

HEPHAISTOS – ein neuartiges Mikrowellensystem für die Produktion von kohlefaserverstärkten Verbundwerkstoffen

L. Feher, M. Thumm, IHM

Einleitung

Mikrowellen sind in verschiedenen technischen Anwendungsformen zu einem selbstverständlichen Bestandteil des modernen Lebens geworden. Im Vergleich zu konventionellen Erwärmungsverfahren haben Mikrowellen eindeutige Besonderheiten und Vorteile. Für viele Anwendungen haben sich spezifische Mikrowellenfrequenzen und Frequenzbereiche etabliert oder sind per Industrienorm fest vorgegeben worden. Die Erzeugung der jeweiligen Frequenzen wird durch eine große Anzahl verfügbarer Mikrowellenquellen ermöglicht, die in ihren Merkmalen den jeweiligen Anforderungen in Leistung, Größe, Preis, Verfügbarkeit am besten entsprechen.

Die effiziente Erzeugung sehr gleichmäßiger, homogener Felder ist ein Kernproblem der Mikrowellenprozesstechnik und für viele industrielle Anwendungen unverzichtbare Voraussetzung. Dieses Problem wurde innerhalb der Millimeterwellen-Technik überzeugend gelöst sowie patentiert. Die Erkenntnisse konnten durch Simulationsrechnungen auf die Standard-Mikrowellentechnik übertragen werden [1]. Zur Optimierung von Ofengeometrien (Applikatoren) zur Vermeidung von Feldfokussierungen und zur Maximierung der Raumausbeute mit homogenen Feldbedingungen sind Klassen unterschiedlichster Applikatorgeometrien untersucht worden. Diese ingenieurmäßige Aufgabenstellung stellt hohe Anforderungen an Simulations-Codes. Es wurde dafür der MiRa-Code (Microwave

Raytracer) [2], ein dreidimensionaler Code zur elektromagnetischen Feldberechnung erstellt, der auf einem neuartigen verallgemeinerten optischen Tensoransatz begründet ist [3]. Es zeigte sich, dass eine hexagonale Geometrie (Abb. 1, der zylindrische Fall entsprach dem Feld eines ursprünglichen vorliegenden Systems) unter bestimmten Voraussetzungen ideal zur Homogenisierung übermodierter Mikrowellenfelder ist. Mit Hilfe des selbstentwickelten DELFI-Codes, einem räumlichen Finite-Differenzen-Verfahren zur Diskretisierung der vollen Maxwellschen Gleichungen konnten die Berechnungen vorgenommen werden, um innovative industrielle Applikatoren bezüglich der dort herrschenden Abhängigkeiten zu optimieren.

Ein entscheidender Schritt für diese technische Entwicklung war auch ein besseres Verständnis der komplexen elektrothermischen Vorgänge. Dazu gehört auch die Berechnung der Temperaturantwort für Materialien in elektromagnetischen Feldern [4]. Es konnte vorhergesagt werden, dass unter bestimmten Materialvoraussetzungen Prozessfelder mit praktisch verschwindenden thermischen Gradienten im Material erzeugt werden können.

Für die im folgenden näher beschriebene innovative Produktionstechnologie, bei der Leichtbaukompositmaterialien für verkehrstechnische Anwendungen hergestellt werden, wurde ein entsprechendes Mikrowellensystem namens HEPHAISTOS mit exzellenten homogenen Feldverteilungen entwickelt. HEPHA-

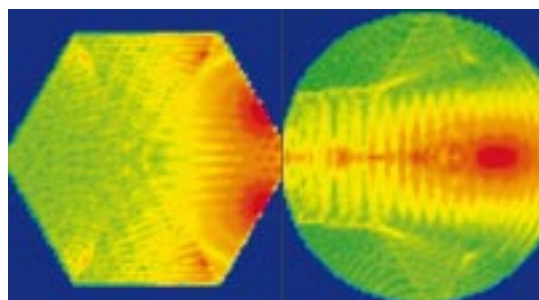


Abb. 1: Feldhomogenität eines hexagonalen mm-Wellenapplikators im Vergleich mit einem zylindrischen Originalsystem. Im Inneren des hexagonalen Systems treten keine starken Feldspitzen auf.

