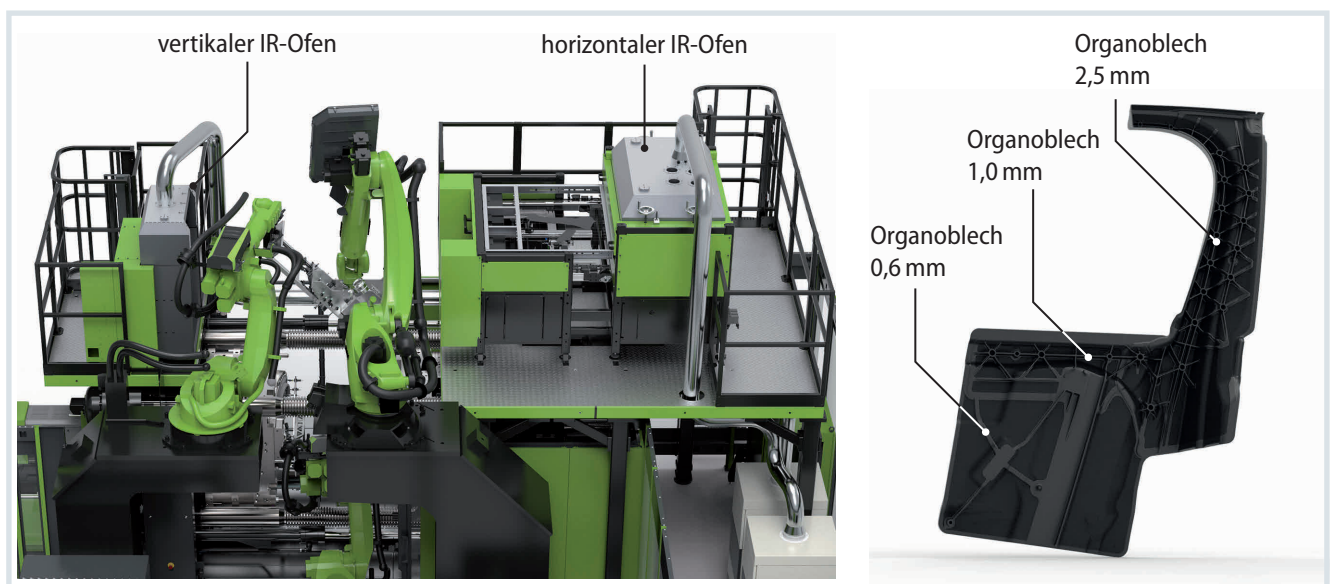


Softwarebasierte Regelung von IR-Öfen

Thermoplastische Composites effizient und präzise aufheizen

Bei der Verarbeitung von thermoplastischen Composite-Halbzeugen hat sich die Infrarot-Heiztechnik als Standard durchgesetzt. Sie macht es möglich, flächige Organobleche bis ca. 3 mm Dicke innerhalb der für die Spritzgießverarbeitung charakteristischen Zykluszeiten aufzuheizen. Die Aufmerksamkeit gilt der Prozessregelung: Einerseits ist es wichtig, dass der Heizprozess rasch abläuft, andererseits darf das Material nicht überhitzt werden. Besonders herausfordernd ist das zeitgleiche Verarbeiten unterschiedlich dicker Zuschnitte.



Für die Fertigung eines Türstrukturbauteils werden drei unterschiedlich dicke Organobleche in zwei IR-Öfen aufgeheizt © Engel

Es sind vor allem zwei Gründe, weshalb thermoplastische Composites besonders im automobilen Leichtbau weiter stark an Bedeutung gewinnen. Zum einen ermöglicht es der durchgehend thermoplastische Ansatz, die Funktionalisierung von Faserverbundbauteilen effizient zu integrieren, was die Stückkosten senkt. Zum anderen vereinfacht der Einsatz von ausschließlich thermoplastischen Polymeren die Entwicklung von Recycling-Konzepten. Composite-Bauteile am Ende ihrer Nutzungsdauer in den Stoffkreislauf zurückzuführen, gehört zu den vorrangigen Aufgaben bei der Entwicklung neuer Fahrzeugkonzepte.

