Heiztechnik

Neue energieschonende Herstellmethoden von CFK-Bauteilen

Zielsetzung der von der IFF GmbH und Kunststoff Wagner beschriebenen Arbeiten war die Erforschung und Entwicklung von Technologien, die es basierend auf formintegrierten Heiztechniken ermöglichen, CFK-Formwerkzeuge innerhalb kürzester Zeit aufzuheizen und somit eine beschleunigte Harzaushärtung der Bauteile im LCM-Verfahren zu erreichen. Untersucht wurde in diesem Projekt die Erwärmung von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffformwerkzeugen auf der Basis von induktiver und spezieller konduktiver Erwärmung.

Durch ihr hohes Leichtbaupotenzial bieten sich Faserverbundwerkstoffe neben den bereits etablierten Einsatzbereichen im Flugzeugbau auch für moderne energieeffiziente Fahrzeuge an. Für die Großserienfertigung komplexer Bauteile mit hoher Gestaltungsvielfalt sind insbesondere die Harzinfusions- und Harzinjektionsverfahren geeignet. Bei diesen bestehen jedoch durch den Einsatz metallischer Formen starke Einschränkungen bezüglich Prozesszeiten, Formgrößen und erzielbarer Bauteilkosten. In diesem Beitrag soll ein innovativer Ansatz zur schnellen Erwärmung von Kohlenstofffaserverbund-Bauteilformen vorgestellt werden, der sowohl zu verbesserter Bauteilqualität als auch zu einer deutlichen Verkürzung der Prozesszeiten und somit zu signifikant niedrigeren Bauteilkosten führt.

ERARBEITUNG UND GEWICHTUNG PRINZIPIELLER HEIZKONZEPTE

Charakteristisch für LCM-Verfahren, die mehrere bekannte Verfahren wie RTM und VARI beinhalten, ist die Imprägnierung eines trockenen Preformlings mit einer flüssigen Matrix im Werkzeug mit anschließender Aushärtung. Dies geschieht entweder in einer geschlossenen steifen Form oder in einer nur einseitig steifen, offenen Form.

»Um die Idee der partiellen oder vollflächigen Beheizung des herzustellenden Bauteils zu verwirklichen, stehen prinzipiell zwei Aufheizmechanismen zur Verfügung.«

Prof. Dr.-Ing. Christian Lammel ist geschäftsführender Gesellschafter der IFF GmbH Induktion Fügetechnik Fertigungstechnik in Ismaning.