ISTOS steht für: High Electromagnetic Power Heating Autoclave InSeT Oven System und verweist damit auf die Einsatzmöglichkeit für Autoklaven (Thermische Öfen, die unter hohem Druck gesetzt werden können). Übrigens, schon in der antiken Welt war Hephaistos zuständig für die Metall- und Ofenverarbeitung. Er ist identisch mit Dädalus, der mit dem bekannten „ersten mythologischen Flug“ zu tun hat. Im Skulpturengarten des Forschungszentrums Karlsruhe kann



Abb. 2: Antikes Bildnis von HEPHAISTOS (ca. 525 v. Chr.). Dädalus und Hephaistos entsprachen in der antiken Welt der gleichen Person.

eine Skulptur von Wolfgang Bier „Figur im Kreis“ angeschaut werden, die diesen Mythos künstlerisch darstellt.

Gewichtsreduzierung für Flugzeuge

Diese Problematik, die schon Dädalus und Ikarus zum Verhängnis wurde, ist für die Luftfahrtforschung hochaktuell, insbesondere seitdem man bestrebt ist, Flugzeuge zunehmend aus kunststoffartigen Leichtbaumaterialien zu bauen. Dabei ist die Frage des richtigen „Leims“ für Flügel natürlich von „tragender“ Bedeutung. Bei Metallen ist nach ca. 80 Jahren intensiver technischer Entwicklung das Potenzial für weiter 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 Alumi-

um mit $2,8 \text{ g/cm}^3$ sind diese Werkstoffe für den Leichtbau besonders prädestiniert.

Derzeitige Flugzeuge bestehen im Wesentlichen aus Metall, wobei mindestens 90% Aluminium sowie im weiteren verschiedene Anteile und Legierungen aus Kupfer, Magnesium, Titan und Zink verwendet werden. Beim Airbus A320 beträgt der Gewichtsanteil von Faserverbundwerkstoffen immerhin schon 15%. Das gesamte Potential von Verbundwerkstoffen ist bislang aber noch längst nicht ausgeschöpft. Das Ziel besteht heute darin nicht nur Sekundärbauteile aus Verbundwerkstoffen einzusetzen, sondern auch tragende, zum Fliegen essentielle Primärstrukturen (z.B. Flügel, Rumpfkomponten) aus CFK anzu fertigen. Abb. 3 zeigt am Beispiel eines Großraumflugzeugs den Übergang von der Metallbauweise auf ein komplettes CFK-Flugzeug. Der heutige Standard

liegt etwa zwischen (a) und (b). Kritische Bereiche sind die Bereiche der Vorflügel, sowie der Übergang Rumpf zum Cockpit.

Faserverstärkte Verbundwerkstoffe bestehen im allgemeinen aus den Komponenten „Faser“ und einer „umgebenden Polymermatrix“. Die Matrix umschließt die Fasern und wird durch Härtung (Polymerisation) dreidimensional vernetzt. Ihr Zweck ist es, die Faser zu fixieren, d.h. die Bindung zwischen den Fasern zu schaffen und die Kräfte vornehmlich über Schubspannungen in die Fasern einzuleiten. Sie bestimmt im wesentlichen die Beständigkeit des Verbundes gegen Umwelteinflüsse und Chemikalien sowie den möglichen Temperatureinsatzbereich der Struktur.

Nun zu den Fasern: Glasfasern haben eine amorphe Struktur und besitzen isotrope Eigenschaften. Sie bestehen überwiegend aus Siliziumoxid. Durch Beimischungen weiterer Oxide können die Eigenschaften variiert werden. Die Glasfaser selber ist eine relativ preisgünstige Verstärkungsfaser. Glasfasern werden für glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK) verwendet.

Sehr hohe Festigkeiten und Steifigkeiten weisen dagegen Kohlenstofffasern auf, sie sind aber vergleichsweise teuer. Kohlenstofffasern bestehen dabei zu über 90% aus Kohlenstoff. Der Faserdurchmesser beträgt bei diesen lediglich $4,5$ bis $8 \mu\text{m}$. Die Eigenschaften der Kohlenstofffasern sind anisotrop.

