

Produktion von Faserverbunden mittels Mikrowellenerwärmung

M. PODKORYTOV, M. MEYER, Dr.-Ing. L. HERBECK
 Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
 In der Helmholtz-Gemeinschaft
 Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik

Übersicht

Die Fertigung von faserverstärkten Kunststoffbauteilen mittels Mikrowellenerwärmung gehört zu den aktuellen Forschungsgebieten im Bereich der Faserverbundtechnologie. Ihre Anwendung für die Herstellung von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffbauteilen wird untersucht. Dazu werden drei Verfahren identifiziert, die eine thermische Behandlung des Verbundkunststoffs darstellen. Auf Laborniveau werden die Vorkonditionierung von Harz für eine anschließende Injektion, das Preforming von binderfixierten Faserhalbzeugen und die Bauteilaushärtung untersucht. Anhand repräsentativer Werkstoffkennwerte wird die Eignung der Mikrowellenverfahren nachgewiesen. Diese Eingangsdaten werden genutzt die Technologie im industriellen Maßstab umzusetzen, dies wird anhand von einer Harzerwärmungsanlage und einem Mikrowellenautoklaven demonstriert.

Mikrowellentechnik für die CFK-Produktion

Die Optimierung bestehender Prozesse zur Herstellung von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen ist im Zuge einer steigenden industriellen Produktion notwendig. Dabei steht für die luftfahrttechnische Anwendung neben einer Verkürzung der Zykluszeiten der qualitätsgesicherte Fertigungsprozess im Vordergrund.

Die Verwendung von elektromagnetischer Strahlung, im Besonderen Mikrowellenstrahlung, ist zur Erwärmung von Produkten seit langem bekannt. Das Erwärmen mittels Mikrowellen ist dabei durch einen besonders effizienten Wärmeintrag in das Produkt gekennzeichnet, wodurch Fertigungszeiten verkürzt und der notwendige Energieaufwand minimiert wird.

Bezogen auf die Fertigung von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen hat die Erwärmung mittels Mikrowellen bisher noch keine Verbreitung

gefunden. Die Prozesskette zur Herstellung von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffbauteilen ist wegen vieler thermischer Prozessschritte geeignet, auf die Anwendung zur Mikrowellenerwärmung untersucht zu werden. Die thermischen Verfahrensschritte stellen aufgrund der werkstoffbedingten geringen Wärmeleitfähigkeiten einen Flaschenhals bei der Herstellung von Bauteilen dar. Gerade für die luftfahrtrelevanten Anwendungen ist eine Optimierung der Prozesse wegen der Verwendung von Hochtemperaturduroplasten notwendig. Als Anwendungsgebiete sind neben der Aushärtung von Strukturen auch das Preforming binderfixierter Faserhalbzeuge und die Vorkonditionierung von Harzen zu nennen. Mittels eines Mikrowellenuniversalofens mit der Arbeitsfrequenz von 2,45GHz, ist eine Verfahrenstechnik entstanden, die in den genannten Bereichen Vorteile gegenüber dem Stand der Technik aufweist.

Daneben entstehen Perspektiven, die Mikrowellenerwärmung von CFK-Werkstoffen auch für faserverstärkte Thermoplaste und Niedertemperaturduroplaste einzusetzen.

Der Fokus der durchgeführten Arbeiten liegt auf der Entwicklung von Prozessen, die luftfahrttechnisch genutzt werden. Anhand von bereits qualifizierten Fertigungsmitteln und Fertigungshilfsmitteln werden in einem ersten Schritt auf der Mikrowellenerwärmung basierende Verfahren für die Vorkonditionierung von Harzen, das Preforming und die Bauteilaushärtung entwickelt. Die Verwendung von bereits qualifizierten Fertigungshilfsmitteln geschieht zur Identifikation eines eventuell vorhandenen Einflusses der Mikrowellenstrahlung auf die Werkstoffeigenschaften. Um dies genau zu untersuchen werden Werkstoffproben hergestellt und Parameter untersucht, die in starker Abhängigkeit der Temperatur des Werkstoffs stehen. Neben thermischen werden auch mechanische Untersuchungen durchgeführt.

Die Erwärmung mittels Mikrowellen wird auch als dielektrische Erwärmung bezeichnet. Im Vergleich

zur konventionellen Erwärmung über die erzwungene Konvektion ist kein Trägermedium zur Erwärmung von Produkten notwendig, wie der Luft bei vielen industriellen Prozessen. Die Mikrowellenstrahlung interagiert direkt mit dem zu erwärmenden Produkt, damit ist die Erwärmung selektiv und von der Umgebung unabhängig. Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe werden über die Induktion von Wirbelströmen, durch den so genannten Skin Effekt [10], in der Faser und über die Orientierungspolarisation der Matrix erwärmt. Die Mikrowellen penetrieren dabei den Werkstoff, weshalb auch von einer volumetrischen Erwärmung gesprochen wird.