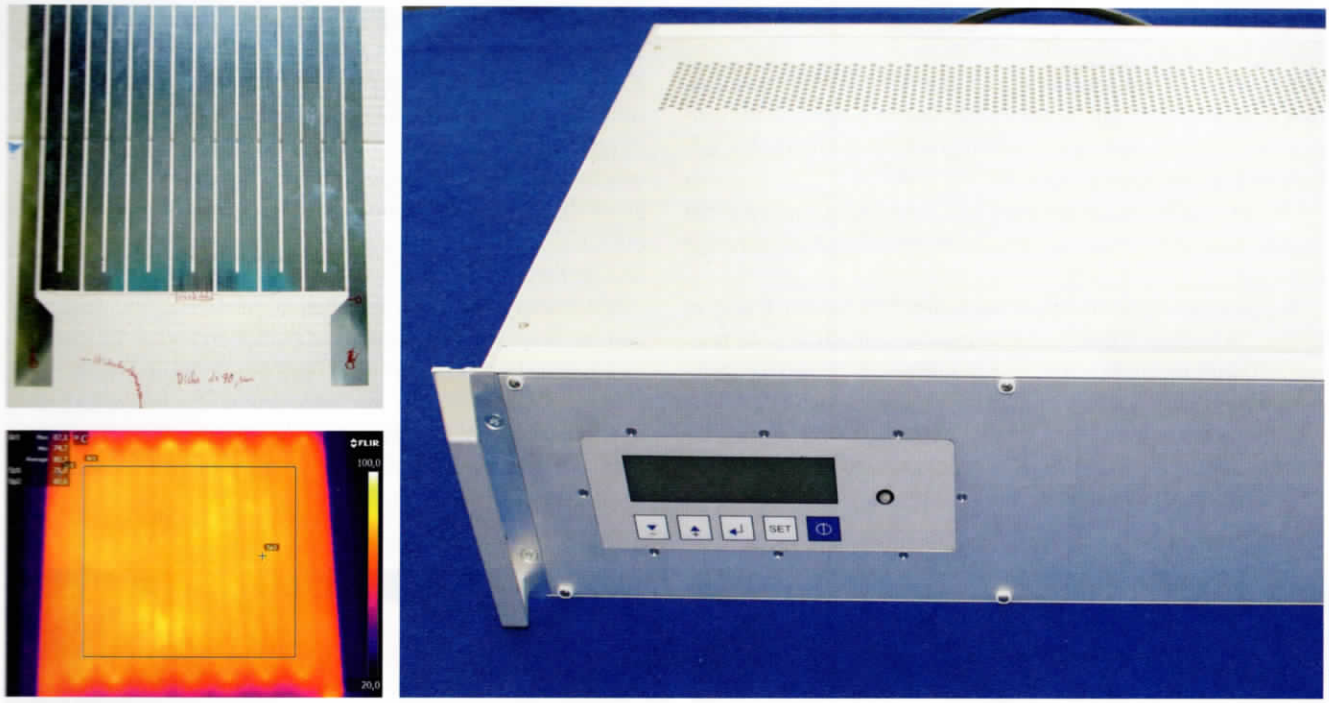

BILD 1 Einlegerfolie, Beispielgenerator und Wärmebild beim MF-Konduktionsheizen

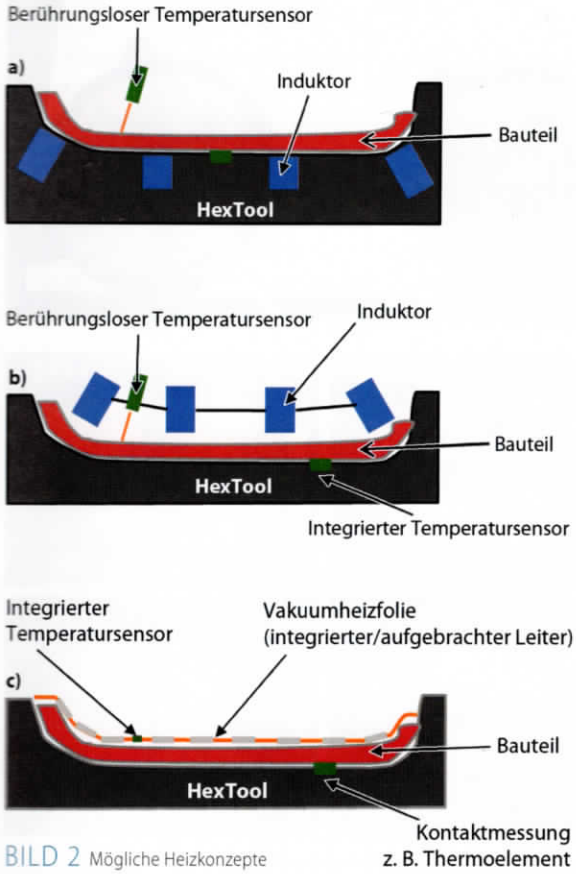

BILD 2 Mögliche Heizkonzepte

Im vorliegenden Fall wurde eine offene Form aus faserverstärktem Kunststoff betrachtet. Als Werkstoff wurde das kommerziell erhältliche Produkt HexTool (CFK-Formmaterial) der Firma Hexcel gewählt.

Um die Idee der partiellen oder vollflächigen Beheizung des herzustellenden Bauteils zu verwirklichen, stehen prinzipiell zwei Aufheizmechanismen zur Verfügung: Das eher partiell zu sehende, induktive Aufheizen der Kohlenstofffasern der Kunststoffform, das durch die elektrische Leitfähigkeit dieser Fasern ermöglicht wird, und das vom Fasermaterial unabhängige flächige und indirekte Aufheizen durch Mittelfrequenz (MF)-Konduktion mithilfe einer speziellen Einlegerschicht. Zur Verdeutlichung dieses konduktiven Heizprinzips zeigt Bild 1 einen derartigen Metalleinleger, der über die beiden herausstehenden Kontaktierungsflächen mit einem Wechselstrom eines geeigneten MF-Generators (rechts) versorgt wird; unten links ist ein mit einem ähnlichen Metalleinleger erzeugtes Wärmebild dargestellt, das die homogene Flächenbeheizung dieses Verfahrens belegt.

