

Einstufige Vorrichtung für die UV-induzierte Härtung einer CFK-Einzelschicht (© R. Hofmann)

Superhirn im Ablegekopf

Additive Fertigung von carbonfaserverstärkten Bauteilen mit UV-Strahlung

Die Herstellung von carbonfaserverstärkten Kunststoffbauteilen für den automobilen Serieneinsatz muss schnell und günstig sein. Ideal dafür wäre ein einstufiges Verfahren. Im Rahmen einer Potenzialstudie wurde eine selektive Faserablage-Einrichtung untersucht, die Faserablage, Harzinjektion und Aushärtung in einem einzigen Prozessschritt kombiniert – mit Auftragsgeschwindigkeiten von bis zu 1 m/s.

Nachfrage und Bedarf an carbonfaserverstärkten Kunststoffen (CFK) stiegen in den letzten Jahren stetig an. Besonders die Automobil- und Luftfahrtindustrie setzt bei bestimmten Bauteilen auf Faserverbundstoffe, da diese im Gegensatz zu Metallen deutliche Gewichtsersparungen (30–50%) bei vergleichbaren mechanischen Eigenschaften ermöglichen [1]. Die Materialeffizienz drastisch zu erhöhen, ist eine zwingende Voraussetzung für die Weiterentwicklung neuer Faserverbundtechnologien. Ebenso gilt es, ein optimiertes Niveau an Leichtbau durch die freie Faserorientierung, lokale Verstärkungen, topologische Geometrieoptimierung und Insertanbindung wie beispielsweise Verschraubungen durch abgelegte, schlaufenförmige Carbonfasern zu realisieren.

Gegenwärtig sind Entwicklung und Einsatz von CFK weitestgehend auf rein thermische Aushärtungsprozesse beschränkt [2]. Die genannte Forderung nach einem deutlich kostengünstigeren Fertigungsprozess als bekannte Verfahren wie Resin-Transfer-Molding (RTM), Nasspressen etc. muss die additive Fertigung aufgreifen. Dafür sollte sie Ablegegeschwindigkeiten von 0,06 m/s bis zu 1 m/s realisieren und damit die gegenwärtigen noch sehr hohen Herstellkosten reduzieren. Die online-Teilaushärtung von Laminatschichten mittels Strahlung für Belichtungszeiten von 30 ms bis 500 ms war bisher bei thermisch induzierten Aushärteprozessen nicht möglich. Die strahlungsinduzierte Härtung via UV-Strahlung (**Titelbild**) eröffnet die Möglichkeit, Härtegrade zu generieren, die über die Dauer

der Bestrahlung definiert werden. Damit kann im Vergleich zu thermischen Reaktionsmechanismen der Reaktionsfortschritt auf einen konstanten Teilhärtungsgrad getaktet werden.

Inhalt dieses Artikels ist der erste Teil von grundlegenden Untersuchungen mit UV-Strahlung, die im Projekt MAI SFE von der Universität Augsburg in Zusammenarbeit mit der BMW AG erarbeitet wurden.

Produktionskonzept einer selektiven Faserablage-Einrichtung

Die selektive Faserablage-Einrichtung (SFE) ist ein neues additives Fertigungsverfahren (**Bild 1**), bei dem Lang- und Endlofasern mit Harz bei einer Geschwindigkeit von bis zu 1 m/s imprägniert werden.

Die Harzreaktion wird dabei geregelt gestartet sowie das konsolidierte Faser-Harz-Gemisch mit gewünschtem Gelierungsgrad im einseitigen Werkzeug ablegt. Aus Trockenfaser und Harz entsteht so in einem einzigen Produktionsschritt ein Formteil mit belastungsgerecht optimierten Faserorientierungen und lokalen Wanddicken. Basis für die wirtschaftliche Umsetzung des Verfahrens ist die konsequente Ausrichtung der Fasern, die dreidimensionale Ablage und die Vermeidung jeglichen Verschnitts. Dies ist dann möglich, wenn die mit Harz benetzte Faser lastgerecht, z. B. in Richtung der Kraftlinien, auf dem Werkzeug abgelegt und fixiert werden kann, ohne durch fertigungstechnische Restriktionen eingeschränkt zu werden. [3]

Fertigungstechnische Restriktionen nach heutigem Stand der Technik sind:

- die Funktion der Größe des Ablegekopfes, die die konturenahe 3D-Ablage limitiert,
- Reduzierung der Ablegegeschwindigkeiten an Ausschnitten,
- Brückenbildung des Rovings auf 3D-Geometrie durch mangelnde Haftung des abzulegenden Rovings auf dem Substrat oder Werkzeug.

