

HEPHAISTOS – Energieeffizienz und Innovation durch Mikrowellentechnik für die industrielle Produktion von polymeren Verbundwerkstoffen

L. Feher, S. Stanculovic, J. Akhtar, V. Nuss, T. Seitz, C. Zöller, S. Layer, J. Dittrich, IHM

Einleitung

Hohe Mobilität und Ressourcenverbrauch kennzeichnen heute ein global exportorientiertes Wirtschaftssystem. Die zunehmende Verknappung von Ressourcen und Energie wird konsequenten Einfluss auf die Kostenstruktur von Produkten, Dienstleistungen, Standorten und die Mobilität an sich nehmen. Durch vorausschauende, innovationsfördernde Entwicklungen können neue ressourceneffizientere Fertigungsverfahren, Systeme und auch Materialien entwickelt werden. Neue innovative Wege werden seit einigen Jahren am KIT (Karlsruhe Institut of Technology, Institut für Hochleistungsimpuls- und Mikrowellentechnik IHM, am Forschungszentrum Karlsruhe) beschritten um mit Mikrowellen energieeffiziente Anwendungsfelder durch Technologietransfer für die Industrie zu erschließen. Mikrowellen sind heute schon in verschiedenen technischen Anwendungsformen zu einem selbstverständlichen Bestandteil des modernen Lebens geworden (z. B. Küchenmikrowelle). Im Vergleich zu konventionellen Erwärmungsverfahren haben Mikrowellen ganz besondere Vorteile.

Die Erzeugung sehr gleichmäßiger, homogener Felder war bislang ein Kernproblem der Mikrowellenprozesstechnik und für viele industrielle Anwendungen unverzichtbare Voraussetzung. Dieses Problem wurde schon 1997 in Grundlagenuntersuchungen am Forschungszentrum Karlsruhe gelöst sowie patentiert. Es zeigte sich, dass eine hexagonale Geometrie des Mikrowellenapplikators unter bestimmten Voraussetzun-

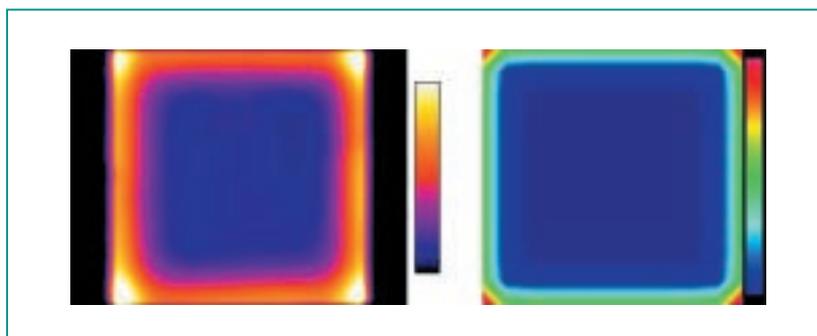


Abb. 1: Vergleich Simulation und Experiment einer beginnenden Mikrowellenerwärmung von CFK.

gen ideal zur Homogenisierung der Mikrowellenfelder ist. Ein weiterer entscheidender Schritt für diese technischen Entwicklungen war auch die Berechnung von Temperaturantworten von Materialien in elektromagnetischen Feldern. Um diese komplexe Thematik behandeln und verstehen zu können, war die Entwicklung verschiedener numerischer Simulationsmethoden [1] entscheidend (Abb. 1). Es konnte analytisch und numerisch vorhergesagt werden, dass z. B. bei kohlefaserverstärkten Verbundwerkstoffen (CFK) Prozessfelder für die Aushärtung mit verschwindenden thermischen Gradienten erzeugt werden können (Abb. 2).

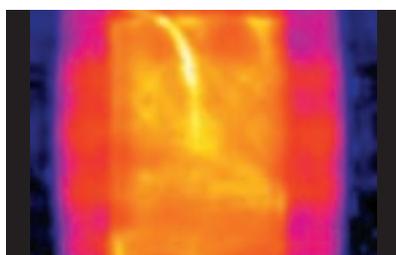


Abb. 2: Thermografie einer CFK-Platte im stationären Zustand – nur das regelnde Thermoelement hebt sich leicht von der gleichmäßigen Hintergrundtemperatur der Platte unter dem Aufbau ab.