Basierend auf diesen beiden Heizmethoden induktiv und konduktiv wurden folgende Anordnungen und Heizkonzepte einer offenen Form betrachtet und bewertet, Bild 2:

Integration der Induktionsheizung in der Form (a)

Bei diesem Konzept werden Induktoren in das Kunststoffwerkzeug integriert, die die Formoberseite partiell erwärmen sollen, wodurch sich das in Kontakt befindliche Bauteil auch erwärmt.

Anordnung über dem Vakuumaufbau als zusätzliches Fertigungshilfsmittel – getrennt von Form (b)

Bei diesem Konzept, das auch auf partieller Beheizung durch Induktoren beruht, könnte die bestehende Form beibehalten werden.

Beidseitige oder einseitige Erwärmung durch MF-Konduktions-Heizfolien – formintegriert oder in Vakuumfolie (c)

Dieses universell einsetzbare Heizverfahren kann in die Form integriert werden, sodass das Bauteil vollflächig von unten beheizt werden kann; denkbar wäre auch die Integration in die für die Bauteilherstellung benötigte Vakuumfolie.

Die Vor- und Nachteile der jeweiligen Anordnung werden in der Tabelle bezüglich einiger für den Einsatz wichtiger Eigenschaften diskutiert.

Aus der Erfahrung der im Projekt beteiligten Firma Kunststoff Wagner GmbH, die hochwertige Kunststoffbauteile herstellt, ist das Einlaminieren von Heizfolien in die Formrückseite aufgrund der guten Handhabbarkeit (Konzept 3) die aussichtsreichste Variante. Zu berücksichtigen ist ein Mindestabstand zur Formoberfläche und zu möglichen Frässtellen (zum Beispiel der Nut für eine Preformmembran), um die benötigte Oberflächenqualität des Formwerkzeugs nicht zu gefährden.

INDUKTIVES BEHEIZEN EINES FORMWERKZEUGS

Zur Untersuchung der Induktionsheiztechnik wurde ein Versuchswerkzeug aus dem Material HexTool hergestellt. An diesem Werkzeugprototypen mit einer Verdickung im mittleren Bereich wurden verschiedenen Induktortypen und -anordnungen erprobt. Da das Bauteil flächig erwärmt werden sollte, wurden vier kreisflächige Induktoren, Bild 3, benutzt, die unter der Platte positioniert wurden und die Kohlenstofffasern direkt induktiv anregen sollten.

Bild 4 zeigt das Aufheizverhalten dieser Anordnung dokumentiert mit einer Wärmebildkamera. Deutlich erkennbar ist, dass sich die Fasern sofort nach Beginn der Heizphase (links und rechts oben) erwärmen, sich aber selbst nach 40 min Heizen (links unten) noch kein ausreichender Wärmeausgleich der Kunststoffplatte zeigt, der auch zwischen den Heizfeldern für eine ausreichende Erwärmung sorgen würde.