Beim etablierten Einstufenprozess für die Fertigung thermoplastischer Composite-Bauteile befinden sich die Halbzeuge als plattenförmige Zuschnitte in Magazinen. Dort werden sie von einem Roboter

entnommen und zu einem Infrarot-Ofen transportiert. Nach dem Erwärmen im IR-Ofen nimmt der Roboter das jetzt biegeschlaife Composite-Halbzeug wieder auf und bringt es ins Werkzeug der Spritzgießmaschine ein. Durch die Schließbewegung des Werkzeugs wird es umgeformt und rekonsolidiert und unmittelbar danach durch Spritzgießen mit den gewünschten Detailgeometrien versehen. Nach Abschluss der Kühlphase, die vor allem für die spritzgegossenen Bereiche nötig ist, wird das einbaufertige Composite-Bauteil aus dem Werkzeug entnommen. Einer der wichtigsten Vorteile der thermoplastischen Composites ist, dass die Zykluszeit für die Herstellung eines technischen Bauteils bei nur 40 bis 80 s liegt. Für eine duroplastische Composite-Lösung wären dafür zumindest einige Minuten erforderlich.

IR-Ofen unterstützt schnelles Hot-Handling

Die Sequenz vom Einbringen des Halbzeugs in das Werkzeug bis zum Umspritzen ist besonders zeitkritisch. Sobald das aufgeheizte Composite-Halbzeug aus dem IR-Ofen entnommen wird, beginnt es, sich abzukühlen. Beim Anspritzen der Detailgeometrien muss aber noch genug Wärme im Material vorhanden sein, um eine gute Haftung zwischen dem Composite-Material und dem angespritzten Thermoplast zu erreichen.

Der Transport des aufgeheizten Composite-Halbzeugs, das sogenannte Hot-Handling, muss deshalb gut geplant, erprobt und mithilfe geeigneter Automatisierungslösungen passgenau umgesetzt werden. Entscheidend sind zudem die Ausführung und Positionierung des IR-

Ofens. Die Engel Austria GmbH, Schwertberg/Österreich, bietet die im eigenen Haus entwickelten und produzierten IR-Öfen sowohl in horizontaler als auch vertikaler Bauform mit wahlweise ein- oder zweiseitigen Strahlerfeldern in unterschiedlichen Ausführungen an.

Bei dünnen Materialien bietet ein vertikaler IR-Ofen, der auf der festen Werkzeugaufspannplatte der Spritzgießmaschine positioniert ist, oft Vorteile. Je dünner das Material, desto schneller kühlt es ab. Die räumliche Nähe zwischen IR-Ofen und Werkzeug verkürzt die Verfahrwege und entsprechend auch die Handlingzeit. Für das Aufheizen dünner Materialien mit Wanddicken von bis zu 1 mm sind oft einseitige IR-Öfen ausreichend. Zudem kommt die einseitige Ausführung des vertikalen IR-Ofens der Zugänglichkeit und dem schnellen Abtransport der erwärmten Halbzeuge entgegen.

Auch dicke Halbzeuge effizient erwärmen

Dass sich Infrarotstrahlung, die eine hohe Energiedichte aufweist, sehr gut für das Aufheizen thermoplastischer Composite-Halbzeuge eignet, liegt in der Struktur der plattenförmigen Halbzeuge begründet. Diese bestehen meistens aus mehreren Einzellagen, zwischen denen nach dem Verschweißen und Konsolidieren keine Hohlräume mehr vorhanden sind. Damit ist gewährleistet, dass die Wärmeleitung von der Oberfläche in den Kern zügig abläuft. Da Infrarotstrahlung schnell und zugleich kontaktlos wirkt, lassen sich Halb-