Für diesen industriellen Anwendungsfall wurde eine modulare Mikrowellensystemlinie HEPHAISTOS [2] mit exzellenten homogenen Feldverteilungen entwickelt. HEPHAISTOS steht für: High Electromagnetic Power Heating Autoclaveless Injected Structures Oven System und verweist damit auf die zukünftige zeit- und energieeffiziente Ersatzmöglichkeit für die Autoklavtechnologie (Thermische Öfen, die unter sehr hohen Druck gesetzt werden). Übrigens, schon in der antiken Welt war Hephaistos zuständig für die Metall- und Ofenverarbeitung. Er ist identisch mit Daedalus, der mit dem bekannten „ersten mythologischen Flug“ und den berühmten „geleiteten Flügeln“ zu tun hat.

Die Idee zunehmender Ressourcenschonung für Flugzeuge, Autos und Windkraftanlagen

Diese Problematik, der sich schon Daedalus und Ikarus stellten, ist für die Luftfahrtforschung hochaktuell, insbesondere seitdem man Flugzeuge und Tragflächenteile zunehmend aus synthetischen Leichtbaumaterialien baut [3]. Dabei ist die Frage des richtigen „Leims“

oder besser Kunststoff für Flügel natürlich von „tragender“ Bedeutung [4]. Bei Metallen ist nach ca. 80 Jahren intensiver technischer Entwicklung das Potenzial für zusätzlich verbesserten Leichtbau absehbar ausgeschöpft. Bei kohlefaserverstärkten Verbundwerkstoffen (CFK) ist dagegen die Entwicklung im vollen Gange. Aufgrund ihrer geringen Dichte von $1,55 \text{ g/cm}^3$ gegenüber Aluminium mit $2,8 \text{ g/cm}^3$ sind diese Werkstoffe für den Leichtbau besonders gut geeignet.

Derzeitige Flugzeuge bestehen im Wesentlichen noch aus Metall. Beim Airbus A320 beträgt der Gewichtsanteil von Faserverbundwerkstoffen immerhin schon 15 %. Während in jedem A380 noch rund 60 % Aluminium und 22 % CFK stecken, soll der CFK-Anteil beim neuen Langstreckenflugzeug A350 XWB auf 52 %, vergleichbar mit der neuen 787 von Boeing steigen. Duroplastische CFK-Verbundwerkstoffe werden heute noch in schweren Industrieöfen bei hohem Druck, den besagten Autoklaven ausgehärtet. Die international patentierten HEPHAISTOS-Systeme arbeiten dagegen grundsätzlich ohne zusätzlichen Druck und erwärmen dabei trägheitslos nur das Bauteil selber (selektive Heizung) – die Ofenumgebung wird nicht mehr aktiv geheizt woraus sich eine erhebliche Energieeinsparung ergibt [5]. Für die HEPHAISTOS-Systeme sind zudem neuartige hocheffiziente Antennensysteme entwickelt worden, mit denen fast die gesamte erzeugte Mikrowellenleistung verlustfrei in die Ofenmodule eingekoppelt werden kann [6, 7]. Im Weiteren wirken die Mikrowellen volumetrisch, d. h. ohne Wär-

meileitung dringt die Mikrowelle in das zu erwärmende Material ein und hinterlässt sofort einen Heizeintrag im Inneren. Damit kann bei einem geringen Energieverbrauch eine hohe Heizrate in dem Bauteil direkt durch die Mikrowelle erzeugt werden. Zudem erschließen sich synergetisch neu entwickelte kostengünstigere Verfahren der Luftfahrtforschung in Kombination mit der HEPHAISTOS-Technologie, um polymere Harze als „Leim“ zwischen trockene Kohlefasern zu injizieren. Wie Untersuchungen der EADS zeigten, „klebt“ der mikrowellengehärtete „Leim“ besser zwischen den Fasern als durch die Prozessierung in thermischen Öfen. Dieses äußert sich zum Beispiel in einer Verbesserung des ILS-Wertes (Interlaminary Shear Strength), der die Härte des Materials als auch die Anbindung der Harzmatrix mit den Fasern charakterisiert (Abb. 3). Die Materialien halten höhere Belastungen aus.

