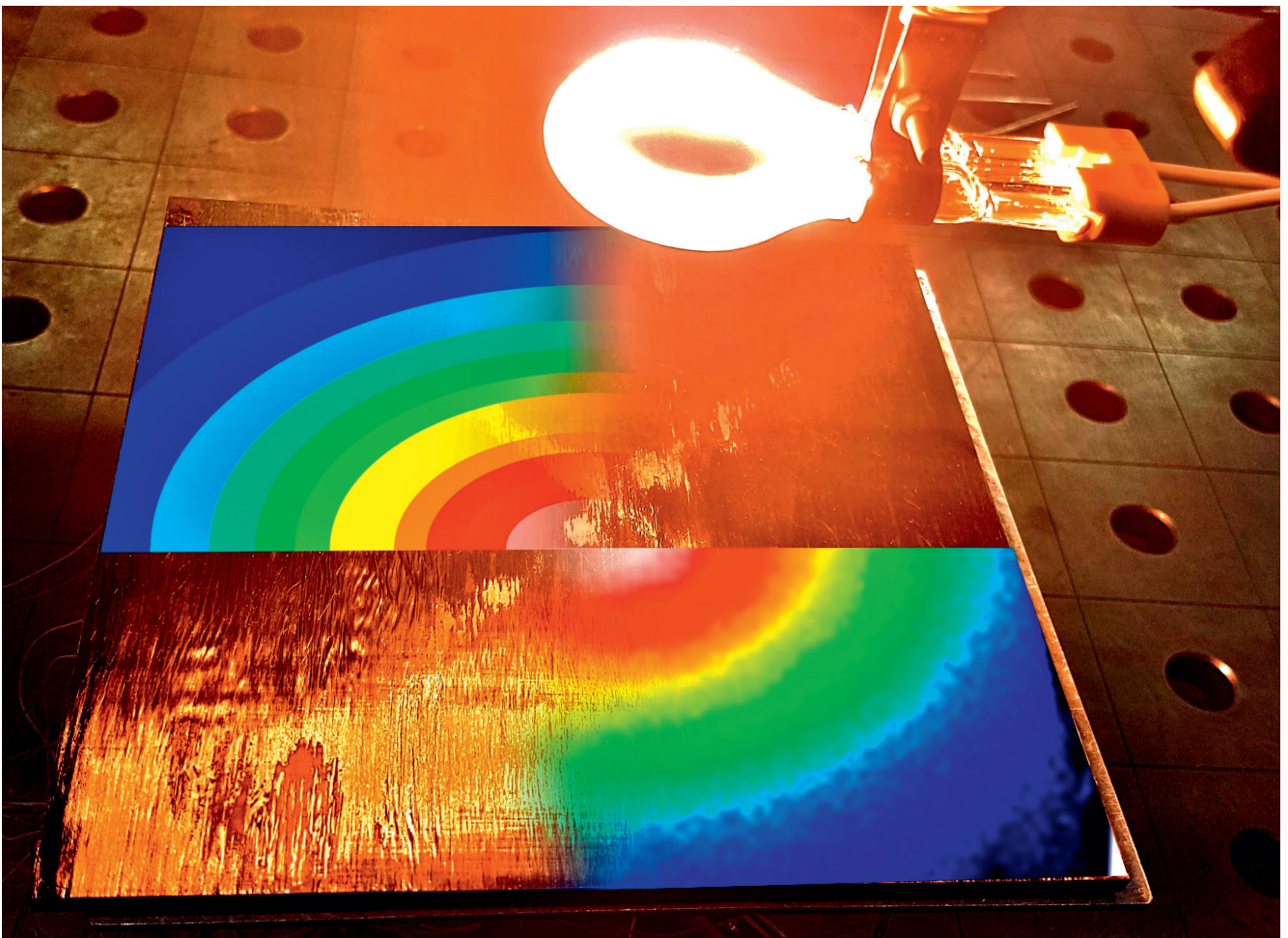


## Fügen von Faserkunststoffverbunden

# Erwärmung von Composites simulieren

Neuartige, werkstoffgerechte Fügeverfahren für Faserkunststoffverbunde setzen die Erwärmung der Materialien voraus. Um die damit verbundenen komplexen Temperaturfelder und -verläufe vorherzusagen, haben das Fraunhofer IAP und die BTU Cottbus-Senftenberg numerische Verfahren entwickelt. Mit diesen können auch verschiedene Strahlungsquellen und Prozessabläufe simuliert werden.