Ausgehend vom endlosen Faserstrang, dem Roving, werden alle erforderlichen Prozessschritte durch eine robotergeführte Einheit vor der Ablage auf dem Werkzeug durchgeführt. Dazu gehören das Fördern und Spreizen der Faser sowie die Harzimpregnierung mit Faservolumengehaltseinstellung. Die Aushärtung und Teilaushärtung des imprägnierten Carbonfaser-Tapes (b-stage) erfolgt über einen strahlungsbasierten Ansatz. Komplexe Anlagen wie Pressen werden nicht mehr benötigt. Die Verbindung der Lagen erfolgt beim Ablegen mit Anpressdruck, die finale Aushärtung durch den Temperprozess.

Prozessschritte bisheriger Techniken, wie das Herstellen von Gelegen, die Stackherstellung, das Preformen und die Harzinjektion sind nicht mehr nötig. Nicht zu unterschätzen sind die Aufwendungen für die Logistik und den Transport, die hierdurch entfallen. Der Materialeinsatz kann gegenüber dem aktuellen Produktionssystem RTM gravierend reduziert werden (Bild 1). Der Anlageninvest pro Anlage ist deutlich reduziert (keine Presse, keine Preformanlage, keine Stackanlage), aber kürzere Zykluszeit und »

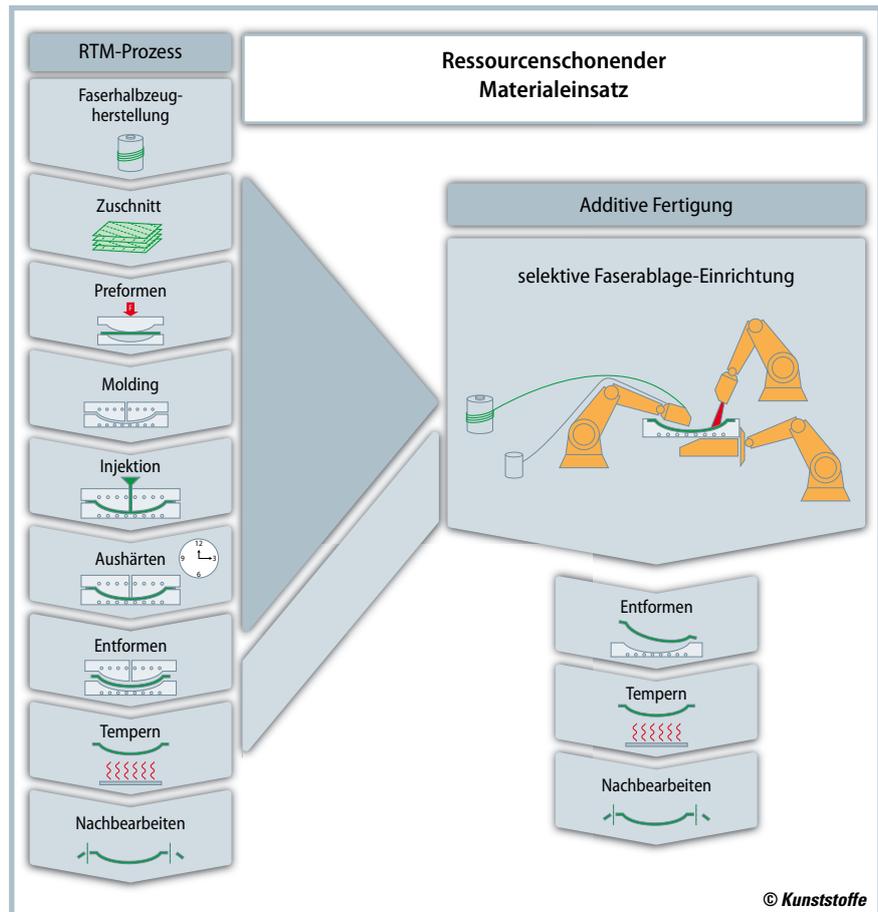


Bild 1. Gegenüberstellung der CFK-Herstellungsverfahren RTM und SFE: Vom Roving direkt zum Bauteil (Quelle: R. Hofmann)

