

# SPECIAL: POLYURETHANSYSTEME

[FAHRZEUGBAU] [MEDIZINTECHNIK] [VERPACKUNG] [ELEKTRO&ELEKTRONIK] [BAU] [KONSUMGÜTER] [FREIZEIT&SPORT] [OPTIK]

## Leicht und stabil auf Sand gebaut

### *Serienfertigung von komplexen strukturellen Hohlbauteilen*

Für Hochleistungsanwendungen in Luft- und Raumfahrt sowie im Motorsport sind strukturelle Faserverbundbauteile heutzutage nicht mehr wegzudenken. Die höchste Leichtbaugüte erreichen dabei integral gefertigte Hohlbauteile ohne Kern. Um komplexe Faserverbund-Hohlbauteile zukünftig im automatisierten HP-RTM-Prozess großserientechnisch zu fertigen, war ein entscheidender Entwicklungsschritt zur Industrialisierung nötig.



Mit dem Ziel, die neue Cavus-Produktionstechnologie in die Serienproduktion zu überführen, entwickelte ein internationales Team im Projekt R.A.C.E. (siehe Kasten auf S. 24) ein Faserverbund-Hohlbauteil von Grund auf bis zur Serienproduktion. Als Demonstratorbauteil wurde der Kennzeichenträger der KTM Superduke 1290R (Bild 1) gewählt. Er muss hohen Anforderungen an die Steifigkeit genügen, um den enormen Belastungen im Betrieb standzuhalten. Das serienmäßig hergestellte Strukturbauteil besteht aus einer Spritzgießkomponente mit Metallverstärkung.

Die Hohlbauweise spart einerseits Gewicht ein und dient andererseits dazu, die Kabel für Blinker und Kennzeichenbeleuchtung im Inneren zu befestigen und zu schützen. In herkömmlicher Bauweise in Spritzgießverarbeitung wiegt der Kennzeichenträger 765 g; mit der Cavus-Technologie gefertigt dagegen nur noch 265 g, also 62% weniger. Die Hohlbauweise substituiert dabei zahlreiche Einzelteile und reduziert so die Zahl der Montageschritte.

### *Der Cavus-Produktionsprozess*

Cavus (lat. hohl, gewölbt) steht für eine neuartige Fertigungstechnologie, die bekannte und bewährte Prozesse vereint, um strukturelle und komplex geformte Bauteile zu fertigen. Das Bauteil wird dabei integral gefertigt, um das Maximum an mechanischen Eigenschaften zu erreichen und ein späteres Fügen zweier Hälften zu vermeiden. Dies gelingt durch einen auflösbaren Sandkern, der als zentraler Bestandteil dieser Technologie gilt

**Bild 1.** Im Projekt R.A.C.E., das auf der Cavus-Technologie basiert, wurde ein Kennzeichenträger für das Motorrad KTM Superduke 1290R als Demonstratorbauteil für die Großserienfertigung entwickelt (© Hennecke)



**Bild 2.** Cavus-Produktionszyklus (im Uhrzeigersinn von links): Der (z. B. additiv gefertigte) Sandkern wird mit Kohlenstofffasern beflochten und im Werkzeug im HP-RTM-Verfahren infiltriert. Nach dem Aushärten lässt sich der Kern mit Wasser herauslösen (© KTM Technologies)

(Bild 2). Zu seiner Herstellung lassen sich, je nach Seriengröße, unterschiedliche Fertigungsverfahren nutzen:

- Für Serien bis 10000 Stück können die Kerne mittels Binder-Jetting-Verfahren additiv gefertigt werden.
- Bei höheren Stückzahlen zeichnet sich die aus der Gießerei-branchen bekannte Kernschussmethode durch eine höhere Wirtschaftlichkeit gegenüber der additiven Fertigung aus.

Eine Versiegelung mit loseal schützt den Kern gegen das Eindringen der Matrix im HP-RTM-Prozess (High-Pressure Resin Transfer Molding).

Zum Aufbringen der Kohlenstofffasern auf den Kern nutzt die Cavus-Technologie ein automatisiertes Flechtverfahren. Dabei führt ein Roboter den in einer Spannvorrichtung fixierten Kern durch ein Flechtrad. Dank der vielfältigen Variationsmöglichkeiten unterschiedlicher Fasertypen und Flechtparameter lassen sich hierbei die gewünschten Eigenschaften des späteren Bauteils bestmöglich einstellen. Zudem zeichnet sich das Flechtverfahren durch eine endkonturnahe Faserablage sowie höchste Materialausnutzung aufgrund des geringen Faserverschnitts aus.