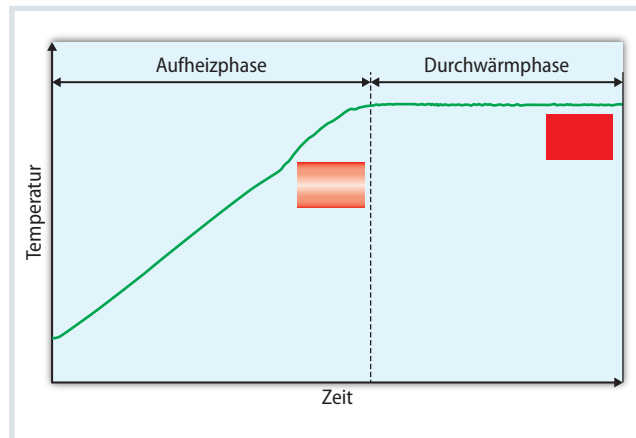


Bild 1. Die Oberflächentemperatur wird während des gesamten Heizprozesses überwacht. Im Standard ist ein beidseitiger IR-Ofen mit sechs Pyrometern ausgestattet. Das Bild zeigt exemplarisch den Temperaturverlauf an einer Messposition. Quelle:

Engel; Grafik: © Hanser

zeuge in den unterschiedlichsten Dicken bis deutlich über den Schmelzpunkt des Matrixpolymers erwärmen, ohne dass es zu Problemen mit Anhaftungen kommt.

Bis zu welcher Materialtiefe die Elektronen angeregt werden, hängt von der Wellenlänge der IR-Strahlung und dem Absorptionsverhalten des Materials ab. Typische thermoplastische Matrixmaterialien haben relevante Absorptionsbanden im Bereich von 2 bis 3 μm Wellenlänge [1]. Mittelwellige Infrarotstrahler erreichen in diesem Bereich eine hohe Strahlungsintensität, weshalb sie vorzugsweise für das Aufheizen von thermoplastischen Composites zum Einsatz kommen. Damit wird eine Eindringtiefe von bis zu 0,5 mm erreicht – diese oberflächennahe Schicht erwärmt sich rasch.

Insbesondere bei dickeren Organoblechen kommt es vor, dass der Kern noch nicht ausreichend erwärmt ist, wenn die Oberfläche ihre Solltemperatur er-

reicht hat. Die für das Schmelzen des Kernbereichs benötigte Wärme kann nur durch Wärmeleitung ins Material gelangen. Kunststoffe und auch Glasfasern sind verhältnismäßig schlechte Wärmeleiter, weshalb die Durchwärmung des Kernbereichs etwas Zeit in Anspruch nimmt. Um sicherzustellen, dass der Kernbereich die erforderliche Temperatur erreicht hat, wird die Oberfläche für eine definierte, experimentell ermittelte Zeit auf Solltemperatur gehalten.

Die IR-Strahlung ist die effizienteste Methode für das Aufheizen von Organoblechen. Die oberflächennahe Schicht ist im Sinne der Wärmeleitung eine Art innere Wärmequelle, die keinen thermischen Übergangswiderstand mehr überwinden muss, wie das bei der reinen Kontakt erwärmung oder der Konvektion der Fall ist. Vor allem im Vergleich zum konvektiven Aufheizen werden mit der Infraroterwärmung deutlich kürzere Aufheizzeiten »