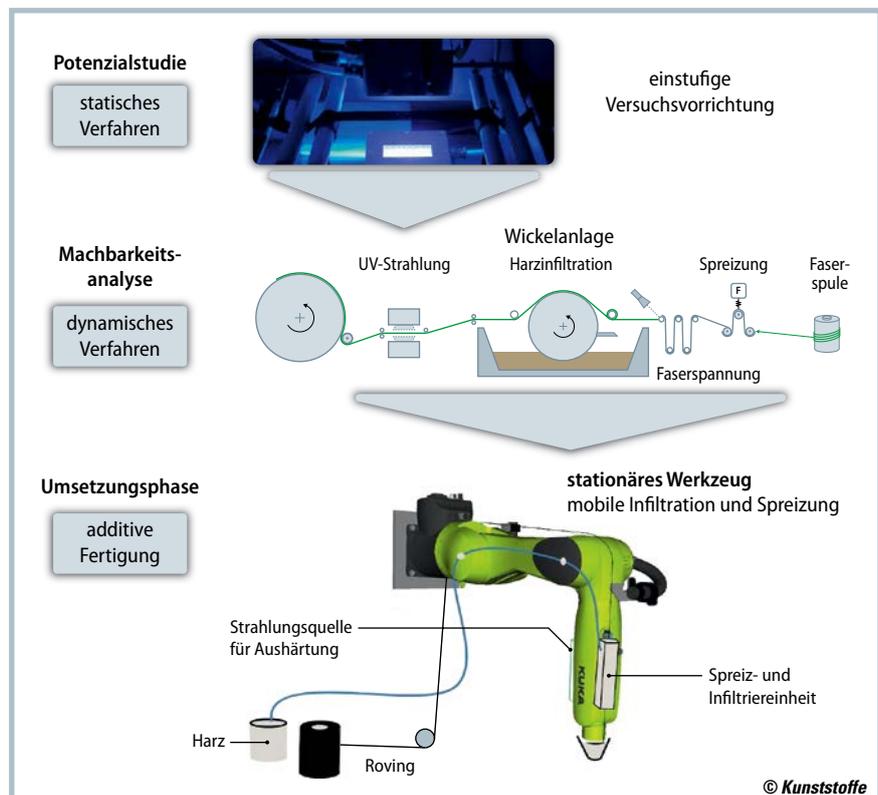
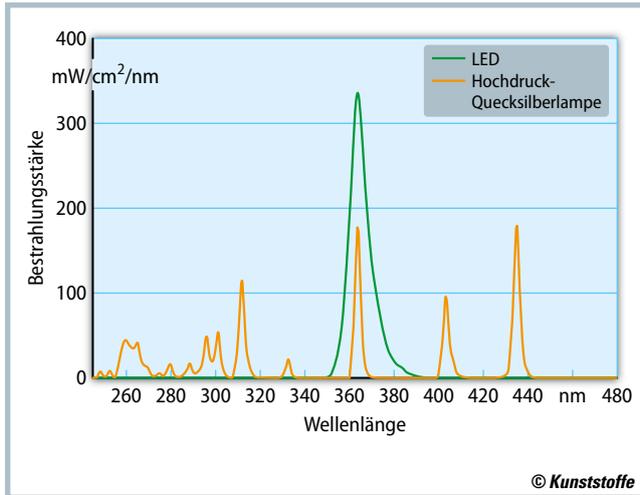


Bild 2. Aufbau der Versuchskette vom statischen über das dynamische Verfahren bis zur additiven Fertigung (Quelle: R. Hofmann)

Bild 3. Vergleich der emittierenden Wellenlänge einer beispielhaft ausgewählten Quecksilber- und UV-LED- Lampe

(Quelle: R. Hofmann)



vermehrter Einsatz von Robotern, Industrialisierbarkeit durch kurze Prozesskette, Sensorik und Regelkreise sind umsetzbar. Ein weiteres Potenzial liegt in der höheren Integration und im Verzicht auf Bearbeitungsprozesse.

Generische Vorgehensweise

Da der beschriebene SFE-Ansatz noch weitgehend unerforscht ist, wurde eine generische Vorgehensweise gewählt, die sich in eine Potenzialstudie, eine Machbarkeitsstudie sowie eine Umsetzungsphase unterteilen lässt. In jeder Phase