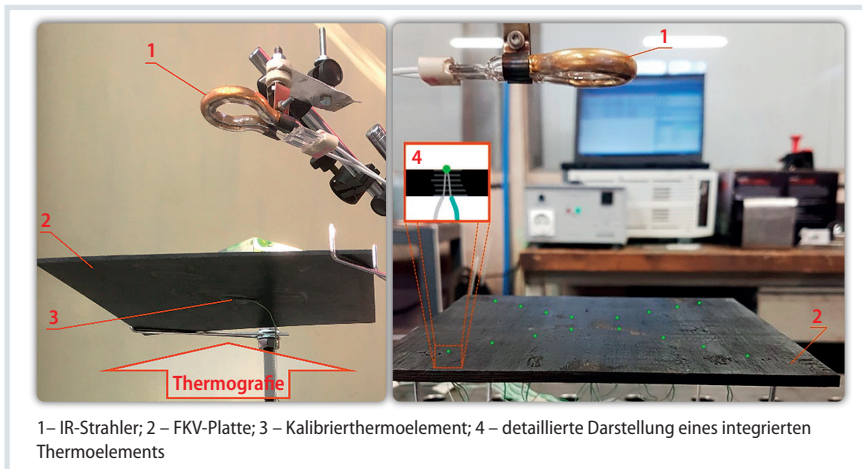
Die Vorhersage des Erwärmungsverhaltens von FKV ist für moderne Fügeverfahren sehr interessant. © BTU, Fraunhofer IAP

**T**hermoplastische Faserkunststoffverbunde (FKV) sind aufgrund ihrer hohen spezifischen Steifigkeiten und Festigkeiten prädestinierte Materialien für den Leichtbau. Sie tragen damit zur Ressourcenschonung sowie zur Reduzierung von Treibhausgasen insbesondere im Verkehrssektor bei. Bei der Entwicklung und Optimierung der Werkstoffe konnten in den letzten Jahren große Fortschritte erzielt werden. In der Verarbeitung kommen jedoch meist faser-schädigende und hohe Kerbspannungen

induzierende Fügeverfahren, wie sie aus dem Stahlbau bekannt sind, zum Einsatz.

Bei neuartigen, werkstoffgerechten Fügemethoden wie dem CMT-Pin-Schweißen (engl. Cold Metal Transfer) werden die Fasern im Fügebereich verdrängt und lastpfadgerecht ausgerichtet statt durchtrennt. Dazu ist ein lokales thermisches Erweichen der Matrix erforderlich. Eine effektive Methode dafür ist die Wärmeeinbringung mittels Infrarotstrahlung [1]. Am Forschungsbereich PYCO des Fraunhofer-Instituts für ange-

wandte Polymerforschung (IAP) und dem Lehrstuhl Füge- und Schweißtechnik der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg (BTU) wurden die numerischen Berechnungen der entsprechenden Temperaturfelder und -verläufe untersucht. Die entwickelten Simulationsmodelle lassen sich auf weitere Anwendungsfelder übertragen. Dadurch können unterschiedliche Strahler und Prozessabläufe ohne kostenintensiven experimentellen Aufwand erprobt werden.



**Bild 1.** Versuchsaufbau zur experimentellen Messung der Temperaturfelder an der Unter- (links) und Oberseite (rechts) der FKV-Platte: Das Thermografiesystem auf der nicht bestrahlten Unterseite wird mit einem Thermoelement geeicht. Auf der bestrahlten Oberseite kommen für die Messung mehrere Thermoelemente zum Einsatz. © BTU, Fraunhofer IAP

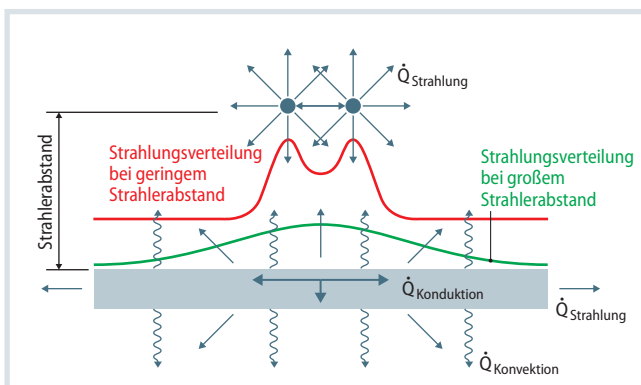
Untersucht wurde carbonfaserverstärktes Polyamid 6 (PA6) mit einer symmetrischen Abfolge von unidirektionalen 0/90°-Lagen. Die Anzahl der 0°- und 90°-Lagen wurde der Plattendicke angepasst. Für die Herstellung der Organo-bleche kam eine KV275.09-Heißpresse von Rucks Maschinenbau zum Einsatz. Die Erwärmung erfolgte mit einem Omega-IR-Strahler des Unternehmens Heraeus Noblelight mit einem Durchmesser von 39 mm und einer Nennleistung von 250 W. Experimentell wurde die Temperatur auf der nicht bestrahlten Seite der FKV-Platten mittels eines Thermografiesystems untersucht (**Bild 1**). Dieses wurde mithilfe von Messwerten eines Typ-K-Thermoelements auf derselben Seite geeicht.