Nach dem Beflechten wird die Preform in das Werkzeug eingelegt und mittels HP-RTM-Verfahren mit einer Matrix infiltriert. Als Matrixmaterialien können dafür beispielsweise Polyurethanharze oder Epoxidharzsysteme verwendet werden. Bei Temperaturen zwischen 90 und 150 °C und Werkzeuginnendrücken bis zu 200 bar härtet das jeweilige System in ca. 60 s aus. Die wesentlichen Vorteile dieser Produktionstechnologie liegen in der nahezu unbegrenzten Gestaltungsfreiheit der Bauteile. Eine additive Fertigung des Kerns erlaubt es, komplexe Geometrien mit großen Durchmesseränderungen und Hinter schnitten zu fertigen.

Seine Besonderheit zeigt der Kern auch nach der Infiltration des Geflechts mit der Matrix. Nach dem Auftrennen des entformten Bauteils an den Beschnittkanten kann der Kern ohne erhöhten Energieaufwand im Wasserbad ausgelöst werden. Der Sand setzt sich in der Lösung ab und lässt sich nach dem Trocknen vollständig für neue Kerne wiederverwenden. Je nach Materialkombination sind bis zu 98 % des Kerns wiederverwendbar und die entstehende Lösung ist nicht toxisch. Das in der Lösung befindliche Bindemittel lässt sich entweder als Brauchwasser entsorgen oder abgeschieden sogar als Düngemittel für die Landwirtschaft einsetzen.

Nach dem Herauslösen des Sandkerns kann das Faserverbundbauteil wie üblich nachbearbeitet und abschließend am Fahrzeug montiert werden.



**Bild 3.** Design-Sketches des Kennzeichenträgers (© Kiska)

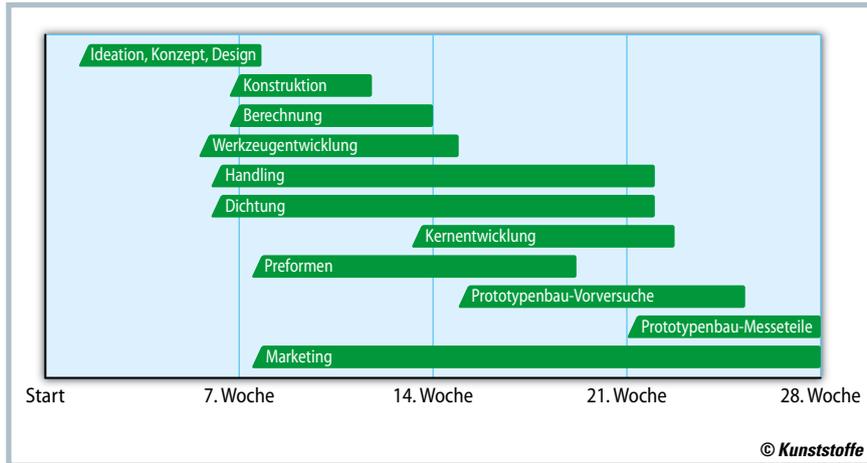
### Ideen für ein funktionales, prozessfähiges Design

Kiska-Designer und Experten von KTM Technologies nutzten für den Kennzeichenträger den Ansatz des „Inside Out Design“. Erste Handzeichnungen auf Papier (Bild 3) bildeten dabei die Grundlage für den parallel startenden Entwicklungsprozess (Bild 4), der Aspekte wie Bauraum, Anbindungskonzept und Herstellbarkeit des Bauteils von Anfang an berücksichtigte. Die dank der Cavus-Technologie entstandenen Gestaltungsmöglichkeiten des Bauteils inspirierten die Designer zu neuen Ideen für die Funktionsintegration und trieben die Ingenieure an die Grenzen des Machbaren.