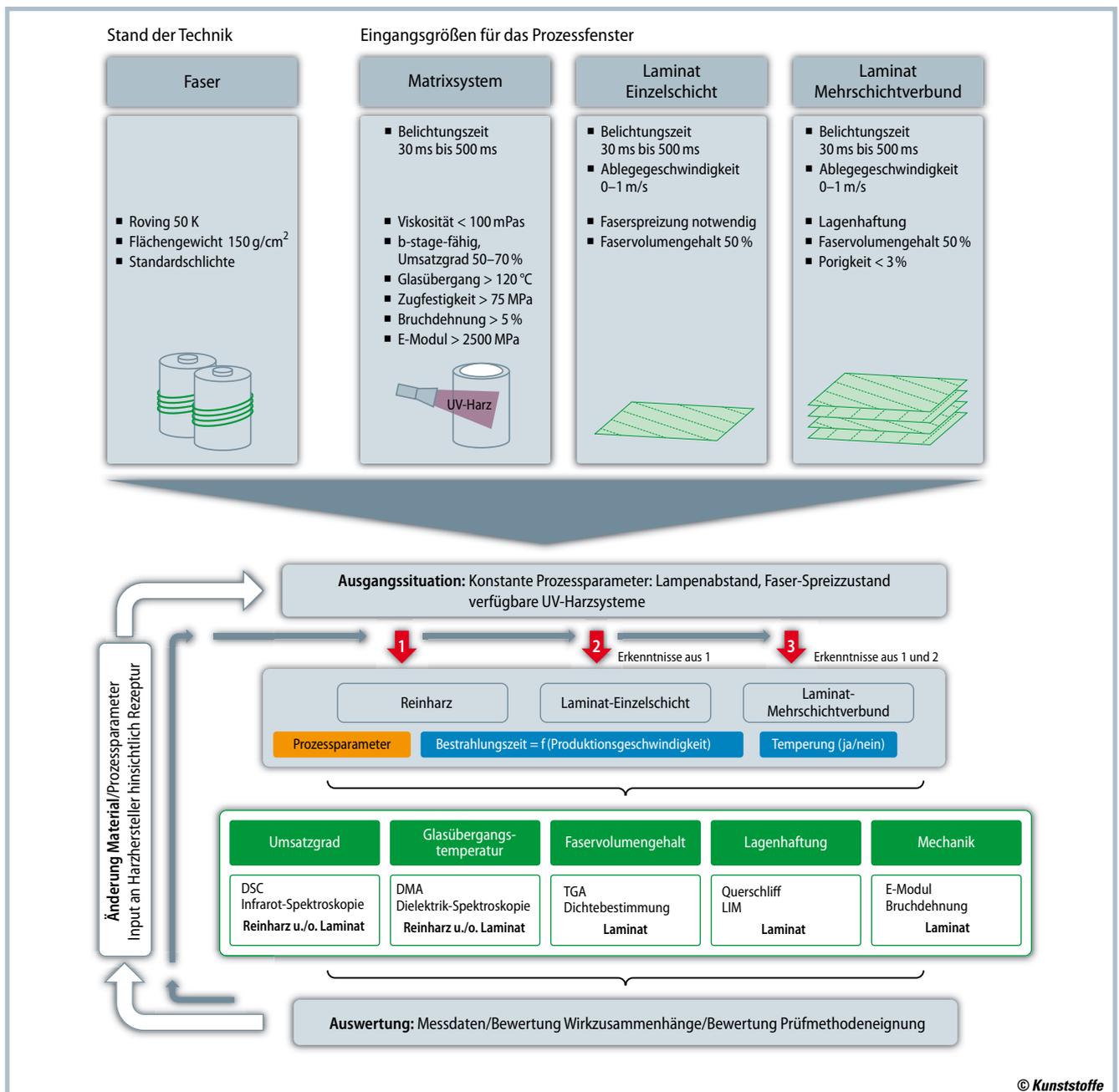


Bild 4. Materialanforderungen und Auswahlsystematik, um die notwendigen Prozessprämissen zu erzielen (Quelle: R. Hofmann)

werden phasenadäquat die Anforderungen behandelt und bewertet, Nichterfüllung einer Anforderung ohne Lösungsansatz würde zum Abbruch führen. Der Ablauf gliedert sich im Einzelnen in:

- Stand der Technik/Marktscreening,
- Patentsituation,
- Produkt,
- Prozess,
- Potenzial-/Risikoanalyse,
- Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und
- Planung der nächsten Phase.

Während in einer Potenzialphase noch mit übersichtlichen Test- und Versuchsständen Nachweise erarbeitet werden können, erfolgt in der Machbarkeitsphase dies schon unter seriennahen Randbedingungen (z.B. Produktionsgeschwindigkeit). Die erarbeiteten Daten erlauben dann in der Umsetzungsphase den Aufbau der seriennahen Versuchsanlage (**Bild 2**).