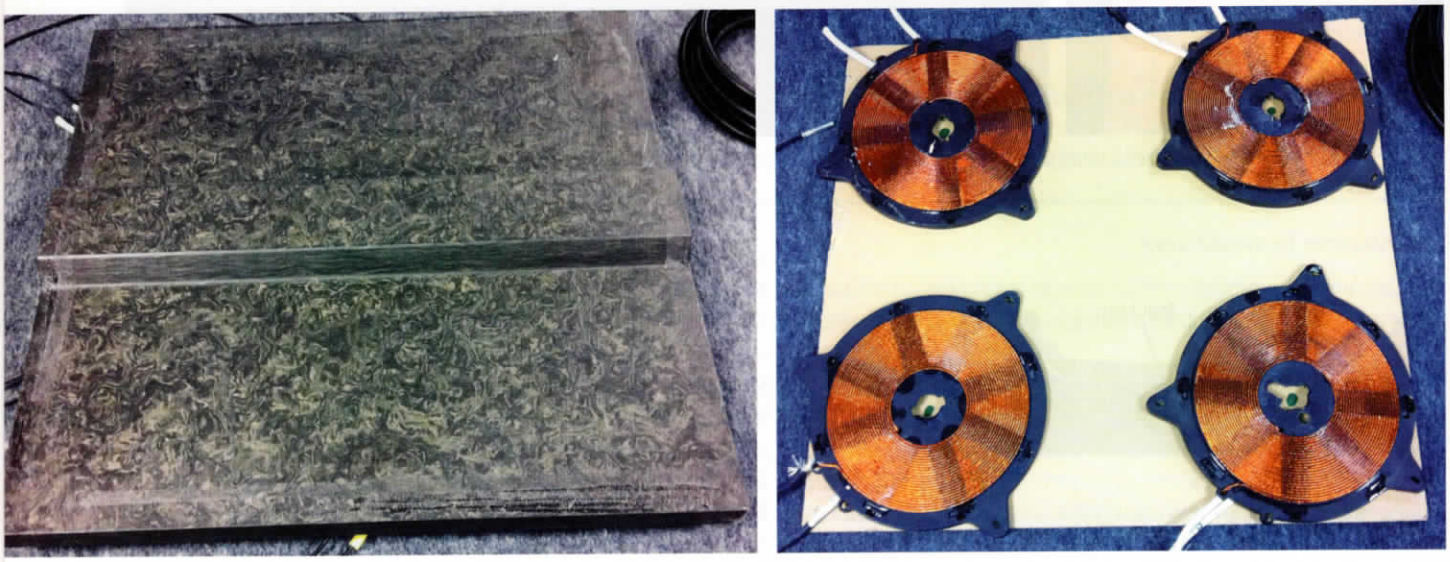

BILD 3 HexTool-Versuchsteil mit vier Flächeninduktoren

»Für das beidseitige Heizen wurden Silikonheizmatten hergestellt, bei denen Heizleiter in eine Silikonmembran eingebettet werden.«

Dipl.-Ing. Holger Kunz ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Füge- und Schweißtechnik der Technischen Universität Braunschweig.

TABELLE Vor- und Nachteile der jeweiligen Anordnung

	Reparatur der Heizungskomponente	Integration in Form	Erwärmung der Form	Homogenität der Temperatur über die Bauteiloberfläche
Induktoren in Form integriert	bedingt möglich	zusätzliche Fräspunkte und möglicherweise veränderte Anordnung von Inserts nötig	selektive Formerwärmung, aber volumetrisch über Wandstärke	gering, da Induktoren nicht vollflächig wirken können
Induktoren über Form befindlich	möglich	entfällt	selektive Formerwärmung, aber volumetrisch über Wandstärke	gering, da Induktoren nicht vollflächig wirken können
Heizflächen in Vakuumfolie und Form	nicht möglich	Einlaminieren der Heizschicht, möglicher Einfluss auf Steifigkeit und Formbeständigkeit	selektive Formerwärmung, nur oberflächig	beidseitig, gut
Heizfläche nur in Vakuumfolie	möglich durch Ersetzen der Vakuumfolie	Integration in Vakuumfolie notwendig, Form wie bisher	selektive Formerwärmung, nur oberflächig	einseitig, gut

Erst nach Abschalten der Heizung und nach einer Stunde Abkühlzeit stellt sich eine relativ homogene Temperaturverteilung auf niedrigem Temperaturniveau ein (Bild rechts unten).

KONDUKTIVES BEHEIZEN EINES FORMWERKZEUGS

Für die zweite Heizmethode, das MF-Konduktionsheizen, wurden zwei Varianten von Heizsystemen umgesetzt:

- Metalleinleger integriert in eine feste Form zum Heizen der Bauteilunterseite
- Metalleinleger integriert in eine formvariable Silikonheizmatte zum Heizen der Bauteiloberseite.