Die thermografische Untersuchung der bestrahlten FKV-Seite bei der Erwärmung wird durch die Reflexion der IR-Strahlung erschwert. Deshalb erfolgte die Temperaturmessung auf der Oberseite der bestrahlten Platte mittels Thermo-

elementen des Typs K. Dafür wurde die zu untersuchende Platte aus carbonfaserverstärktem Kunststoff (CFK) mit einer Heizplatte auf ca. 270 °C erwärmt und die Thermoelemente so eingedrückt, dass die Kontaktenden möglichst nah an der zu messenden Seite liegen. Experimentell wurden CFK-Platten mit 2 und 3,8 mm Dicke untersucht. Die Temperaturen auf den CFK-Oberflächen wurden dabei kontinuierlich während des Erwärmungs- sowie Abkühlvorgangs aufgenommen. Zur Untersuchung des Einflusses der Strahlerentfernung wurden die Erwärmungsversuche mit den Abständen 28, 35, 54 und 100 mm zwischen der Unterkante des IR-Strahlers und der CFK-Oberfläche durchgeführt.

### Wärmeströme und Strahlungsverteilung

Bei der Untersuchung wird der Omega-Infrarotstrahler parallel im definierten Abstand über der CFK-Probe ange-



**Bild 2.** Wärmeströme und Strahlungsverteilung im modellierten System: Je nach Abstand des Strahlers ändert sich die Strahlungsverteilung. Quelle: Fraunhofer IAP, BTU; Grafik: © Hanser

## Info

### Text

**Lucas Ost** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachgebiet Polymerbasierter Leichtbau der Brandenburgisch Technischen Universität Cottbus-Senftenberg (BTU) und am Forschungsbereich Polymermaterialien und Composite (PYCO) des Fraunhofer-Instituts für Angewandte Polymerforschung IAP.

**Oleg Shapovalov** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Füge- und Schweißtechnik der BTU.

**Felix Kuke** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Forschungsbereich PYCO und Leiter des Zentrums für nachhaltige Leichtbautechnologien (ZenaLeb) des Fraunhofer IAP.

**Dr. Nikolay Doynov** ist Associate Professor am Institute of Metal Science, Equipment and Technologies with the Center for Hydro- and Aerodynamics „Acad. A. Balleviski“ at the Bulgarian Academy of Sciences und wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Füge- und Schweißtechnik der BTU.

**Prof. Dr. Holger Seidlitz** leitet den Forschungsbereich PYCO des Fraunhofer IAP und das Fachgebiet Polymerbasierter Leichtbau der BTU. Er ist CEO des Strukturwandel-Clusters SpreeTec neXt sowie kommissarischer Leiter des Lehrstuhls Füge- und Schweißtechnik; pyco@iap.fraunhofer.de

**Prof. Dr. Vesselin Michailov** leitet den Lehrstuhl Füge- und Schweißtechnik der BTU.

**Marcello Ambrosio** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Forschungsbereich PYCO des Fraunhofer IAP und im Fachgebiet Polymerbasierter Leichtbau der BTU.

### Dank

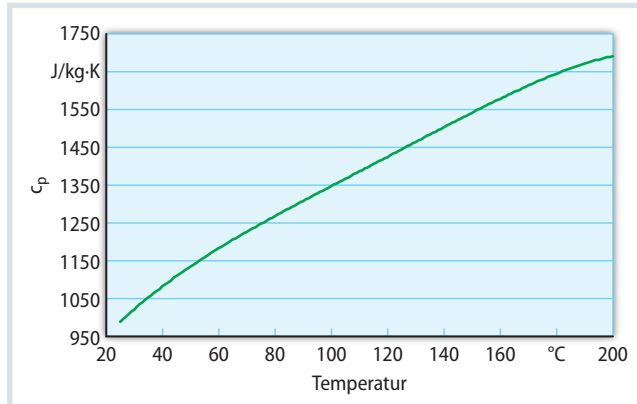
Das Forschungsvorhaben IGF-Nr. 20.649 BR der AiF-Forschungsvereinigung „DVS – Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V.“ wurde im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Die Autoren danken der Forschungsvereinigung DVS für die Unterstützung des Vorhabens und den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses für die wertvollen Hinweise, Erläuterungen und Ratschläge.