Die additive Fertigung mittels einer programmierbaren Steuerung ermöglicht den schichtweisen Aufbau des Laminats. Damit unterscheidet sich die Technik von der konventionellen CFK-Produktion,

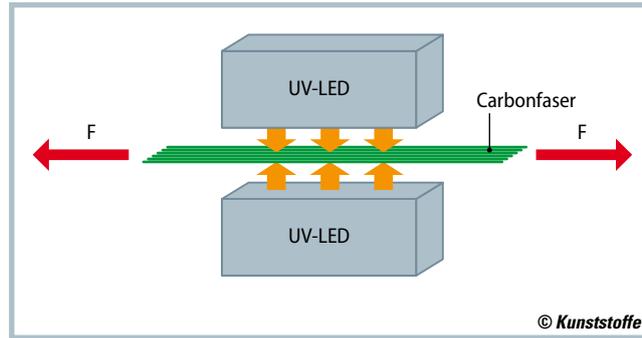


Bild 5. Statischer Versuchsaufbau zur Herstellung von Einschichtlaminaten mittels UV

(Quelle: R. Hofmann)

bei der der gesamte Laminataufbau, bestehend z. B. aus zehn Einzelschichten, erst injiziert und anschließend gehärtet und gegebenenfalls nachgehärtet wird, um die notwendige Glasübergangstemperatur und den notwendigen Umsatz bzw. Aushärtegrad zu erreichen.

Charakteristische Ergebnisse der Potenzialphase

Während Spreiz- und Infiltrier-Prozesse auch für die angestrebten Produktions-

geschwindigkeiten von 1m/s keine Herausforderung mehr darstellen, ist das Thema der Strahlungshärtung von CFK unter diesen Randbedingungen noch weitgehend unerforscht.

Voruntersuchungen bewerteten in einer Nutzwertanalyse verschiedene Strahlungsquellen hinsichtlich ihrer Eignung für die additive Fertigung. UV-Strahlungshärtungen wurden die größten Chancen für die Umsetzung in der SFE-Technik eingeräumt. Die Themenkreise Lampentechnologie, Materialsystem und Pro- »