Für die Herstellung und Aushärtung von Verbundwerkstoffen

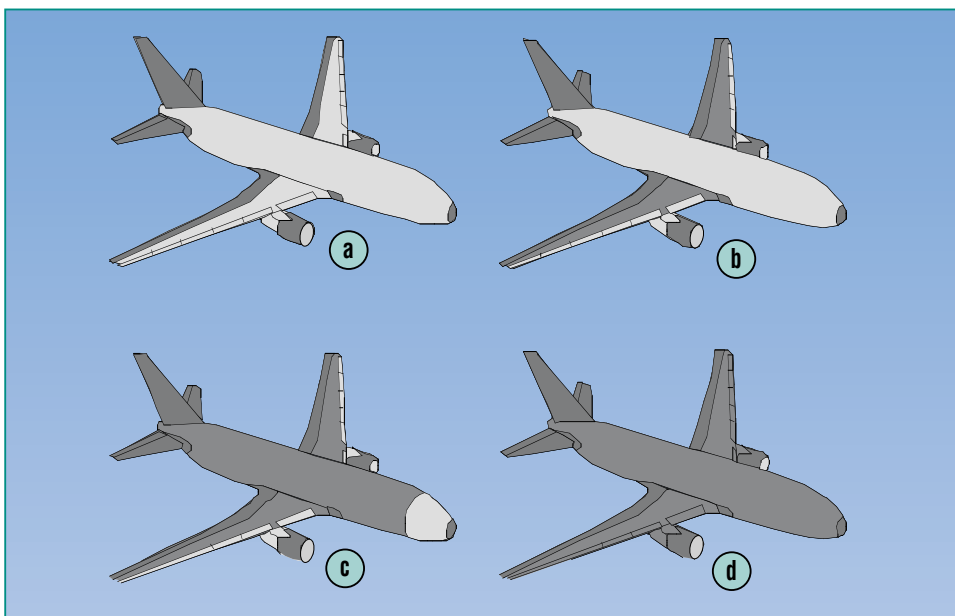


Abb. 3: Schrittweise Substitution von Metallteilen durch Verbundwerkstoffe.

gibt es eine Reihe von komplexen Technologien in verschiedenen Ausbildungen [5]. Als Hauptvertreter gelten

Prepreg-Technik

Für die Faserverbundtechnologie spielen als Leim die Duromere, insbesondere die Epoxidharze die weitaus bedeutendste Rolle. So sind z.B. vorimprägnierte Gewebe und andere Faservormlinge (Preformling) erhältlich, die mit diesen Kunstharzen getränkt sind und lediglich bis zur leichten Gelierung reagiert haben. Ein solches Prepreg-Material ist klebrig und von der Handhabung leicht in ein Werkzeug für eine bestimmte Formgebung, z.B. einer Klappe zu drapieren. Zum Aushärten der Prepreg-Strukturen benötigt man üblicherweise erheblichen Druck (> 7 bar), so dass teure Autoklaven zur Herstellung benötigt werden.

Nasstechnik

Eine Alternative zu diesem Ansatz bietet die Harzinfusion, bei der die Matrix in ein geschlossenes Werkzeug „eingespritzt“ wird (Abb. 4, Aufbau für einen Flügel). Hier erfolgt im Gegensatz zum Prepreg-Verfahren die Harzzugabe erst im Anschluss an die Formung des Bauteils aus dem Faserlege. Dabei wird die Faserstruktur in das Werkzeug eingepasst und mit einer Folie vakuumdicht versiegelt. Dieser Preformling wird samt Werkzeug in einen Ofen gebracht, wo anschließend das Harz in den Preformling injiziert wird. Nach Abschluss der Harzinjektion wird der Ofen aufgeheizt und die Aushärtung des Bauteils beginnt.