### Literatur & Digitalversion

Das Literaturverzeichnis und ein PDF des Artikels finden Sie unter [www.kunststoffe.de/onlinearchiv](http://www.kunststoffe.de/onlinearchiv)

**Bild 3.** Die Wärmekapazität des untersuchten CFK hängt stark von der Temperatur ab.

Quelle: BTU, Fraunhofer IAP;  
Grafik: © Hanser



ordnet. Die Wärmeströme sowie die erwarteten Strahlungsverteilungen bei unterschiedlichen Strahlerabständen sind in **Bild 2** schematisch dargestellt. Die Infrarotstrahlung erwärmt die Oberseite der CFK-Platte. Ein Teil dieser Wärme wird durch Konvektion und durch Strahlung wieder an die Umgebung abgegeben. In der Platte erfolgt der Wärmetransport mittels Konduktion. Aufgrund der Zeitabhängigkeit des Erwärmungsprozesses sind für eine Simulation mit der Finiten-Elemente-Methode (FEM) Angaben zur Wärmekapazität und der Dichte des Materials notwendig. Benötigt werden außerdem die Emissions- und Wärmeübergangskoeffizienten sowie die Wärmeleitfähigkeiten. Sie werden im Folgenden Kalibrierparameter genannt. Für die Untersuchungen wurden sie in einer Parameterstudie bestimmt. Dazu wurden die Werte variiert und jeweils die FEM-Berechnungen durchgeführt. Die Temperaturen als Funktion der Zeit wurden an mehreren Punkten entlang der Plattendiagonalen mit experimentellen Daten verglichen.

Die Materialeigenschaften der Faserverbundkunststoffe wurden bis auf die Wärmeleitfähigkeit experimentell bestimmt:

- Dichte  $\rho = 1,434 \text{ g/cm}^3$  (bestimmt nach dem archimedischen Prinzip)
- Faservolumengehalt  $\phi = 46 \%$  (ermittelt in Anlehnung an DIN EN 2564:2018-12 und DIN 16459:2019-12)
- Zersetzungstemperatur =  $434^\circ\text{C}$  (Onset, bestimmt mittels thermogravimetrischer Analyse (TGA), Heizrate:  $10 \text{ K/min}$ )

Die Wärmekapazität des CFK weist im Unterschied zu den oben genannten Materialparametern eine starke Temperaturabhängigkeit auf. In den Simulationsmodellen ist eine den Messwerten von drei Proben gefittete Funktion implementiert (**Bild 3**). Die Messungen erfolgten mit einem dynamischen Differenzkalorimeter (dynamische Differenzkalorimetrie, engl. differential scanning calorimetry, DSC) mit einer Heizrate von  $10 \text{ K/min}$ .

Im ersten Ansatz erfolgt die Berechnung mit einem radialsymmetrischen

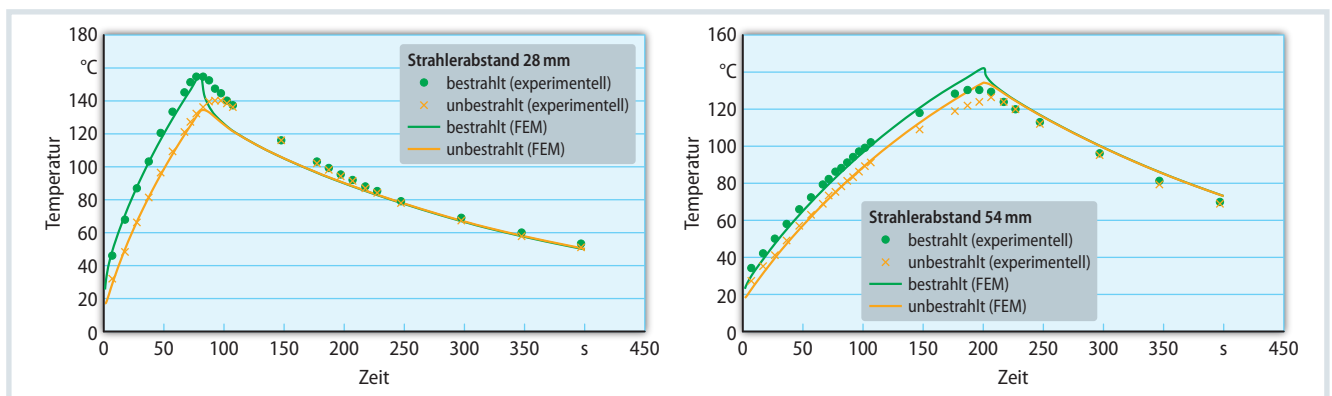
Modell in der Software Ansys R19.1.