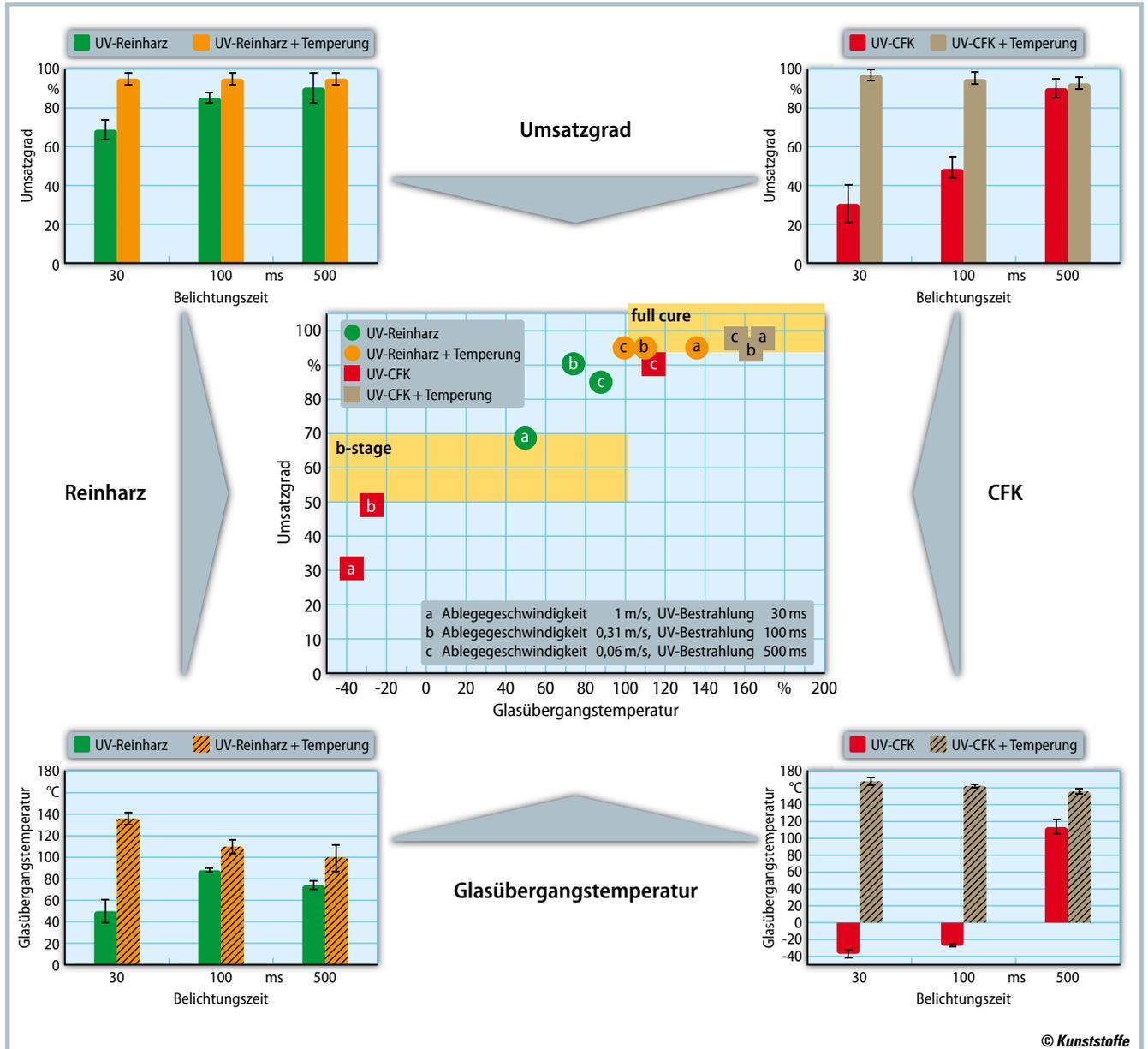


Bild 6. Darstellung der unterschiedlichen Reinharz- und Laminat-Resultate für die Ablegegeschwindigkeiten 1 m/s, 0,31 m/s und 0,06 m/s. Das mittlere Diagramm zeigt die Umsatzgrade als Funktion der Belichtungszeit (a, b, c) und der Glasübergangstemperatur. Gelb sind der Sollzustand der Laminatablage (b-stage) und des finalen CFK-Laminats (full cure) (Quelle: R. Hofmann)

zessfenster wurden als Erfolgsfaktoren für die weitere Bewertung des Prozesses priorisiert.

Lampentechnik

Neben der etablierten Quecksilberdampf-lampe, wurde die LED-Technologie in den letzten Jahren stetig optimiert. In **Bild 3** sind übliche Kurven der Beleuchtungsstärke über den Wellenlängenbereich aufgetragen. LED-UV-Systeme arbeiten im UVA-Bereich (315–380 nm) mit einer Wellenlänge von 365, 385 oder 400 nm und wandeln Energie direkt in

Licht um. Bezogen auf den 365-Bereich (350–380 nm) kann hier eine Bestrahlungsstärke von 3,7 W/cm² und mehr aufgebracht werden.

Quecksilberdampf lampen emittieren neben UV-Strahlung auch sichtbares Licht und Infrarotstrahlung, damit steht insgesamt ein breitbandigeres Wellenlängenspektrum, aber auch weniger Bestrahlungsstärke zur Verfügung als bei der LED. Wird auch hier der 365-Bereich (350–380 nm) betrachtet, so wird für die Beleuchtungsstärke nur noch 0,65 W/cm² aufgebracht [4]. Bedingt durch den pulsierenden Betrieb

beim Ablegen der Fasern im Werkzeug, spielt das Ein-Ausschaltverhalten der Lampen eine zykluszeitrelevante Rolle. Daher wurde für dieses Projekt die UV-LED-Lampe ausgewählt.

Auswahl eines geeigneten Materialsystems

Die wirtschaftliche Ausrichtung des Projekts lässt bei der Auswahl des Carbonfaserovings keinen Spielraum (50k). Der Härtingsmechanismus der UV-Harzsysteme wird durch die eingesetzten Photoinitiatoren gestartet und durch deren

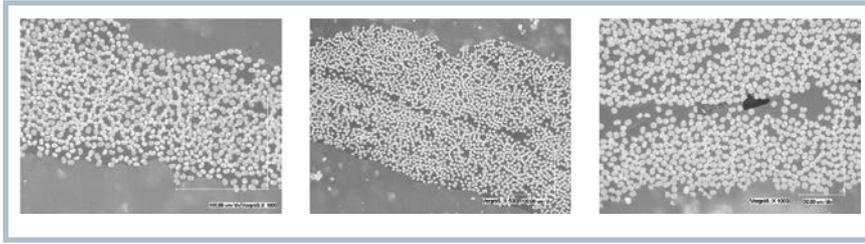


Bild 7. Lichtmikroskopische Aufnahmen einer UV-gehärteten Laminat-Einzelschicht, einer Laminat-Mehrschicht (b-stage/b-stage) und einer Laminat-Mehrschicht (b-stage/ full cure). Die Proben wurden ohne Presse hergestellt (v.l.n.r.) (© R. Hofmann)

spezifisches Absorptionsverhalten definiert. Charakteristisch für den Photoinitiator erfolgt die Absorption der UV-Strahlung nur in einen eng definierten Wellenlängenbereich.