Bild 5 zeigt den Lagenaufbau einer für Temperaturmessungen hergestellten Form, die über die Formfläche und -dicke verteilt

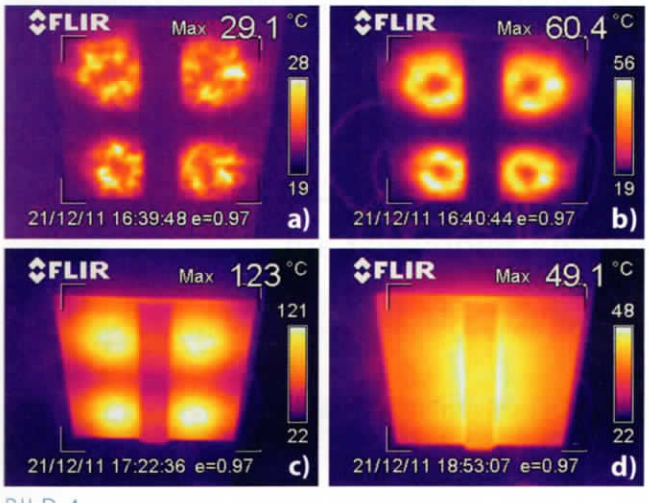

BILD 4 Induktive Erwärmung eines Hextool-Formwerkzeugs

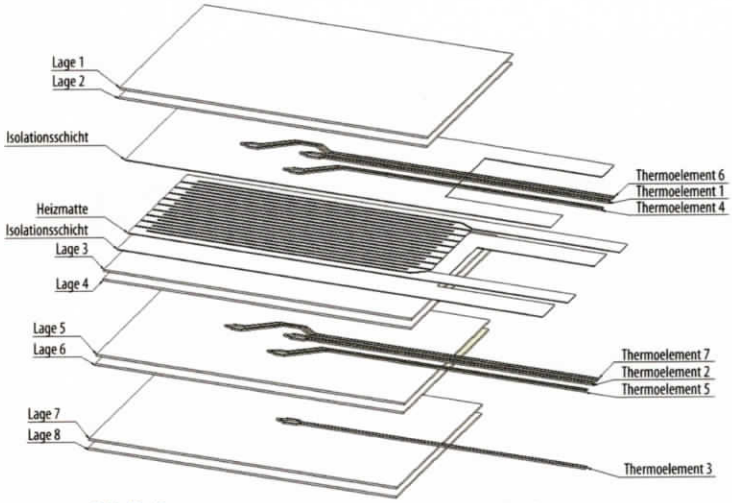

BILD 5 Aufbau einer konduktiv beheizbaren Versuchsplatte

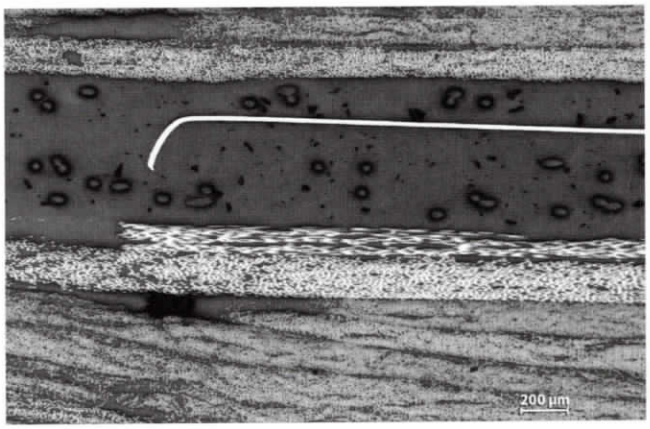

BILD 6 Querschliff durch die mittels Konduktion beheizbare Form

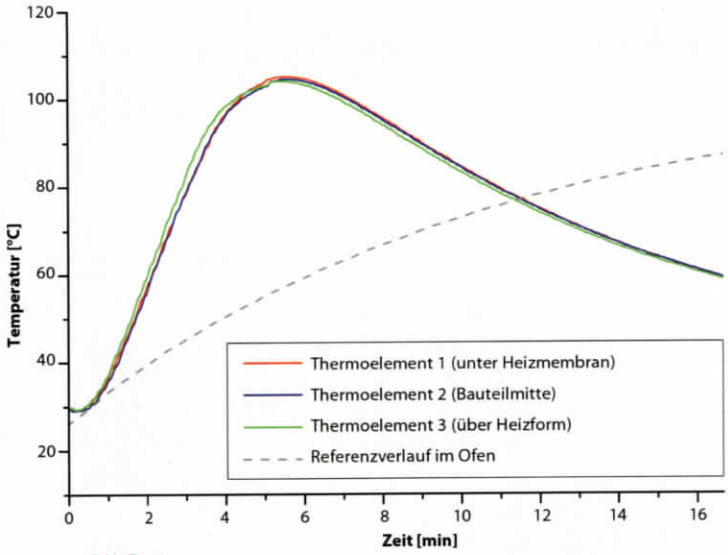

BILD 7 Beidseitige Erwärmung einer Probeplatte über formintegrierte Heizfolie und Heizmembran

mit Thermoelementen ausgestattet ist. Zum Beheizen wurde ein Metalleinleger, der sich zwischen zwei Isolationsschichten befindet, einlaminiert.

Die ebenen Platten sind aus acht Lagen HexTool M81 gefertigt. Zwischen jeder zweiten Lage sind ein beziehungsweise drei Thermoelemente angeordnet, um eine möglichst präzise Abschätzung der Temperaturverteilung in der Platte zu erreichen. Für eine möglichst geringe thermische Trägheit ist der Metalleinleger bauteilnah unter der zweiten Lage eingebracht. Bild 6 zeigt einen Querschliff durch diese beheizte Form. Die Stahlschicht wird durch einen Klebfilm mit Trägergitter von den umgebenden leitenden Kohlefaserlagen isoliert, um Kurzschlüsse zu vermeiden.

Da die Herstellung der in diesem Projekt angestrebten Infusions- und Prepregbauteile in einseitigen Formen durchgeführt wird, führt eine Anwendung der oben dargestellten Heizformen mit integrierten Heizleitern zu einer einseitigen Wärmeeinbringung, die durch Wärmeleitung in Bauteildickenrichtung ausgeglichen wird. Je nach Dicke des zu fertigenden Bauteils oder aufgrund von unterschiedlichen Wärmeverlusten auf der Bauteiloberfläche durch Strahlung kann sich eine inhomogene Temperaturverteilung einstellen. Dies