Dieses weist eine geringe Elementanzahl und Berechnungszeit auf, kann allerdings für komplexe, nicht radialsymmetrische Probenformen und Strahlquellen nicht angewendet werden. Darüber hinaus lässt sich die Anisotropie der faserverstärkten Kunststoffe beim radialsymmetrischen Modell in der Ebene nicht berücksichtigen. Daraus ergeben sich an vom Plattenzentrum entfernten Positionen Abweichungen zwischen den experimentell und den numerisch bestimmten Temperaturen.

### Radialsymmetrisches Modell: Vorhersage der Temperatur in der Probenmitte

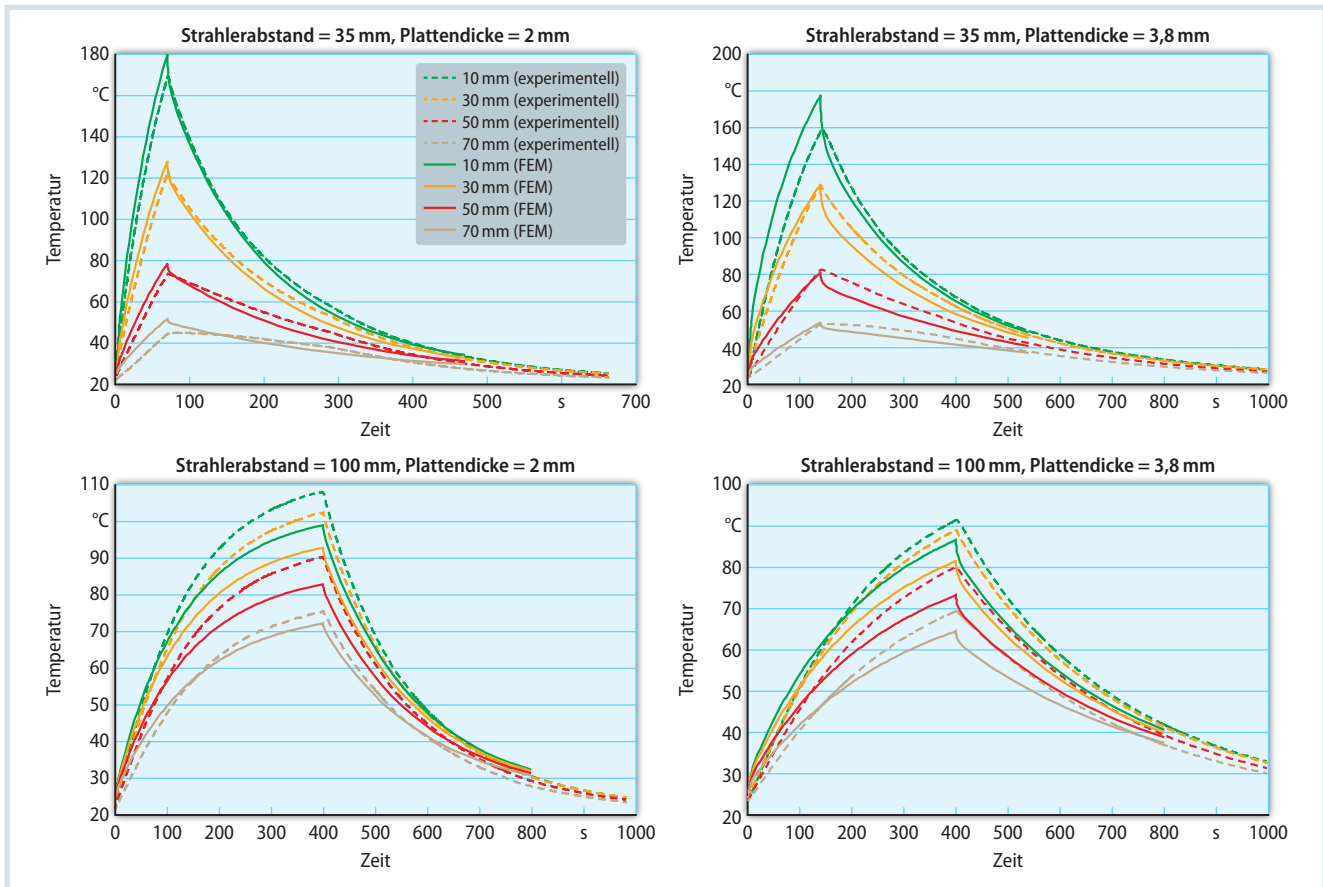
Zur Ermittlung der Kalibrierparameter sowie zur experimentellen Validierung des Modells wurde eine kreisförmige CFK-Scheibe mit einer Dicke von  $3,8 \text{ mm}$  und einem Durchmesser von  $76 \text{ mm}$  bei den Strahlerabständen  $28 \text{ mm}$  (Dauer  $80 \text{ s}$ ) und  $54 \text{ mm}$  ( $200 \text{ s}$ ) bestrahlt. Der Temperaturverlauf in der Mitte der Probe wurde auf beiden Seiten kontinuierlich mit Zeitabständen von  $1$  bis  $30 \text{ s}$  aufgenommen. Die Messwerte auf der Oberseite wurden mit einem mittig eingedrückten Thermoelement und auf der Unterseite mittels Thermografie aufgenommen.