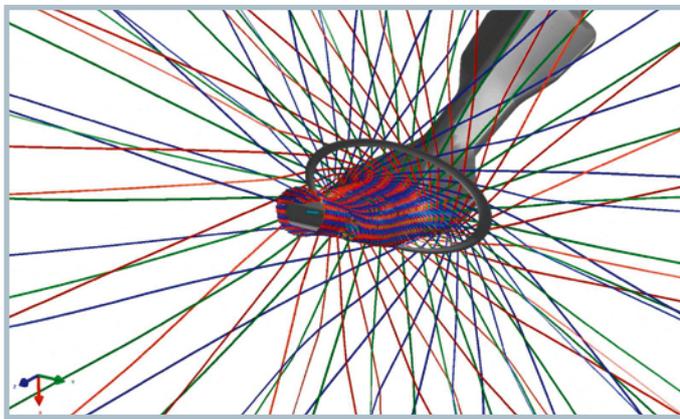
Neben der Ideenfülle musste der Fokus in dieser Phase aber auch auf prozessfähiges Design gelegt werden. So limitiert der Kern beispielsweise Durchmesser und Eckradien. Je größer die Durchmesseränderung über die Bauteillänge, desto höher sind auch die Anforderungen an den Preformprozess. Eine Faserwinkeländerung kann zu einer ungleichmäßigen Wanddickenverteilung führen, zu kleine Eckradien rufen die Gefahr hervor, dass Fasern an den Krümmungen abgleiten und von den scharfen Kanten des Kerns beschädigt werden. Somit ist eine enge Abstimmung zwischen Design und Entwicklung in mehreren Zyklen stets die Grundlage für eine erfolgreiche Umsetzung.

### Bauteilstruktur und Flechtvorgänge simulieren

Um die Prozessfähigkeit bereits in der frühen Projektphase sicherzustellen, nutzten die Ingenieure vom Institut für Flugzeug- ➤



**Bild 4.** Simultaneous Engineering: Bereits vor der Fertigstellung des finalen Designs arbeiteten die 21 Spezialisten der acht Partner an weiteren Aufgaben wie Detailkonstruktion, Berechnung, Werkzeugentwicklung, Dichtungstechnik und Prozessautomatisierung (Quelle: KTM Technologies)



**Bild 5.** Aufwendige Simulationen: Eine Flechtsimulation braucht viele Ressourcen, zeigt aber früh Problemzonen auf und gibt den Weg vor, auf dem der Roboter den Kern durch das Flechtrad führt (© IFB Stuttgart)

bau (IFB) der Universität Stuttgart diverse Simulationswerkzeuge. Nachdem sie erste Sketches in die CAD-Software überführt hatten, ergaben Struktursimulationen des Bauteils eine erste Abschätzung der benötigten Anzahl an Flechtvorgängen. Eine Flechtsimulation (**Bild 5**) lieferte im nächsten Schritt Erkenntnisse darüber, welche Faserwinkel sich ergeben und ob strukturelle Schwachstellen auftreten. So wurde das Design in kritischen Bereichen optimiert und somit im weiteren Verlauf wertvolle Zeit eingespart. Die Simulation benötigt viel Ressourcen und Rechenzeit: Die erste Iteration dauerte knapp eine Woche – ein Aufwand, der sich jedoch lohnt, denn die Ergebnisse verkürzen die Zeit für das Einfahren der weiteren Prozesse erheblich. Ein weiterer wesentlicher Vorteil der Flechtsimulation ist, dass sie bereits den Weg vorgibt, auf dem der Roboter den Kern durch das Flechtrad führt. Statt ihn aufwendig zu programmieren, lässt er sich direkt in die Steuerung einspeisen.

Die spezifische Wanddickenverteilung ist ebenfalls ein wichtiges Ergebnis der Flechtsimulation. Durch detaillierte Aussagen über Flechtwinkel, Verschränkung der Fasern, Lage und Drehung der Rovings entsteht eine Dickenverteilung des Textils über die gesamte Bauteilfläche. In das CAD-Programm zurückgeführt, bildet sie die Grundlage für die Geometrie des Kerns.