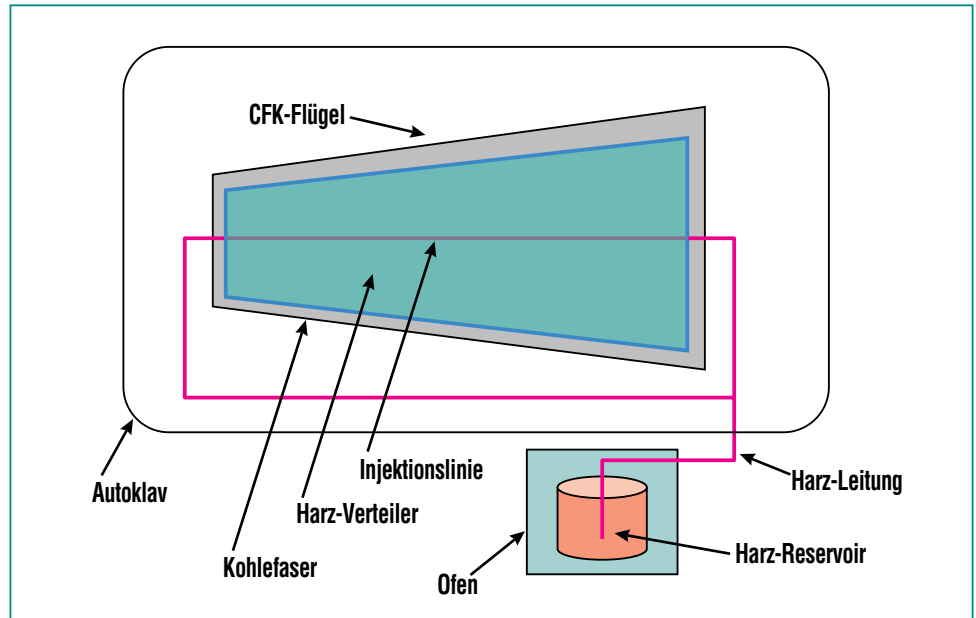


Abb. 4: 2500 Jahre nach Dädalus: Auch zukünftige Flügel werden in Nasstechnik mit Leim geklebt.

HEPHAISTOS macht heiße Öfen kalt

Die teuren und hochqualitativen Kohlefasern werden durch bessere Fertigungsverfahren immer billiger. Trotzdem liegen die Kosten für fertige Verbundwerkstoffteile weiterhin höher als ihr Äquivalent aus Metall. Betrachtet man eine typische Kostenverteilung für die Fabrikation von Verbund-

werkstoffen in Abb. 5, so erkennt man, dass der Löwenanteil im Herstellungsverfahren liegt. Hier sind viele Fertigungsschritte bislang nicht automatisiert und durch langwierige Verfahren geprägt, u.a. ist der Aushärtungsprozess in Autoklaven energetisch und zeitlich kostenintensiv. Hier genau greift die neue Mikrowellentechnik des HEPHAISTOS-

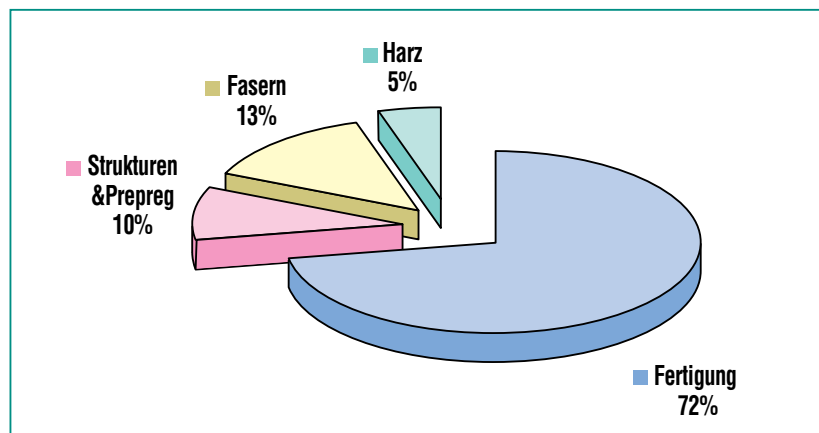


Abb. 5: Kostenstruktur von CFK-Verbundbauteilen.

Systems in nachhaltiger Weise ein [6]:

- Volumetrisches Aufheizen der Verbundstrukturen: Die Mikrowellen dringen instantan in das Material ein und erbringen einen direkten Heizeintrag im Bauteil.
- Reduzierung der Verarbeitungszeit: Durch die instantane, volumetrische Heizung können die Heizraten sehr stark erhöht werden. Der Durchsatz von Bauteilen wird erhöht, die Zykluszeiten sinken.
- Selektives Erwärmen: Mikrowellen erwärmen nur die Verbundstrukturen, der Ofen selber bleibt kalt.
- Drastische Einsparung von Energie: Nur das Leichtbauteil wird geheizt. Der Ofen muss nicht abgekühlt werden.
- Trägheitslose Steuerung: Durch den instantanen Wärmeeintrag im Bauteil können Prozesse gefahren werden, die in trägen konventionellen Öfen unmöglich sind oder dort zum exothermen Durchgehen von Bauteilen führen (Übererhitzen und -reagieren des Harzes).
- Upscale-Fähigkeit: Das HEPHAISTOS-Verfahren ist für sehr große Bauteile verwendbar. Lange Wärmeleitungswege in grossen Bauteilen spielen keine Rolle. Auch bei sehr großen komplexen Bauteilen kann die Temperaturhomogenität über das Verfahren optimal eingestellt werden kann.
- Automatisierbarkeit: Produktionsverfahren, sowie Überwa-

chungs-, Mess-, Steuer- und Regelungssysteme sind in sehr gute Abstimmung mit der HEPHAISTOS-Technologie zu bringen, so dass ganzheitliche Optimierungen für die Prozesskette möglich sind.