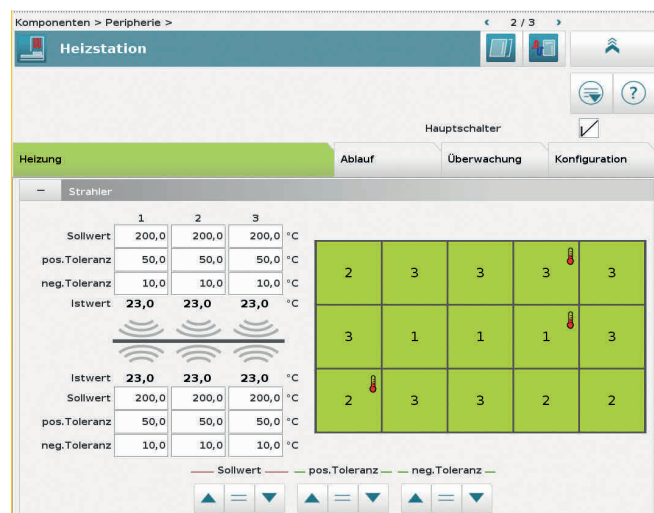
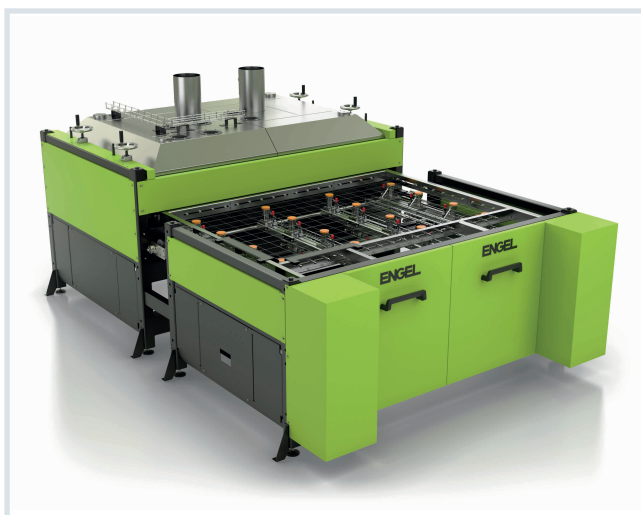


Bild 2. Horizontaler beidseitiger IR-Ofen mit 1100 x 600 mm Nutzfläche. Die Strahler werden in Gruppen zusammengefasst, um sie anhand einer spezifischen Temperaturmessung zu regeln. © Engel

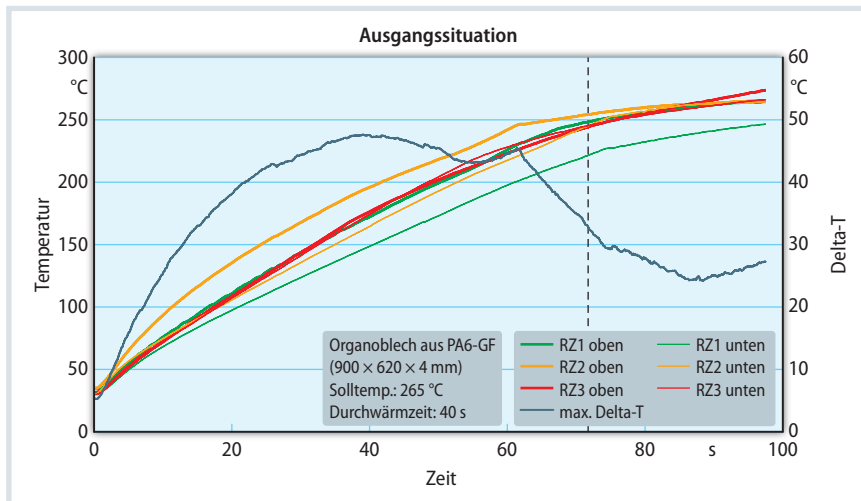


Bild 3. Im Versuch wurden thermische Inhomogenitäten gezielt herbeigeführt (Ausgangssituation). Die resultierenden Aufheizkurven wurden anschließend durch eine automatische Prozessregelung optimiert Quelle: Engel; Grafik: © Hanser