Die anschließenden Füllsimulationen stützen sich vor allem auf die Ergebnisse der Flechtsimulation bezüglich Dickenverteilung und Permeabilität des Textils. Um eine ideale Werkzeugfüllung zu erreichen, gilt es, unterschiedliche Angussstrategien zu simulieren. Beim Kennzeichenträger lieferte ein Ringanguss das beste Ergebnis; auch ließ er sich außerhalb des Bauteils platzieren und unterstützte zudem das Zentrieren des Kerns im Werkzeug, sodass die Harzumflutung eine gleichmäßige Wanddickenverteilung bewirkt. Geometrische Freiheiten im Kern ließen sich nutzen, um Fließkanäle einzubringen, die die Harzfront homogenisieren und so nachteilige Fronten oder Trockenstellen mit geringem Aufwand vermeiden.

### Sandkern-Fertigung im Kernschießverfahren

Zentraler Bestandteil der Cavus-Technologie ist der 3D-gedruckte Sandkern (**Bild 6**), um den im nachfolgenden Prozessschritt die Kohlenstofffasern geflochten werden. Erste Prototypen entstehen in der Regel mithilfe der additiven Fertigung, die die Iterationsschleifen auf eine Woche verkürzen kann. Kritische Stellen, wie die umlaufenden Designkanten oder auch die Sicke oberhalb des später montierten Kennzeichens, lassen sich auf diese Weise schnell anpassen, um eine hohe optische Qualität des Bauteils zu gewährleisten. Die Geometrie des Kerns steuert auch den Faservolumengehalt und beeinflusst das Füllverhalten bei der Injektion wesentlich.

Für die Produktion der Musterteile kam als Fertigungsmethode das Kernschießen zum Einsatz, um die mit dem Projekt R.A.C.E. festgelegte Überführung zur Serienproduktion realistisch nachzustellen. Dabei wird der mit Binder beschichtete Sand mittels Druckluft in ein auf 120°C temperiertes Werkzeug geschossen. Unter fortlaufendem Nachspülen mit einem Luftstrom härtet der Binder aus und formt dadurch den druckstabilen Sandkern.

Mit einer Zykluszeit von ca. 7 min, bei einer Einfachkavität des Schusswerkzeugs, wurden Kerne mit einem Gewicht von jeweils 1870 g gefertigt und anschließend mit loseal versiegelt, auch um ihnen ausreichend Festigkeit für den Preformprozess zu geben. Je nach dem folgenden Fertigungsverfahren – HP-RTM, VARI



**Bild 6.** Cavus-Sandkern von Reinsicht (ehem. H2K Minerals), Denkendorf (© Hennecke)



**Bild 7.** Automatisiertes Beflechten des Kerns im Radialflechter

(© Hennecke)

(Vacuum Assisted Resin Infusion) oder SMC-Pressen (Sheet Molding Compound) – lassen sich unterschiedliche Materialkonfigurationen auswählen, die sich vor allem in Temperaturbeständigkeit und Kosten unterscheiden. Für das Project R.A.C.E. wurde der Kern auf eine Temperaturbeständigkeit von 330°C und eine Druckbeständigkeit von 500 bar eingestellt.

### *Verschnittarme Preformherstellung*

Mittels Flechttechnik (64 Flechtfäden aus 24k-Kohlenstofffaser-Rovings) hat das IFB das Textil auf den Kern aufgebracht (**Bild 7**). Der Kern wurde dazu anhand des in der Simulation berechneten Flechtpfads durch das Flechtrad geführt (ein Radialflechter des Typs RF 1/64-100 von Herzog). Wie fest das Geflecht dabei dem Kern sitzt, bestimmt die Federstärke in den Klöppeln. 600 g Zugkraft der Federn lieferte das beste Zusammenspiel aus Flexibilität und Festigkeit für das biaxiale Geflecht.

Um die geforderte Bauteilfestigkeit zu erreichen, wurde der Kern mit zwei Lagen (insgesamt 98 g Fasergewicht) beflochten. Die Flechttechnik zeichnet sich besonders durch eine reproduzierbare und konturnahe Faserablage aus. Da die Kohlenstofffasern nur am Anfang und Ende des Bauteils abgetrennt werden, entsteht kaum Verschnitt. Zusammen mit der hohen Automatisierbarkeit des Verfahrens ergibt sich ein hoch effizienter Prozess zur Preformherstellung.