Die Aushärtengeschwindigkeit strahlungsinduzierter Prozesse ist im Wesentlichen von drei Faktoren abhängig: zum einen von der Abstimmung der emittierenden Wellenlänge der UV-Lampe und der Photoinitiatoren, zum anderen von der Bestrahlungsstärke der Lampe und außerdem vom Massegehalt der Photoinitiatoren im Harzsystem. Sind die Wellenlänge des Photoinitiators und die Wellenlänge der Lampe nicht aufeinander abgestimmt, können keine relevanten Umsatzgrade erreicht werden [5].

Neben den besser bekannten Themen Spreizen und Infiltrieren sind drei Teilprozesse relevant:

- die Anhärtung vor dem Ablegen: Zu Beginn der Arbeit wurde aus Erfahrungswerten ein Arbeitswert von mindestens 60% zugrunde gelegt, d. h. es ist nur eine Teilaushärtung des Rovings bei der Ablage notwendig. Die

Teilaushärtung von 60% muss bei maximaler Produktionsgeschwindigkeit (von 1m/s) innerhalb von 30 ms erreicht werden;

- die finale Verbindung der neuen Einzelschicht mit dem bereits abgelegten Material (der Pressprozess soll vermieden werden);
- die Temperung zur Erzielung der finalen Glasübergangstemperatur (abhängig von der Einsatztemperatur des Bauteils, i. d. R. etwa 120°C bei automobilen Anwendungen) und Umsatzgrad muss > 95 % sein.

Die Anforderungen und die stufenweise Vorgehensweise bei der Bewertung sind in **Bild 4** aufgeführt. In einem ersten Schritt werden Reinharzkennwerte ermittelt. Entsprechen diese den Vorgaben, werden in einem statischen Verfahren Laminat-Einzelschichten hergestellt und mit bekannten Prüfmethoden bewertet (Umsatzgrad, Glasübergangstemperatur, Faservolumengehalt, Laminatqualität) (**Bild 5**). In einem weiteren Prüfstand konnte Mehrschichtverbunde hergestellt und analog bewertet werden [6].

Prozess- und Herstellungsparameter

Die im Serienprozess in einem kompakten Umfeld zusammengeführten Teilprozessschritte erfordern eine genaue Kenntnis der Wirkzusammenhänge jedes einzelnen Schrittes. Aus diesem Grund wurde als erstes ein statischer Versuchsaufbau zur Prüfkörperherstellung von Einschichtlaminaten erarbeitet. Dieser erlaubt, sowohl die Eingangsgrößen (Spreizqualität Roving, Flächengewichte und Dicke, verschiedene Harzsysteme), Prozessparameter (Faserspannung, Belichtungszeit, Abstand vom Laminat) als auch Hardware (UV-Lampen) zu variieren sowie Prüfkörper herzustellen und zu bewerten (Laminatqualität, Umsatzgrad, Glasübergangstemperatur, Mechanik).

Das Screening des Marktes für diesen Prozess ergab die Verfügbarkeit von Epoxid- und Acrylatsystemen mit Härtingszeiten von 1 bis 3 s. Zur Durchführung erster Versuche wurde ein Epoxidharzsystem im Versuchsstadium eingesetzt, das den Anforderungen (Modul und Umsatzgrade) deutlich näher kam ein kationisches Epoxidharzsystem (Typ: Delo Katiobond VE113740, Hersteller: Delo Industrie Klebstoffe GmbH & Co. KGaA, Windach). Repräsentative Ergebnisse sind in **Bild 6** dargestellt. Die Materialeigenschaft Umsatzgrad wurde mit der Methode der Infrarot-Spektroskopie (Messinstrument: Bruker Equinox 55 Research Grade FTIR mit ATR-Einheit), die Glasübergangstemperatur mittels DMA (Messinstrument: Q800, TA Instruments) unter Variation der Belichtungszeit »

Die Autoren

Dipl.-Wirt.-Ing. Reni Hofmann ist wissenschaftliche Mitarbeiterin und Doktorandin am Lehrstuhl für Experimentalphysik II der Universität Augsburg; reni.hofmann@physik.uni-augsburg.de

Dipl.-Ing. Hanno Pfitzer ist Entwicklungingenieur für Innovationsmanagement CFK bei der BMW Group in Landshut.

Dr. Jarlath Mc Hugh ist Entwicklungingenieur für CFK bei der BMW Group in Landshut.

Dr. Joachim Starke ist verantwortlich für Forschungsförderprojekte LeichtbauCFK bei der BMW Group in München.