»Die durchgeführten Versuche zeigen klar auf, dass Formwerkzeuge aus kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen mittels Induktion erwärmbar sind.«

Wulf Wagner ist Geschäftsführer der Kunststoff Wagner GmbH in Donzdorf.

BILD 8 Erwärmungsbild der in dehnfähiges Silikon eingebetteten Heizleiter

BILD 9 Versuchsteil mit komplexer Geometrie

kann durch zwei Maßnahmen umgangen werden. Zum einen kann eine zweiseitige Wärmeeinbringung durch das Auflegen von formvariablen Silikonheizmembranen erreicht werden, und zum anderen kann die Heizleistung der Form durch eine geeignete Variation der Heizleiterbreite lokal angepasst werden (dies wurde auch untersucht, ist aber nicht Gegenstand dieses Beitrags).

Für das beidseitige Heizen wurden Silikonheizmatten hergestellt, bei denen in eine Silikonmembran Heizleiter eingebettet werden, ähnlich der zuvor beschriebenen Formen. Um die Temperaturverteilung bei einer zweiseitigen Erwärmung durch Silikonmembran und Heizform zu bewerten, wurde ein Testbauteil mit drei über die Dicke verteilten Thermoelementen hergestellt. Bild 7 zeigt den bei dieser Anordnung erreichten Temperaturverlauf der Thermoelemente (rot/blau/gelb) dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass mit diesem Aufbau eine sehr homogene Temperatur über die Bauteildicke erreicht werden kann.

Um die Heizrate während des Aufheizvorgangs mit einem herkömmlichen Ofenprozess vergleichen zu können, wurde eine Vergleichsmessung mit demselben Bauteil im Ofen durchgeführt. Der Temperaturverlauf dieser Messung ist als graue Kurve im Diagramm dargestellt. Während die Zieltemperatur von circa 100 °C bei der Erwärmung über Silikonheizmatte und Heizform bereits nach 4 min erreicht wird, dauert der gleiche Prozess im Ofen 35 min.