- Verringerte Hardware-Kosten des Erwärmungssystems: Durch die Verwendung kostengünstiger 2.45 GHz Standard-Industriekomponenten ist ein industrielles HEPHAISTOS-Prozesssystem weitaus kostengünstiger als ein Autoklav-System.

Für die Anwendung verfolgt das HEPHAISTOS-Konzept zwei Ziele:

- als Nachrüstsystem für bestehende Autoklaven
- als autarkes Prozesssystem

Das Nachrüstkonzept sieht vor, bestehende Autoklavsysteme durch ein kompaktes einschiebbares HEPHAISTOS-Upgrademodul in einen kalten Mikrowellenofen zu verwandeln. Der Autoklav kann nach wie vor als Drucksystem dienen. Als autarkes Prozesssystem wird durch die HEPHAISTOS-Technologie dagegen der größte Kosten-Nutzen Faktor für die großindustrielle Fertigung von Hochleistungsverbunden (insbesondere Nasstechnik) für neuartige drucklose Verfahren gewonnen werden.

Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurden Motivation, Vorteile und Probleme bei der Herstellung verkehrstechnischer Leichtbaumaterialien be-

handelt. Ein auf Standard-Industriekomponenten basierendes nachhaltiges Mikrowellensystem zur kostengünstigen industriellen Herstellung dieser Strukturen wurde vorgestellt. Die vorteilhaften Auswirkungen dieses neuen Verfahrens auf die Kostenstruktur konventionell hergestellter Verbundteile wurde aufgezeigt. In weiteren Aktivitäten werden mit der HEPHAISTOS-Technologie Richtlinien für die industrielle Herstellung von großen Strukturteilen erarbeitet, die hergestellten Materialien werden für Zertifizierungen qualifiziert. Die Untersuchungen im Forschungszentrum Karlsruhe zielen ferner auf die Entwicklung und Optimierung neuartiger Harzkomponenten ab, die zusammen mit dem ITC-CPV durchgeführt werden. Mit dem ITAS werden die unterschiedlichen Entwicklungsszenarios für diese neuartige Prozesstechnologie untersucht und bewertet [7]. Der Schwerpunkt dieser Arbeiten besteht in der vergleichenden ganzheitlichen Analyse des Herstellungsprozesses von CFK-Bauteilen und der damit verbundenen Stoffströme und Energieverbräuche. Die aktuellen Ergebnisse lassen hoffen, dass HEPHAISTOS auch in Zukunft die Luftfahrt „beflügeln“ wird.

Literatur

- [1] L. Feher, M. Thumm,
*Nachrichten – Forschungszentrum
Karlsruhe*, 28, 215-223 (1996).
- [2] L. Feher, M. Thumm:
*Simulationsunterstützte Entwicklung
industrieller Millimeterwellen-
technologie für die Materialprozeß-
technik, Mikrowelleneinsatz in den
Materialwissenschaften, der
chemischen Verfahrenstechnik und in
der Festkörperchemie,*
M. Willert-Porada (Hrsg.),
Shaker Verlag, 182-197 (1998)
- [3] L. Feher,
*Simulationsrechnungen zur
verfahrenstechnischen Anwendung
von Millimeterwellen für die
industrielle Materialprozesstechnik“,*
Dissertation, Universität Karlsruhe,
Wissenschaftliche Berichte, FZKA
5885, Januar 1997
- [4] L. Feher, M. Thumm,
*Electrothermal Heating Model for
Microwave/Hybrid-Processed
Materials, 24th International
Conference on Infrared and
Millimeterwaves, Monterey,
California, Sept. 6-10, 1999, F-B5*
- [5] Michael C. Y. Niu,
*Composite Airframe Structures, Hong
Kong Conmilit Press Ltd., 1992*
- [6] L. Feher, M. Thumm,
*HEPHAISTOS – Development of a
Novel Automated Microwave
Processing System for Carbon
Reinforced Fibre Plastics (CFRP),*
*3rd World Congress on Microwave &
RF Applications, Sydney, Australia,*
22-26 September 2002
- [7] B. Reßler, M. Achternbosch,
K.-R. Bräutigam, C. Kupsch,
G. Sardemann,
*Technikfolgenabschätzung – Theorie
und Praxis Nr. 1, 11. Jg., März 2002*