### *Zur Polyurethanmatrix in kurzer Zykluszeit*

Wichtig für den HP-RTM-Prozess sind vor allem die Verarbeitungseigenschaften des Polyurethansystems, da bei einer Serienproduktion die Zykluszeit zählt. Zum Einsatz kam Vitrox RTM 332 von Huntsman. Mit einer für Vitrox einstellbaren „Snap-cure“-Zeit von weniger als 30 s bis zu 24 h lassen sich auch kürzeste Zykluszeiten realisieren.

Der besondere Vorteil von Vitrox liegt darin, dass sich die mechanischen Eigenschaften bei unterschiedlich eingestellten Reaktionszeiten nicht verändern. Die niedrige Viskosität von 40 mPas bleibt bis zur Reaktion nahezu konstant (**Bild 8**) und ermöglicht so eine Injektion bei niedrigen Werkzeuginnen- »

## Von Cavus zu R.A.C.E.

Um die Cavus-Produktionstechnologie zu industrialisieren, hat die Hennecke GmbH, Sankt Augustin, das Projekt R.A.C.E. (Reaction Application for Composite Evolution) ins Leben gerufen. Mit den Partnern KTM Technologies (Anif bei Salzburg/Österreich), Reinsicht (ehem. H2K Minerals, Denkendorf), Engel Austria (Schwertberg/Österreich), Huntsman (The Woodlands, Texas/USA), Murtfeldt (Dortmund), Institut für Flugzeugbau (IFB) der Universität Stuttgart und Persico (Nembro/Italien) wurde innerhalb von 28 Wochen als Demonstratorbauteil ein Kennzeichenträger für das Motorrad KTM Superduke 1290R entwickelt. Wegen des engen Zeitrahmens arbeiteten die 21 Spezialisten mit der Simultaneous-Engineering-Methode (Bild 4).

## Der Autor

**Michael Wilhelm**, development & application technology, Hennecke GmbH, Sankt Augustin;  
michael.wilhelm@hennecke.com

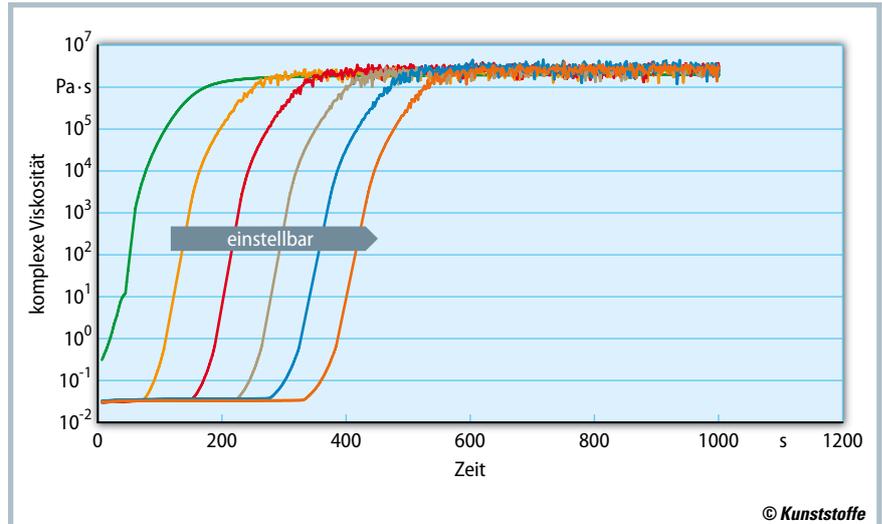
## Service

### Digitalversion

➤ Ein PDF des Artikels finden Sie unter  
[www.kunststoffe.de/4430672](http://www.kunststoffe.de/4430672)