Was nun im Flugzeug Gewicht einspart, kann auch dazu dienen, Automobile leichter zu machen. In der Formel 1 z. B. wird CFK in vergleichbarer Weise wie in der Luftfahrt eingesetzt – für den breiten Einsatz von Verbundwerkstoffen im Automobilbereich, wo nicht nur auf synthetische Kohlefasern gesetzt wird, sondern auch Naturfasern wie Flachs und Sisal für Fahrzeugverkleidungen zunehmend eingesetzt werden, bestehen ähnliche Einsatz- und Einsparmöglichkeiten durch Mikrowellentechnik. Neben den technologischen Industrieentwicklungen bis zu industriellen Großsystemen werden mit anderen KIT-Instituten des Forschungszentrums Karlsruhe und zahlreichen bedeutenden Industrieunternehmen im Rahmen eines BMBF-Projektes Grundlagen und Anwendungen erforscht, um bessere und schnellere Aushärtungen von Harzen durch spezifische mikrowellensensitive Materialien und Nano-Partikel [8] zu er-

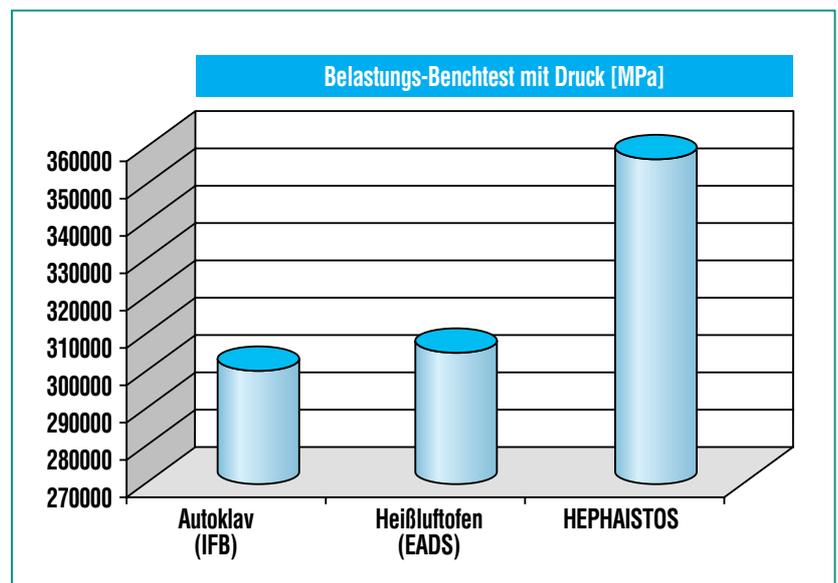


Abb. 3: Vergleich der ILS-Werte von identischen Testplatten in verschiedenen Öfen.



Abb. 4: Forschungszentrum Karlsruhe, IHM: Projektleitung des BMBF-Vorhabens „Innovative modulare Mikrowellentechnik zur Prozessierung von Faserverbundwerkstoffen“.

möglichen (Abb. 4). Diese Aktivitäten werden am IMF-3 (Dr. Szabo) und ITC (Prof. Döring) durchgeführt. Die HEPHAISTOS-Technik kann durch ihre Modularität sehr große Systeme realisieren und damit sehr große technische Verbundstrukturen hochqualitativ aushärten. Dieses ist neben dem Flugzeugbau auch für nachhaltige Energieerzeugung mit großen Windkraftanlagen und Rotorblättern aus CFK ein bedeutendes Zukunftsthema (Abb. 5). Die HEPHAISTOS Mikrowellentechnik wurde seit 2003 in einem Technologietransferprojekt der Abteilung MAP (Stabsabteilung Marketing, Patente und Lizenzen) des Forschungszentrums Karlsruhe mit der Vötsch Industrietechnik sowie den Partnern Institut für Flugzeugbau (IFB) an der Universität Stuttgart und dem Composite Research Center der EADS in München industrialisiert [9].