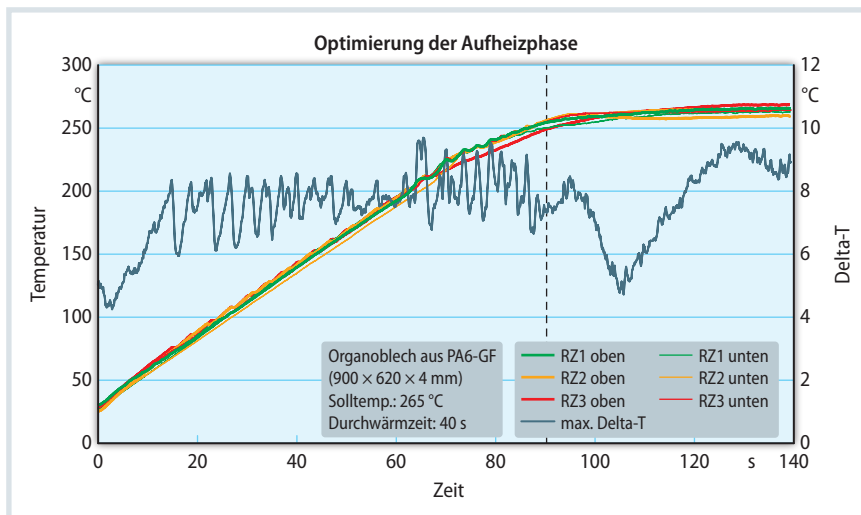


Bild 4. Die automatische Optimierung des Aufheizverhaltens führt zu einem einheitlicheren, beinahe linearen Temperaturanstieg Quelle: Engel; Grafik: © Hanser

erreicht. Generell sind IR-Öfen für alle relevanten Matrixpolymere geeignet, einschließlich der Hochtemperaturkunststoffe PAI, PPS, PEKK und PEEK.

Materialschonendes Aufheizen mit hoher Temperaturhomogenität

Die Herausforderung beim Aufheizen mit Infrarotstrahlung besteht darin, eine optimale Kombination aus hoher Effizienz und Temperaturhomogenität zu erzielen und dabei das Material nicht durch lokales Überhitzen zu beschädigen. Die Ziel- bzw. Solltemperatur, die in der Regel deutlich über der Schmelztemperatur liegt, darf allenfalls geringfügig überschritten werden. Um das sicherzustellen, wird die Oberflächentemperatur wäh-

rend des gesamten Heizprozesses mit Pyrometern überwacht. Die Messdaten werden bei der Prozessregelung mit einbezogen, wie der Temperaturverlauf einer einzelnen Messposition während der Aufheiz- und der Durchwärmphase für einen teilkristallinen thermoplastischen Kunststoff, z.B. Polypropylen oder Polyamid, zeigt (**Bild 1**).

Charakteristisch sind beinahe lineare Verläufe bis zum Erreichen des Kristallitschmelzpunkts. Die Aufheizrate wird u.a. von der Leistungsdichte des Strahlers und dem Absorptionskoeffizienten sowie der Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit des thermoplastischen Composites bestimmt. Im Bereich des Kristallitschmelzpunkts – bei Polyamid 6 um ca. 223 °C – geht die Aufheizrate zurück. Ein Teil der

zugeführten Energie fließt in das Aufschmelzen der Sphärolite. Wenn das Matrixmaterial geschmolzen ist, steigt die Aufheizrate wieder an und erreicht sogar mehr Dynamik als unterhalb des Kristallitschmelzpunkts. Das geschmolzene Polymer hat eine geringere Dichte und Wärmekapazität und antwortet entsprechend mit einer rascheren Erwärmung. Nahe der Solltemperatur setzt die Regelung für die Durchwärmphase ein und dämpft den weiteren Temperaturanstieg, sodass es zu keinem Überspringen kommt.

Der etwas unregelmäßige Kurvenverlauf um den Kristallitschmelzpunkt ist auf die Prozesse beim Schmelzen des thermoplastischen Matrixmaterials zurückzuführen. Durch die Gradierung des Prozesses über dem Materialquerschnitt und die Temperaturabhängigkeit des Absorptionskoeffizienten werden die Effekte über einen größeren Temperatur- und Zeitbereich auseinandergezogen.

Um einen völlig linearen Aufheizverlauf zu erhalten, kann die Heizrate auf einen bestimmten Wert limitiert und zum Regelparameter erhoben werden. Allerdings ist es im Interesse der Prozesseffizienz und auch der Materialschonung, die Heizleistung der IR-Strahler in der Aufheizphase voll auszunutzen, solange keine wesentlichen lokalen Temperaturabweichungen und auch keine Überhitzung der Composite-Oberfläche zu erkennen sind.