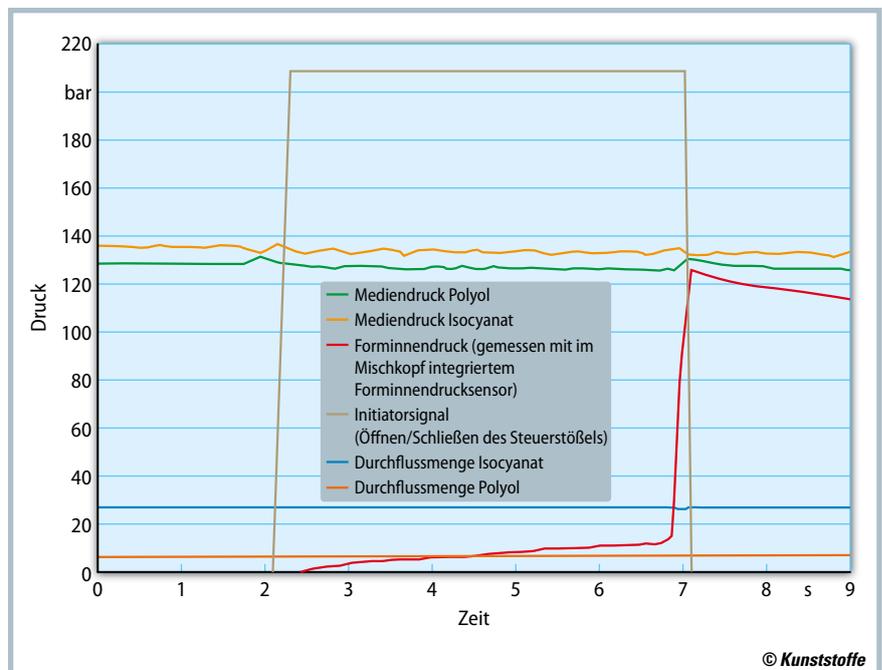
### English Version

➤ Read the English version of the article in our magazine *Kunststoffe international* or at [www.kunststoffe-international.com](http://www.kunststoffe-international.com)



**Bild 8.** Rheologieverläufe von Vitrox RTM332 bei unterschiedlichen „Snap-cure“-Zeiten

(Quelle: Huntsman)



**Bild 9.** Gleichdruckdüsen verhindern, dass der Formeninnendruck (rot) auf Komponentendrucke (grün/gelb) einwirkt (Quelle: Hennecke)

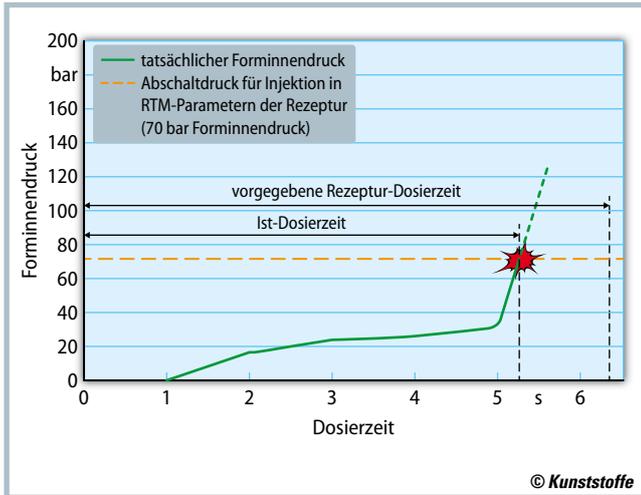
drücken und eine hervorragende Durchtränkung der Fasern. Die hohe Schlagzähigkeit und Dehnbarkeit des Materials erfüllen die Anforderungen des Bauteils.

### HP-RTM-Fertigung mit neuem Mischkopf

Die Serienproduktion von Faserverbundbauteilen im HP-RTM-Prozess ist bereits seit einigen Jahren verbreitet. Weil das Verfahren vollständig automatisierbar ist, lassen sich hohe Stückzahlen bei wettbewerbsfähigen Kosten umsetzen. Besonders die hohe und konstante Bauteilqualität ist ein entscheidendes Argument für den Einsatz dieses Verfahrens. Im Project R.A.C.E. bilden eine vertikal schließende Presse mit 4000 kN Schließkraft (Typ: elast 400V compact von Engel) mit kleiner Stellfläche und

eine Hennecke-Dosiermaschine (Typ: Streamline von Hennecke) für die beiden Komponenten Polyol und Isocyanat das Anlagen-Set-up. Die Presse zeichnet sich nicht nur durch eine kleine Stellfläche aus, sondern verfügt zudem über eine integrierte Kommunikation mit Dosiermaschine und Roboter, sodass sich der gesamte Prozess über eine Anlage steuern lässt. Die Temperierung der gesamten Anlage inklusive der Schlauchpakete durch Rezirkulation der Komponenten stellt eine konstante Temperatur sicher. Über einen dritten Strang lässt sich zudem ein homogenisiertes Trennmittel injizieren.