Frisch gepresst mit Mikrowellen

Die Frage des richtigen „Leimes“ für Flügel und dessen Umgang, war im Verständnis der antiken Autoren des Ikarus-Mythos schon von vitaler Bedeutung – genauso wie in der heutigen Verbundwerkstoffforschung, insbesondere seitdem man aerodynamisch relevante Primärstrukturen wie Tragflächenteile und Vorflügel zunehmend aus solchen synthetischen Leichtbaumaterialien (kohlefaserverstärkten Kunststoffen, CFK) bauen möchte. Ein neu entwickelter Mikrowellen-Injektor wird in Kombination mit der HEPHAISTOS-Technologie (siehe Beitrag „Mikrowellen revolutionieren die industrielle Erwärmungstechnik“) polymere duroplatische Harze blitzschnell als „Leim“ zwischen trockene Kohlefasern von vorbereiteten Strukturteilen in der Fertigung pressen [10]. Dieser Produktionsschritt der Harzinjektion

wird in Zukunft durch ein neu entwickeltes kleines kompaktes Mikrowellensystem beschleunigt und verbessert werden. Kern dieser technischen Innovation ist ein kompakter Mikrowellenapplikator, der eine optimierte Felddurchdringung des durchströmenden Mediums ermöglicht und damit eine volumetrische Heizung des Flüssigkeitsquerschnittes garantiert. In Rohrquerschnitten bildet sich bekanntlich ein Poisson-Strömungsprofil aus, das mittig eine höhere Geschwindigkeit als am Rand besitzt. Schnell strömende Flüssigkeiten, hier zudem bei schlecht wärmeleitenden Harzen, müssten über die am Rand langsam gleitende Grenzschicht zum schnell fließenden Kern erwärmt werden. Dieses ist bei schnellen Geschwindigkeiten nicht mehr möglich, da die Wärme den Kern vom Rand nicht mehr erreicht und damit zum einen Überhitzungen am Rand auftreten und zum anderen eine geregelte Temperatur des Kernes gar nicht möglich wird. Anders bei Verwendung des Mikrowelleninjektors. Dieser heizt, die Wärmeleitung umgehend, vom schnell fließenden Zentrum zum Rand hin unmittelbar das durchfließende Me-



Abb. 5: Der HEPHAISTOS-CA2 vor der Aushärtung einer Großstruktur in einem metallischen Werkzeug der EADS.

dium auf. Damit können sehr hohe Durchflussraten erreicht werden. Zudem findet eine Aktivierung der Harzmonomere statt, was zu einer erhöhten Beweglichkeit und damit Senkung der Viskosität des Harzes führt. Das Harz lässt sich dadurch schneller, „flüssiger“, geschmeidiger und mit weniger Fehlstellen in die trockenen Kohlefasern der Struktur injizieren. Die Entwicklungen zielen auf kompakte, modulare Systeme, die als Stand-Alone-Einheiten die Harzinjektion automatisiert bei der Fertigung von Luftfahrt- und Automobilteilen vornehmen und auch als vollintegrierte Komponenten in der HEPHAISTOS-Produktlinie verwendet werden können. Im Juni 2007 wurde am Forschungszentrum Karlsruhe eine neue Anlage HEPHAISTOS-CA3 (VHM 180/300) aufgebaut, die weltweit das größte Mikrowellenkammersystem mit über 7000 l Prozessvolumen darstellt. Diese Anlage ist zudem einmalig in ihrer Konzeption, da sie über zwei Zugänge die experimentelle Realisie-

rung von Durchflussverfahren ermöglicht. Die Anlage befindet sich derzeit im Testbetrieb und wird innerhalb des BMBF-Vorhabens mit den neuartigen automatisierten Mikrowelleninjektoren ausgerüstet werden.

Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurden Eigenschaften, Vorteile und Probleme der HEPHAISTOS-Systemlinie für die energieeffiziente Herstellung verkehrstechnischer Leichtbaumaterialien behandelt. Zusammen mit Airbus wird diese Technologie für den Einsatz im A350- und A31X-Programm derzeit vorbereitend untersucht. Ein weiterer neuartiger Anwendungsfall stellt die Prozessierung und Konsolidierung von Hochtemperaturthermoplasten dar, die aufgrund ihrer konventionell sehr teuren und komplizierten Prozessierbarkeit nur bei sehr ausgewählten Strukturteilen zur Anwendung kommen. Die HEPHAISTOS-Tech-

nologie kann nach dem bisherigen Ergebnisstand für die industrielle Anwendung dieser extrem leichten und starken Materialien einen Quantensprung bewirken. Auch die Erwärmung und Prozessierung von keramischen Materialien ist damit bei 2,45 GHz möglich, was bislang nur bei höheren Frequenzen durchgeführt wurde. Für eine industrielle Erschließung energieeffizienter Produktionsprozesse wurde im Dezember 2007 das neue HEPHAISTOS-Versuchszentrum am IHM eingeweiht. Wie die theoretischen Forschungen zudem zeigten, ist für solche Fortschritte und Optimierungen das Verständnis physikalischer Quantenvorgänge und Energiekonversionen im Mikroskopischen in Präzisierung der klassischen Elektrodynamik erforderlich [11]. Es wird spannend, welche neuartigen Optimierungen und Technologien sich aus diesen neuen Ansätzen für die Werkstoffverarbeitung ableiten lassen werden und die gute alte Küchenmikrowelle als eine „Quantenmaschine“ begriffen wird.

Literatur

- [1] L. Feher, M. Thumm, *Nachrichten - Forschungszentrum Karlsruhe*, 28, 1996, 215–223
- [2] L. Feher, M. Thumm, *Nachrichten – Forschungszentrum Karlsruhe*, 35, 2003, 123–127
- [3] C.Y.Niu, *Composite Airframe Structures*, Hong Kong Conmilitt Press Ltd., 1992
- [4] J.Brandt, K. Drechsler, J. Filsinger, *New Approaches in Textile and Impregnation Technologies for the Cost-Effective Manufacturing of CFRP Aerospace Components*, ICAS 2002, Toronto, (2002)
- [5] L. Feher, M. Thumm, *Microwave Innovation for Industrial Composite Fabrication. The HEPHAISTOS Technology*, IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 32, No. 1, February 2004, 73–79
- [6] S. Stanculovic, L. Feher, M. Thumm, *Design of travelling wave slotted waveguide feeds for 2.45 GHz industrial microwave heating system*, 10th International Conference on Microwave and Radiofrequency heating, Modena, Italy, Sept. 12–15, 2005, 454–457
- [7] S. Stanculovic, L. Feher, M. Thumm, *Slotted waveguides for 2.45 GHz industrial applicators*, Noordwijk, ESA, 2005, 21–24
- [8] L. Feher, et al., *Gigahertz and Nanotubes – Perspectives for Innovations with Novel Industrial Microwave Technology*, Advanced Engineering Materials, Vol.8 – No.1–2, February 2006, 26–32
- [9] L. Feher, K.Drechsler, R.Wiesehöfer, J. Filsinger, *SAMPE Journal, The Industrial HEPHAISTOS System Line for Microwave Processing of High Performance Composites*, SAMPE Journal Vol. March/April, 2007
- [10] L. Feher, K. Drechsler, R. Wiesehöfer, *Advancements in CFRP Microwave Processing with the HEPHAISTOS-System*, SAMPE EUROPE International Conference 2007, Paris, April 3rd–5th, 2007
- [11] L.Feher, *Energy Efficient Microwave System and Materials Processing Technologies for Avionic, Mobility and Environmental Applications*, Habilitationsschrift, Juli 2007, 17–30