Wie aus Bild 8 hervorgeht, ist auch die Temperaturverteilung über die Silikonmembran während der Heizphase entlang der Wendeln nahezu homogen. Die Zwischenräume sind zwar als kältere Streifen zu erkennen, diese sehr schmalen Bereiche gleichen sich jedoch durch Wärmeleitung im Bauteil aus.

UMSETZUNG DER ERKENNTNISSE

Um die Anwendbarkeit des konduktiven Heizens auch bei komplexen Geometrien aufzuzeigen, wurde ein Versuchsteil hergestellt, das über vier 90°-Abkantungen und zwei schräg zulaufende Seitenflächen verfügt, Bild 9.

Dieses Versuchsteil wurde mit zwei Stahleinlegern versehen, die den Körper jeweils bis zur Hälfte heizen können. Leider zeigte sich nach der Herstellung, dass es bei einer komplexen Bauteilgeometrie, wie hier gegeben, passieren kann, dass der geplante Schichtaufbau nicht ordnungsgemäß gelingt. Bei diesem Beispielwerkzeug kann nur eine Seite für Aufheizversuche benutzt werden, da die andere, mit einem Gesperrt-Klebeband gekennzeichnete, Seite aufgrund eines internen Kurzschlusses nicht elektrisch betrieben werden kann. An der rechten Bauteilseite sind die beiden Anschlussfahnen zu erkennen, an denen ein Mittelfrequenzgenerator über spezielle Kontaktklemmen angeschlossen werden muss.

Bild 10 zeigt die Wärmeentwicklung im Bauteil. Anfangs sind die Konturen der einzelnen Metallstreifen noch erkennbar, nach einigen Minuten Heizzeit weist die gesamte Heizfläche die annähernd homogene Zieltemperatur von 100 °C auf.

In Bild 11 ist der mittels eines Pyrometers gemessene Wärmeverlauf an der Werkzeugoberfläche dargestellt. Die Aufheizzeit bis zum Errei-

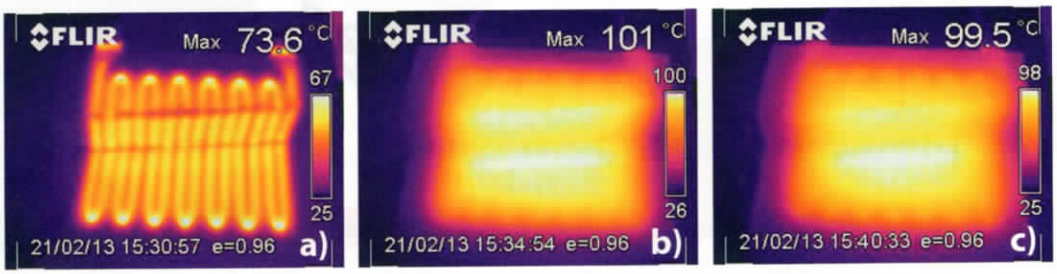

BILD 10 Wärmeverteilung beim konduktiven Heizen des gekanteten Beispielwerkzeugs

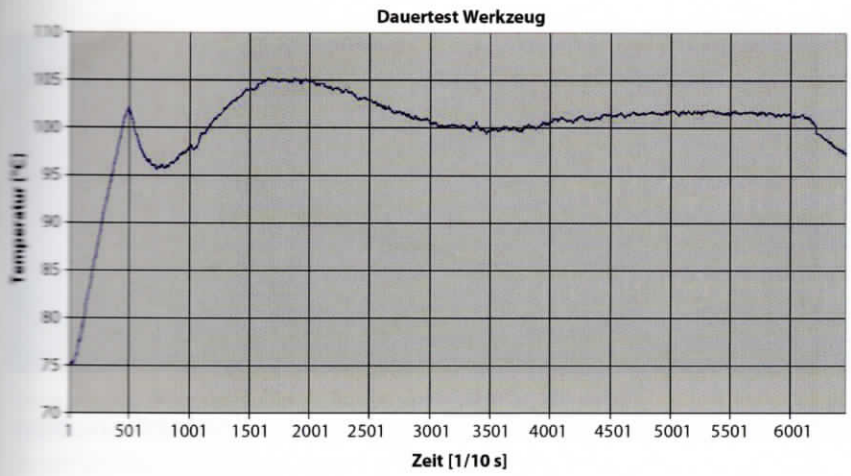

BILD 11 Wärmeverlauf beim MF-Konduktionsheizen des gekanteten Beispielwerkzeugs

chen der Zieltemperatur betrug rund 50 sec; erkennbar sind die leichten Schwankungen um die Zieltemperatur und das insgesamt sehr stabile Temperaturniveau beim geregelten Aufheizen über 10 min.