Für das Vermischen der Komponenten setzt Hennecke seinen neu entwickelten Mischkopf MN10-3 RTM ein. In ihm werden die Komponenten bei Mischdrücken von rund 150 bar vermischt, bevor sie in das Werkzeug gelangen. Weil er ein konisches Aus-



**Bild 10.** Intelligent mold filling: Die vermischten Komponenten werden in die Form injiziert, bis der Vorgang druckgesteuert abschaltet (Quelle: Hennecke)

laufrührer mit integriertem Werkzeuginnendrucksensor besitzt, lässt sich der Hochdruckmischkopf auch für halbautomatisierte Andockvorgänge einsetzen. Um dem Polymerisationsschrumpfen entgegenzuwirken, bietet der selbstreinigende Stößel zudem die Funktion, während des Aushärtens der Matrix hydraulisch gesteuert nachzudrücken. So lassen sich höchste Oberflächenqualitäten erreichen. Eine weitere Besonderheit des Mischkopfs ist die serienmäßige Bestückung mit den patentierten Gleichdruckdüsen, die verhindern, dass der Forminnendruck auf den Druckverlauf der Komponenten einwirkt (**Bild 9**).

### Parameter für das Projekt

Nach dem Einlegen der Preform in das Werkzeug wird ein Vakuum aufgebaut, um die Restluft im Werkzeug abzusaugen und so die Porenfreiheit des Bauteils sicherzustellen. Nach wenigen Sekunden ist der für den Prozess notwendige Absolutdruck von 50 mbar im Werkzeug erreicht und die Injektion startet. Mit konstantem Volumenstrom fließen die vermischten Komponenten in die Form, bis der Vorgang bei 70 bar abschaltet (**Bild 10**). Dabei werden für das ausgewählte Bauteil nach etwa 5 s Injektionszeit 208 g Schussgewicht erreicht. Die druckgesteuerte Abschaltung »



**Bild 11.** Automatisierte Entnahme des fertigen Bauteils aus dem Werkzeug (© Hennecke)

**Bild 12.** Hybrider Kennzeichenträger aus Glasfasern mit Kohlefaserverstärkung, eingebracht mittels Tailored Fiber Placement (TFP) (© Hennecke)



tung kompensiert Toleranzen in Kern und Preform. Das Vakuum wird entweder nach einer vorab ausgewählten Dauer oder – für eine erhöhte Bauteilqualität – in Abhängigkeit des Werkzeugfüllgrads abgeschaltet.

### Hohe Anforderungen an die Werkzeugtechnik

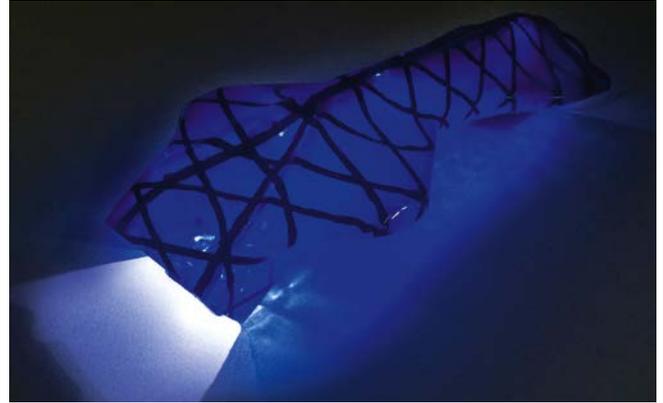
Die Verwendung hochreaktiver Kunststoffe bei Werkzeuginnendrücken bis maximal 200 bar stellt hohe Ansprüche an die Werkzeugtechnik. Einerseits muss das Werkzeug hohe Standzeiten bei der Verwendung der abrasiven Kohlefasern bieten, andererseits eine gleichbleibend hochpolierte Oberfläche garantieren. Nur so lassen sich qualitativ hochwertige Bauteile herstellen. Für die automatisierte und prozesssichere Ablage des Preforms und die anschließende Entnahme des fertigen Bauteils (Bild 11) sind zudem mehrere Auswerfer nötig. Zur Prozessüberwachung sind mehrere Temperatur- und Drucksensoren im Werkzeug verbaut.