Vielzahl von Betriebszuständen ausregeln

IR-Öfen können so voreingestellt werden, dass sie für einen spezifischen Betriebspunkt, beispielsweise eine Beladung von 70% der gesamten Nenn-Nutzfläche in Form eines Rechtecks, eine optimale Temperaturhomogenität liefern. Da der reale Betriebspunkt jedoch meistens deutlich abweicht, ist dies nicht zielführend. Zweckmäßiger ist ein System, das in Bezug auf die thermische Homogenität eine sehr gute Grundcharakteristik aufweist. Die Software der IR-Öfen von Engel ist deshalb in der Lage, eine Vielzahl an Betriebszuständen und Einflussgrößen auszuregulieren, was über ein breites Einsatzspektrum eine sehr gute thermische Homogenität ermöglicht.

IR-Öfen werden prinzipiell für eine Vollbeladung, also die Nutzung der gesamten Strahlerfläche abzüglich der defi-

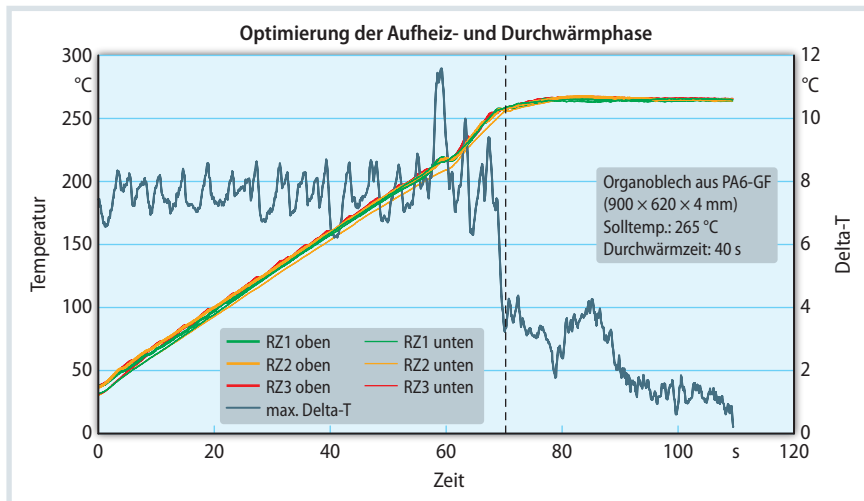


Bild 5. Die softwaregestützte Optimierung der Regelparameter führt zu einer hohen Regelgüte in der Durchwärmphase Quelle: Engel; Grafik: © Hanser

nierten Randbreite ausgelegt. Der hier gezeigte IR-Ofen (**Bild 2**) hat beispielsweise eine Strahlerfläche von 1250 x 750 mm und eine nominale Nutzfläche von 1100 x 600 mm. Strahler, die nicht benötigt werden, können einzeln abgeschaltet werden. Zudem werden meistens mehrere Strahler zu Gruppen zusammengefasst und die ganze Strahlergruppe anhand einer spezifischen Temperaturmessung geregelt.

Die möglichen Ursachen für thermische Inhomogenitäten sind vielschichtig. Unter anderem spielen die gegenseitige Beeinflussung von Regelzonen, die Beladung der Nutzfläche, die Umgebungsbedingungen und das Einschwingverhalten des IR-Ofens eine Rolle.

Die genaue Regelung des IR-Heizprozesses ist ein wesentlicher Bestandteil der Prozessführung bei der Herstellung thermoplastischer Composite-Bauteile. In Systemlösungen von Engel ist die Regelung des IR-Ofens deshalb in die Steuerung der Spritzgießmaschine integriert. So können die Prozessparameter und Messwerte des IR-Ofens zusammen mit den Produktionsdaten aus dem Spritzgießprozess dokumentiert werden.

Mit allen Regelzonen gleichzeitig durchs Ziel

Aufgrund der Vielzahl an möglichen Ursachen für thermische Inhomogenitäten weist in der Praxis jede Regelzone eine andere Aufheizcharakteristik auf. In einem Versuch wurden gezielt thermische Inhomogenitäten herbeigeführt (**Bild 3**). Es zeigte sich, dass deutliche Unterschiede

bei der Aufheizrate resultieren. Die Solltemperatur wird zu unterschiedlichen Zeitpunkten erreicht, und die Stabilisierung der Oberflächentemperatur bei der Solltemperatur erfolgt verzögert.