Der Vergleich der Simulationsergebnisse mit den experimentellen Daten des zeitlichen Temperaturverlaufs in der Probenmitte ist in **Bild 4** dargestellt. Die beste Übereinstimmung wurde mit einem konstanten Übergangskoeffizient von  $4 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$  erreicht. Zusätzlich wurde an den Außenflächen der CFK-Platte ein ebenfalls konstanter Emissionskoeffizient



**Bild 4.** Vergleich des experimentell ermittelten und des mit dem radialsymmetrischen Modell berechneten Temperaturverlaufs der bestrahlten und nicht bestrahlten Flächen in der Probenmitte während und nach der Erwärmung: Die Werte zeigen eine hohe Übereinstimmung zwischen Experiment und Simulation. Quelle: BTU, Fraunhofer IAP; Grafik: © Hanser





**Bild 5.** Vergleich der Temperaturverläufe an der Oberseite zwischen FEM und Experiment für verschiedene Entfernungen zur Plattenmitte: Der Strahlerabstand hat einen größeren Einfluss auf die Erwärmungsgeschwindigkeit als die Plattendicke. Quelle: BTU, Fraunhofer IAP; Grafik: © Hanser

von 0,95 angenommen. Der Emissionskoeffizient des Strahlers, dessen Einfluss mit einem Wert zwischen 0,6 und 0,8 vernachlässigbar klein ist, wurde mit 0,7 angenommen. Die Wärmeleitfähigkeiten wurden als  $\lambda_{\parallel} = 15 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  in Flächen- und  $\lambda_{\perp} = 1,5 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  in Dickenrichtung angenommen.

### **Dreidimensionales Modell: Vorhersage der Temperaturverteilung über die Probe**

Mit dem radialsymmetrischen Modell können die Temperaturen in der Probenmitte berechnet werden. Zahlreiche Anwendungsfälle setzen jedoch eine Übereinstimmung der zeitabhängigen Temperatur an mehreren Punkten sowie die Möglichkeit der Simulation komplexer Strahler- und Probenformen voraus. Daher erfolgten weitere Untersuchungen mit dreidimensionalen Modellen in der Simulationssoftware Abaqus 2019. Zur Validierung dieser Modelle wurden quadratische CFK-Platten mit einer Kantenlänge von 160 mm und Dicken von 2 und 3,8 mm experimentell unter-