Dank

Ein großer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Siegfried Horn von der Universität Augsburg für die Unterstützung bei der Versuchsdurchführung. Diese Forschung wurde vom BMBF im Rahmen des Spitzenclusters MAI Carbon als Förderprojekt 03MA107A ermöglicht-

Service

Literatur & Digitalversion

- Das Literaturverzeichnis und ein PDF des Artikels finden Sie unter www.kunststoffe.de/4106675

English Version

- Read the English version of the article in our magazine *Kunststoffe international* or at www.kunststoffe-international.com

(30 ms, 100 ms, 500 ms) sowohl am Reinharz als auch in der CFK-Einzelschicht untersucht [6].

Bild 6 ist in vier Quadranten und einer Zusammenfassung in der Mitte unterteilt. Die oberen Balkendiagramme zeigen den Umsatzgrad, die unteren Bilder die Glasübergangstemperatur. Links finden sich die Ergebnisse der Reinharze, rechts die der Lamine. Die farbigen Balken zeigen die Eigenschaften beim Ablegen, die schraffierten Balken die Eigenschaften nach einem zusätzlichen Tempersschritt. Variiert werden in jedem Diagramm die relevanten UV-Belichtungszeiten (30, 100, 500 ms).

Trägt man die Umsatzgrade als Funktion der Belichtungszeit (a, b, c) und der Glasübergangstemperatur auf, erhält man das mittlere Diagramm. Hier ist zusätzlich noch der Sollzustand der Laminatablage (b-stage) und des finalen CFK-Laminats gelb gekennzeichnet (full cure).

Das **Bild 6** zeigt exemplarisch die Ergebnisse des Versuchsharzes, das eine Basis für entsprechende Optimierung der Harzrezeptur und des Prozesses darstellt:

- Die Belichtungszeit ist der Stellhebel zum Einstellen des Umsatzgrads.
- Die Kennwerte der Einzelschichtlamine fallen gegenüber den der Reinharzwerte stark ab.
- Eine vollständige Umsetzung nur mit UV-Strahlung kann nicht erreicht werden.
- Ein Nachtempern ermöglicht die Zielerreichung bei Umsatzgrad und Glasübergangstemperatur und ist zwingend notwendig.
- Das Versuchsharz erfüllt bei 30 ms hinsichtlich des b-stage-Bereiches nicht die Anforderungen, hier müssen Zeiten oberhalb von 100 ms eingeplant werden.

Obwohl die Zielvorgaben nicht erfüllt wurden, ist der erreichte Stand um eine Größenordnung besser als der markt-

tübliche und könnte mit einer Anpassung der Lampe (Beleuchtungsfläche/LED Anzahl) zum Ziel führen. Mithilfe dieser Daten kann ein entsprechendes Prozessmodell aufgebaut und bestätigt werden. Diese Vorgehensweise lässt sich auch auf weitere Harzsysteme übertragen.

Nachdem über die vorangegangenen Versuche die Themen Materialsysteme und Einzelschicht-CFK-Herstellung betrachtet und die Wirkzusammenhänge erarbeitet wurden, folgten erste Vorversuche in Richtung Mehrschichtverbund (**Bild 7**), die zukünftig den Aufbau eines weiteren Versuchsstands ermöglichen werden.

Zusammenfassung und Ausblick

Mit den Ergebnissen dieser Potenzialstudie zu einem neuen einstufigen additiven Fertigungsverfahren für CFK-Bauteile konnte nachgewiesen werden, dass Alternativen zu thermisch-induzierten CFK-Herstellungsverfahren bestehen. Die kontrollierte Harzreaktion durch UV-Bestrahlung für die geforderte Ablegegeschwindigkeit von bis zu 1 m/s konnte für Reinharz und von bis zu 0,31 m/s für Lamine nachgewiesen werden. Diese Resultate stehen für den ersten, entscheidenden Meilenstein für die Etablierung dieses Verfahrens. Die Bauteilfertigung kann vereinfacht und wesentlich günstiger werden. Im nächsten Schritt müssten die Wirkzusammenhänge bei der Faserablage und, um einen Pressprozess zu verhindern, die Verbindung zur bereits abgelegten Schicht erarbeitet werden.

Mit den dann vorliegenden Erkenntnissen kann die Umsetzung auf einer Anlage mit integrierter Prozessüberwachung inklusive Härtungssensor angegangen werden. Es ist der nächste Schritt bei der Industrialisierung dieses Verfahrens im Rahmen der additiven Fertigung. ■

Entdecken Sie das

HANSER KUNDENCENTER

www.hanser-kundencenter.de

NEU

Viele Vorteile für registrierte Nutzer