SCHLUSSFOLGERUNG UND AUSBLICK

Die durchgeführten Versuche zeigen klar auf, dass Formwerkzeuge aus kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen mittels Induktion erwärmbar sind. Allerdings ist die Wärmeleitfähigkeit des untersuchten Materials HexTool für das vollflächige Erwärmen zu gering, sodass diese Heiztechnik eher für partielles Heizen geeignet ist.

Mit dem zuletzt vorgestellten Beispielwerkzeug ist der Nachweis erbracht, dass auch komplexe Bauteilgeometrien mittels Metalleinleger flächig konduktiv auch über längere Zeit beheizt werden können.

Für den sicheren Betrieb ist Folgendes zu beachten: Bei der Herstellung der Werkzeuge mit integriertem Metalleinleger ist unbedingt sicherzustellen, dass die Metallfolie elektrisch isoliert eingebettet wird, da es sonst zu irreparablem Funktionsausfall aufgrund eines internen Kurzschlusses kommen kann, was bei einem teuren Formwerkzeug natürlich unbedingt vermieden werden muss.

Zudem muss für eine sichere und mehrmals verwendbare Kontaktierung der MF-Anschlüsse des Generators an die Einlegerschicht gesorgt werden. Die in den Bildern erkennbaren dünnen Anschlussfahnen aus demselben Material wie die Heizfolie sind dafür ungeeignet. Es wurde eine Methode entwickelt, die es erlaubt, die Anschlüsse aus dem Werkzeug so herauszuführen, dass man außen am Werkzeug eine elektrische Kontaktiermöglichkeit nach Standardausführung (wie zum Beispiel bei einer Erdungsschraube) vorfindet.

Aufgrund der hohen Anforderungen an die geometrische Präzision eines Formwerkzeugs besteht seitens der Anwender der Wunsch, auf artfremde Materialien im Werkzeug so weit wie möglich zu verzichten, um Bauteilverzug wegen unterschiedlicher thermischer Ausdehnung auszuschließen. Die weiterführenden Arbeiten der IFF GmbH zeigen auf, dass es Einlegermaterialien gibt, die auf Kohlenstoff basieren und mit denen das flächige MF-Konduktionsheizen von Kunststoffwerkzeugen genauso gut funktioniert. Auch für diese höchst anspruchsvollen Anwender steht also eine Heizlösung bereit, um qualitativ hochwertige faserverstärkte Kunststoffbauteile mit im Vergleich zu herkömmlichen Verfahren sehr geringem Zeit- und Energieeinsatz sicher herzustellen.

DANKSAGUNG

Die dargestellten Ergebnisse entstammen dem von der AIF unter dem Kennzeichen KF2012207GZ0 geförderten Projekt: InCFK – Beschleunigung der Prozesskette zur Herstellung faserverstärkter Kunststoffe insbesondere der Matrixaushärtung durch beheizte Formen. Die Autoren danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie und dem AIF für die finanzielle Unterstützung, ohne die diese Forschungstätigkeit nicht möglich gewesen wäre.

Die Autoren

PROF. DR.-ING. CHRISTIAN LAMMEL ist geschäftsführender Gesellschafter der IFF GmbH Induktion Fügetechnik Fertigungstechnik in Ismaning.

DIPL.-ING. HOLGER KUNZ ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Füge- und Schweißtechnik der Technische Universität Braunschweig.

WULF WAGNER ist Geschäftsführer der Kunststoff Wagner GmbH in Donzdorf.

PROF. DR.-ING. KLAUS DILGER ist Leiter des Instituts für Füge- und Schweißtechnik an der TU Braunschweig.

DR. RER. NAT. FABIAN FISCHER ist Leiter der Abteilung Faserverbundtechnololgie am Institut für Füge- und Schweißtechnik an der TU Braunschweig.