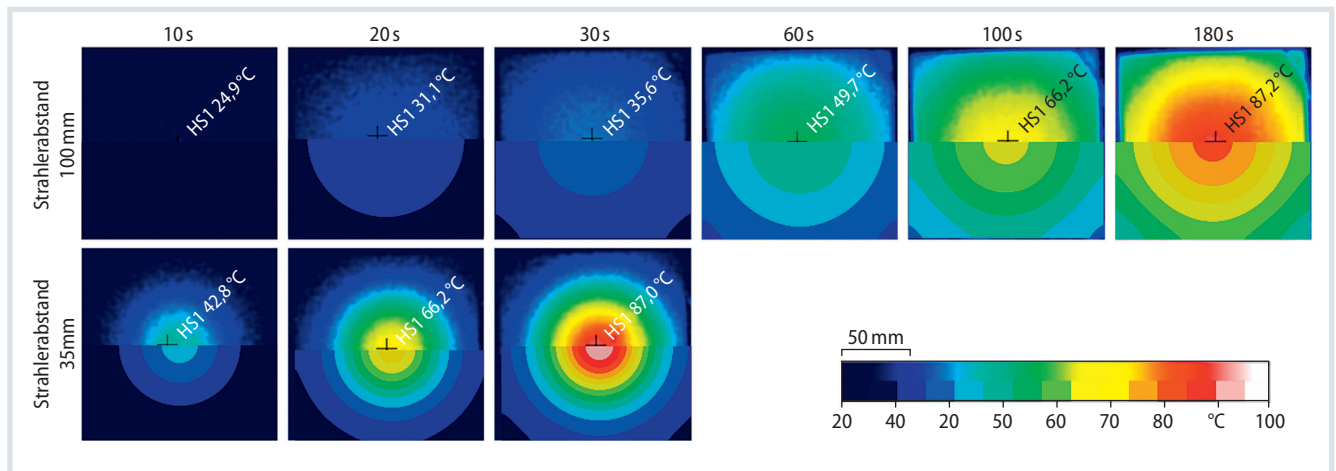
sucht. Zur Beobachtung der Flächenverteilung der Temperatur auf der bestrahlten Seite wurden 16 Thermoelemente mit unterschiedlichen Abständen zum Plattenzentrum in die CFK-Platte eingedrückt (**Bild 1**).

Bei der Simulation der IR-Erwärmung der rechteckigen Probe wurde der Omega-Strahler als rundes Bauteil angenommen und zur Reduzierung der Berechnungszeit die sich damit ergebende zyklische Symmetrie genutzt. Die Übertragung der mittels radialsymmetrischem Modell festgestellten Kalibrierparameter auf die 3D-Simulation der rechteckigen Platte ergab wesentliche Abweichungen zu den Experimenten. Daher wurden einzelne Kalibrierparameter neu angenommen. Der Wärmeübergangskoeffizient beschreibt den konvektiven Wärmeübergang und wurde mit einem konstanten Wert von  $2,5 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$  modelliert. Der Emissionskoeffizient beschreibt den Wärmeübergang mittels Strahlung und wurde für das CFK mit 0,95 und für den Strahler mit 0,6 angenommen.

Die unidirektionalen (UD) Lagen des symmetrischen 0/90°-Lagenaufbaus sind anisotrop. Sie weisen in der Ebene zwei Wärmeleitfähigkeitswerte, den in Faserrichtung und den senkrecht zur Faserrichtung, auf. Der dritte Wert beschreibt die Wärmeleitfähigkeit in Dickenrichtung und entspricht in dem Fall dem Wert senkrecht zu den Fasern in der Ebene. In dem FEM-Modell wurden die einzelnen UD-Lagen jeweils durch ein Volumenelement in Dickenrichtung abgebildet. Die Carbonfasern selbst sind ebenfalls anisotrop. Ihre Wärmeleitfähigkeit wurde in Faserrichtung mit  $10 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  angenommen und orthogonal zur Längsrichtung mit  $1,7 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  [2, 3]. Die Wärmeleitfähigkeit des PA6 beträgt  $0,23 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  [4]. Die Berechnung der Wärmeleitfähigkeit der UD-Lagen erfolgte mit der Mischungsregel [5]:

$$\lambda_{\parallel} = \lambda_{\parallel f} \cdot \varphi + \lambda_m \cdot (1 - \varphi)$$

Senkrecht zur Faserrichtung wird der Mittelwert aus den mit folgenden Gleichungen bestimmten Werten verwendet [6-8]: »



**Bild 6.** Vergleich zwischen FEM (untere Bildhälften) und Experiment (obere Bildhälften) der Temperaturfelder auf der Unterseite einer 2 mm dicken CFK-Platte bei der Erwärmung: Zwischen beiden besteht eine hinreichende Übereinstimmung. © BTU, Fraunhofer IAP

$$\lambda_{\perp} = \lambda_m \cdot \left( 1 - 2 \frac{\varphi}{c + \varphi - \frac{3\varphi^4}{c \cdot \pi^4} S_4^2} \right)$$

$$\text{mit } c = \frac{1 + \frac{\lambda_{\perp f}}{\lambda_m}}{1 - \frac{\lambda_{\perp f}}{\lambda_m}}$$

$$\text{und } S_4 = 0,0323502 \cdot \pi^4$$

$$\lambda_{\perp} = \frac{\lambda_{\perp f} + \lambda_m + (\lambda_{\perp f} - \lambda_m) \cdot \varphi}{\lambda_{\perp f} + \lambda_m - (\lambda_{\perp f} - \lambda_m) \cdot \varphi} \cdot \lambda_m$$

Es ergibt sich eine Wärmeleitfähigkeit der Einzellagen in Faserrichtung von  $\lambda_{\parallel} = 4,72 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  und senkrecht zur Faserrichtung von  $\lambda_{\perp} = 0,48 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ .

### Vergleich von Experiment und Simulation

Darüber hinaus wurden, da Verluste anzunehmen sind, geringere Leistungen des Strahlers untersucht. Die geringste bestimmte Abweichung zwischen Experiment und Modell wird bei 210 W in der Simulation erreicht. Der Vergleich der Ergebnisse des entwickelten FEM-Modells mit den experimentellen Messungen der Temperaturverläufe an der Oberseite ist in **Bild 5** für unterschiedliche Entfernungen der Messpunkte zur Plattenmitte entlang der Diagonalen dargestellt. Der Vergleich der mit Thermografie gemessenen Temperaturfelder an der Unterseite der 2 mm dicken CFK-Platte mit dem entwickelten Modell ist in **Bild 6** zu sehen.

Die Erwärmungsgeschwindigkeit auf der bestrahlten Seite nimmt bei kürzerem Abstand des Strahlers, insbesondere nah am Plattenzentrum, deutlich zu. Das entwickelte Modell bildet das ab. Etwaige Abweichungen zwischen Experiment und Simulation entstehen durch den im FEM-Modell fehlenden Spiegel, Messungenauigkeiten bei den Materialeigenschaften, die Anpassung der Parameter, die Vernachlässigung der Reaktionszeit des Strahlers beim Einschalten und die Umgebungstemperatur. Letztere sollte an sich konstant bei 25 °C liegen, schwankt im Experiment aber um 5 °C. Die Vergrößerung der Plattenstärke von 2 auf 3,8 mm hat einen geringeren Einfluss auf die Erwärmungsgeschwindigkeit auf der bestrahlten Seite als der Abstand des Strahlers.

### Den passenden Abstand des Strahlers bestimmen

Mit den Thermoelementen werden zeitliche Verläufe der Temperaturen an bestimmten Positionen auf der Probenoberseite gemessen. Die Aufnahmen der Wärmebildkamera geben hingegen kontinuierliche Darstellungen der Temperaturfelder auf der Probenunterseite zu bestimmten Zeitpunkten wieder (**Bild 6**). Die Simulationsergebnisse stimmen sowohl bezüglich der zeitlichen Verläufe als auch der Temperaturfelder hinreichend genau mit den Experimenten überein.

Ein Abstand des Strahlers von 35 mm im Vergleich zu 100 mm ergibt eine schnellere Erwärmung im Platten-

zentrum und eine stärker konzentrierte Temperaturverteilung. Anhand der gewonnenen Ergebnisse und den entwickelten Modellen kann der Strahlerabstand entsprechend der Anwendungen und den geforderten Temperaturverteilungen angepasst werden. Darüber hinaus lassen sich die Modelle zur Untersuchung alternativer Strahler verwenden. An den beiden Forschungsinstitutionen konnte damit eine Erwärmungsstrategie für das Fügen von FKV und Metallen mit der CMT-Pin-Technik entwickelt und ein dafür geeigneter Strahler und Prozessablauf bestimmt werden.

### Zusammenfassung

Bei den durchgeführten Untersuchungen wurde der Prozess der Erwärmung von FKV mit Infrarotstrahlung numerisch und experimentell betrachtet. Durch den Einsatz unterschiedlicher Probenabmessungen und Messtechniken konnte der Einfluss der Plattendicke sowie des Strahlerabstands auf die Temperaturänderung in den CFK-Platten untersucht werden. Das radialsymmetrische Modell der IR-Erwärmung ermöglicht mit geringem Rechenaufwand eine gute Vorhersage des zeitlichen Temperaturverlaufs in der Probenmitte. Der Vergleich experimenteller Ergebnisse mit denen eines 3D-Simulationsmodells mit zyklischer Symmetrie zeigt eine gute Übereinstimmung sowohl zeitlicher als auch räumlicher Temperaturänderung in der CFK-Probe während der Erwärmung und Abkühlung. ■