Diese Situation diente als Ausgangsbasis für die automatische Optimierung des Aufheizverhaltens (**Bild 4**). Das Regelungskonzept zieht Vergleiche zwischen den aktuellen Ist-Temperaturen in den jeweiligen Regelzonen heran. Die Aufheizkurven zeigen nunmehr einen einheitlichen, beinahe linearen Verlauf. Die Stabilisierung im Bereich der Solltemperatur hat sich gegenüber der Ausgangssituation deutlich verbessert.

Bei einer Regelzone, die mit voller Strahlerleistung ihre Solltemperatur frühzeitig erreicht, muss schon in der Aufheizphase die Strahlerleistung reduziert werden. Eine automatische Optimierung und Abstimmung der Regelzonen aufeinander führt dazu, dass die Strahlerleistung in allen betroffenen Regelzonen laufend angepasst wird, sodass die Abweichungen innerhalb einer einstellbaren engen Toleranz bleiben. Damit ergibt sich für sämtliche Regelzonen eine einheitliche Aufheizrate und die Solltemperatur wird von allen Regelzonen zum gleichen Zeitpunkt erreicht.

Von besonderer Bedeutung ist dabei, dass das Prozessregelungskonzept ohne eine führende Regelzone auskommt. Die Messwerte aller Pyrometer werden ständig einbezogen und es wird in allen Regelzonen ein hochdynamischer Aufheizverlauf realisiert, der auf das spezifische Verhalten des Matrixwerkstoffs beim Er-

wärmen, Schmelzen und weiteren Erwärmen des Materials in der Schmelzephase abgestimmt ist.

Bei Annäherung der Oberflächen an die Solltemperatur muss die weitere Feinjustierung bei der Prozessregelung verhindern, dass es zu einem Überspringen der Oberflächentemperatur kommt. Die hohe Temperaturkonstanz in der Durchwärmphase bewirkt, dass die Zieltemperatur im Kernbereich zu einem genau vorhersagbaren Zeitpunkt erreicht wird. Das Aufheizen des thermoplastischen Composites kann daher nach einer definierten, der kürzestmöglichen Dauer beendet werden, was zur Materialschonung beiträgt.

Unterschiedlich dicke Halbzeuge gemeinsam aufheizen

Gerade in der Durchwärmphase ist es entscheidend, die Temperaturabweichungen gering zu halten, um eine lokale Überhitzung und Degradation des Materials zu vermeiden. Dafür müssen die Regelparameter präzise eingestellt sein. Wird beispielsweise das Material, die Zugschnittgröße oder die Dicke des Halbzeugs verändert, dann müssen auch die Regelparameter für die Durchwärmphase nachjustiert werden. Um die Regelparameter automatisch zu optimieren, kann ein separater Messzyklus gefahren werden. Auf diese Weise werden Informationen zum vorliegenden Ausregelverhalten gewonnen und die Regelparameter werden neu berechnet und einge- »

Die Autoren

Junsheng Luo M.Sc. ist Entwicklungsingenieur im Technologiezentrum für Leichtbau-Composites der Engel Austria GmbH in St. Valentin/Österreich; junsheng.luo@engel.at

Dr. Norbert Müller leitet das Technologiezentrum für Leichtbau-Composites von Engel in St. Valentin; norbert.mueller@engel.at

Service

Literatur & Digitalversion

» Das Literaturverzeichnis und ein PDF des Artikels finden Sie unter www.kunststoffe.de/onlinearchiv