Die Temperierung des Werkzeugs auf die geforderte Prozess-temperatur von 100 °C erfolgt durch die Heizplatten der Presse, lokal unterstützt durch elektrische Heizpatronen, die eine homogene Temperatur über die gesamte Bauteilfläche garantieren. So kann die Matrix in der Kavität gleichmäßig aushärten. Diese Anforderungen setzte der Werkzeugbauer Persico um.

### Neuartiges Dichtungsmaterial

Bei durchschnittlichen Werkzeuginnendrücken von rund 100 bar muss auch die Dichtung hohen Anforderungen gerecht werden. Dafür wurde das neuartige Dichtmaterial Murlock von Murfeldt verwendet. Der thermoplastische Kunststoff bietet die erforderliche Dichtwirkung bei mehreren hundert Prozesszyklen. Im Vergleich zu herkömmlichen Rundschnur-Dichtungen ist das Material resistent gegenüber Beschädigungen durch Restmaterialien oder Carbonfasern und dabei auch chemisch inert gegenüber reaktiven Harzsystemen wie PUR oder EP.

Neben der umlaufenden Dichtung im Werkzeug wurde auch die Abdichtung der Auswerfer mit eigens entwickelten Murlock-Normalien gelöst, die sich bei Vorversuchen bis 260 bar dicht gegenüber einem auf 90 °C temperierten Medium mit 15 mPas Viskosität erwiesen. Das Material ist bis zu Prozess-temperaturen von 200 °C einsetzbar und die Dichtung lässt sich einfach herstellen: Entweder durch Fräsbearbeitung oder – daran arbeitet Murfeldt derzeit – voraussichtlich bald im 3D-Druck.



**Bild 13.** Funktionalisierter, hybrider Kennzeichenträger mit blau eingefärbter Matrix und in die Preform integrierten LEDs (© KTM Technologies)

### Ergebnis: Fast zwei Drittel leichter

In nur 28 Wochen realisierten die Spezialisten der acht Projektpartner, beginnend mit Handskizzen auf Papier, die automatisierte Produktion eines Serienteils, die live auf der K-Messe 2016 gezeigt wurde. Eine Part-to-Part-Zykluszeit von 125 s und eine Gewichtsreduzierung von über 62 %, bei gleichzeitiger Aufwertung des Produkts, sprechen für das Projekt. R.A.C.E. zeigt daher, wie auf Basis der Cavus-Technologie durch gemeinsame Anstrengungen hoch spezialisierter Projektpartner ein entscheidender Entwicklungsschritt in der Serienfertigung von Faserverbund-Hohlbauteilen gelingen kann.

### Weitere Entwicklungen im Projekt R.A.C.E.

Durch stetige Weiterentwicklung der Fertigungstechnologie wurden auch Aspekte wie Hybridbauweise, Bauteilfunktionalisierung und -überwachung weiter verfolgt. Die neuesten Entwicklungen zeigen sich in einem Kennzeichenträger, der durch das TFP-Verfahren (Tailored Fiber Placement) strukturoptimiert wurde. Die Lastpfade wurden mit Kohlenstofffasern verstärkt, wohingegen die weniger belasteten Bauteilbereiche durch Glasfasern ersetzt wurden (Bild 12). Somit lassen sich die Bauteilkosten, bei gleichzeitig verbesserten Steifigkeitswerten, signifikant reduzieren.

Auch der Kern wird stetig weiterentwickelt, um Druckstabilität, Temperaturbeständigkeit sowie die Auflösezeit optimal für das gewünschte Fertigungsverfahren auswählen zu können. Dabei stehen für HP-RTM, RTM, VARI und einige weitere Verfahren bereits passende Lösungen zur Verfügung.

Besonders interessant sind die Funktionalisierung und Überwachung des Bauteils. Durch die Integration von Leuchtdioden in die Preform kann das Bauteil auch beleuchtet werden. Die Leuchtdioden sind selbst bei den hohen Drücken im HP-RTM-Prozess prozesssicher verarbeitbar. Zusammen mit einer eingefärbten Matrix ergeben sich daraus viele neue Designfreiheiten (Bild 13).

Das Einbringen von Sensoren in das Textil, beispielsweise zur Überwachung der Spannungen im Bauteil, kann über das Einbringen eines TFP-Patches oder das Einflechten von speziellen Fasern im Preformprozess erfolgen. Dadurch ist eine Überwachung des Bauteils über die gesamte Lebensdauer möglich. ■