ihre Herstellung mit 41 % und die Verarbeitung mit 58 % zu den Gesamtemissionen des Leichtbauteils bei. Daraus lässt sich für weitere Forschungsar-

beiten das klare Ziel ableiten, die Overmolding-Prozesskette energetisch weiter zu optimieren, um den CO<sub>2</sub>-Verbrauch von Leichtbauteilen in der Produktion zu minimieren.

Die Ergebnisse zeigen, dass zur Minimierung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks von Leichtbauteilen auf Basis von thermoplastischen UD-Tapes, zwei wesentliche Punkte zu beachten sind: Materialeinsparpotenziale (Verschnitt, lastangepasste Hybridstrukturen) müssen konsequent genutzt und der Fertigungsprozess energetisch optimiert werden. Die Kombination aus digitalem Zwilling und LCA-Modell des Herstellungsprozesses ermöglicht es bereits früh in der Bauteilentwicklung, ökonomische und ökologische Aspekte zu optimieren. Die NMB unterstützt interessierte Firmen bei der Entwicklung von maßgeschneiderten Lösungen für nachhaltigere FVK-Leichtbaustrukturen. ■



## ONLINE Kunststoff Bibliothek

- ↳ Schneller Zugriff auf Fachinformationen
- ↳ Mit Volltextsuche
- ↳ 24/7 verfügbar

[www.kunststoff-bibliothek.de](http://www.kunststoff-bibliothek.de)