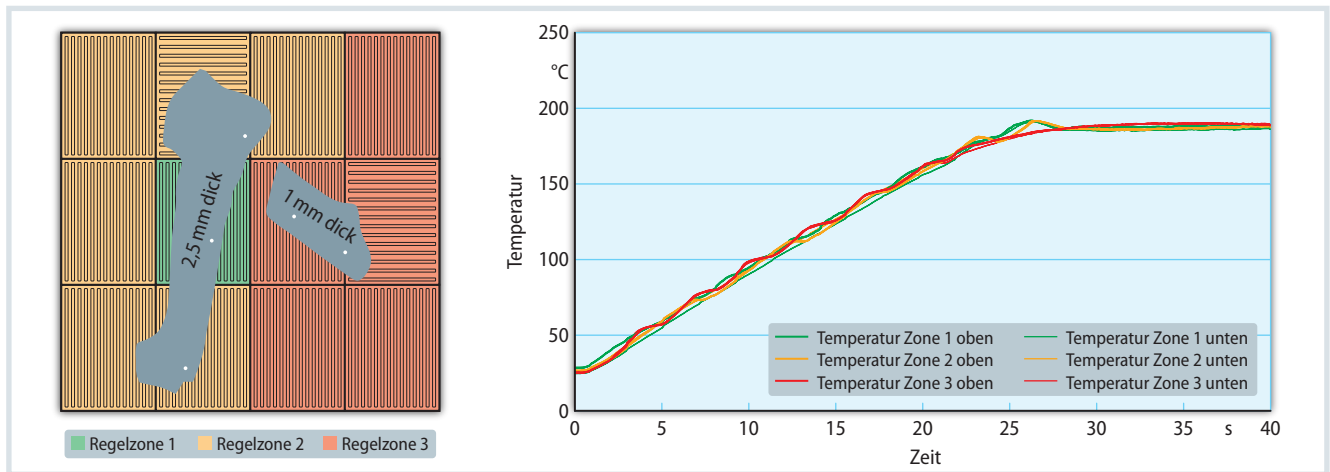


Bild 6. Dank automatischer Prozessoptimierung erreichen die beiden Organobleche trotz ihrer unterschiedlichen Dicke gleichzeitig die Solltemperatur. Quelle: Engel; Grafik: © Hanser

stellt. Daraus resultiert eine hohe Regelgüte (**Bild 5**).

Eine vollständig automatisierte Fertigungszelle für ein Türstrukturbauteil verarbeitet drei verschieden dicke Organobleche (**Titelbild**). Zwei Zuschnitte mit 1,0 und 2,5 mm Dicke werden gemeinsam in einem horizontalen IR-Ofen aufgeheizt (**Bild 6**). Unter Standardbedingungen würde sich das dünnere Organoblech wesentlich schneller aufheizen als das dickere. Die Limitierung des maximal zulässigen Temperaturunterschieds zwischen den Regelzonen stellt jedoch einen einheitlichen und gleichmäßigen Temperaturverlauf sicher. Die beiden Zuschnitte

erreichen gleichzeitig die Solltemperatur. Für ein 0,6 mm dickes Organoblech wird ein einseitiger und vertikal angeordneter IR-Ofen eingesetzt. Im Vordergrund steht hier ein besonders schnelles Hot-Handling, weil das dünne Halbzeug sehr schnell abkühlt. Die drei Zuschnitte werden im Werkzeug zusammengeführt. Innerhalb von 70 s Zykluszeit werden sie zu einem lastpfadgerecht ausgelegten Composite-Bauteil verarbeitet.

Fazit

Zusammen mit der Automatisierung bildet die IR-Heiztechnik den Schlüssel für

eine optimale Verarbeitung thermoplastischer Composite-Halbzeuge. Ein neues Konzept für die Regelung der Heizprozesse erlaubt es, rasche und hochpräzise Aufheizverläufe zu erzielen und so unterschiedlich dicke Organobleche in einem Arbeitsschritt zu verarbeiten. Dabei wird der Maschinenbediener durch automatische Optimierungsroutinen bei der Feinjustierung unterstützt. Das softwareunterstützte Auffinden geeigneter Regelungsparameter führt zu konstanten Oberflächentemperaturen während der Durchwärmphase. Äußere Einflüsse werden automatisch ausgeglichen, bevor sie zu kritischen Prozessabweichungen führen. ■