Auf Laborniveau hat die Mikrowellenerwärmung bereits Einzug in die Fertigung von CFK und glasfaserverstärkten Strukturen gefunden [7-9]. Die getroffenen Aussagen beschreiben einen Einfluss der Mikrowellenerwärmung auf die Stoffeigenschaften der Matrix und des Verbundes. Jedoch bleibt vorab zu bemerken, dass die dort beschriebenen Verfahren unter nicht konstanten Bedingungen durchgeführt wurden, weshalb die Aussagekraft der einzelnen Arbeiten dahingestellt sei. Allen gemein ist die Anwendung der Mikrowellenerwärmung zur Beschleunigung von Prozessen. Prozesse mit konstanten Randbedingungen erscheinen zur Anwendung der Mikrowellenerwärmung besonders günstig. Aus diesem Grund wurde die Durchflusserwärmung von Harz während einer Infiltration [11] zur Senkung der Viskosität untersucht. Weitere Untersuchungen sind auf einen Vergleich von konventionellen Verfahren zu mikrowellengestützten Verfahren bezogen, die unter anderem die von der Matrix dominierten Werkstoffeigenschaften genauer untersuchen. Die dort dargestellten Ergebnisse sind unter einer nicht angepassten Verfahrenstechnik entstanden. Aus diesem Grund besitzen die mit Mikrowellen hergestellten Werkstoffproben eine geringere Werkstoffperformance als das konventionelle Pendant. Zur Herstellung von CFK-Bauteilen mittels Mikrowellen sind Randbedingungen zu beachten, die aus der Physik der Mikrowellen resultieren. Die potentiellen Vorteile der Mikrowellenerwärmung sind nur mit einer angepassten Verfahrenstechnik zu erreichen.

Durch die spezielle Form der Erwärmung entstehen innerhalb des Prozesses spezifische Vorteile. Die Temperaturführung am Bauteil wird direkt über die Emission der Mikrowellenstrahlung beeinflusst. Daher ist eine sehr genaue Temperierung des Bauteils möglich. Durch die direkte Er-

wärmung des Werkstoffs mittels der Mikrowellenstrahlung werden Totzeiten und Trägheiten aus dem Prozess entfernt, die zuvor durch das Aufheizen von Fertigungsmitteln und Atmosphären unumgänglich waren. Die Temperaturführung am Bauteil selbst ist im Hinblick auf die Qualitätssicherung vorteilhaft, da aufgrund einer kalten Ofenatmosphäre die Reaktionszeit in der Prozessregelung gering ist. Durch die Minimierung der Trägheit im Prozess können Aufheizgradienten innerhalb von Fertigungsprozessen maximiert und damit Zeit eingespart werden.

Für die Erwärmung in einem Mikrowellenfeld sind neben dem Skineffekt vor allem die Polarisations-eigenschaften eines Werkstoffs entscheidend, die durch die komplexe Dielektrizitätszahl gekennzeichnet sind [2].

$$\varepsilon = \varepsilon' + i\varepsilon'' \quad (1)$$

ε := komplexe Dielektrizitätszahl

ε' := Realteil (Speicheranteil)

ε'' := Imaginärteil (Verlustanteil)

Moleküle mit einem Dipolcharakter richten sich im elektrischen Wechselfeld der Mikrowellen aus. Während dieser so genannten Polarisation entsteht über Verlustmechanismen im Werkstoff Wärme. Ein permanenter Dipol liegt vor, sofern der Ladungsschwerpunkt der negativ geladenen Elektronen des Moleküls nicht mit dem Ladungsschwerpunkt der positiv geladenen Atomkerne zusammenfällt. Die Ausrichtung der Dipole in einem Wechselfeld erfolgt phasenverschoben. Diese Phasenverschiebung wird mit dem Verlustwinkel beschrieben und wirkt sich als thermischer Verlust aus. Der Effekt wird für die Erwärmung mittels Mikrowellen ausgenutzt.

Der dielektrische Verlustfaktor $\tan\delta$ ist das Maß dieser Phasenverschiebung und das Argument der komplexen Dielektrizitätszahl [3].

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (2)$$

Der dielektrische Verlustfaktor ist die maßgebliche Größe für Polymere, um ihre Eignung bezüglich der Mikrowellenerwärmung zu untersuchen. Ist ein verlustbehaftetes Dielektrikum einem Wechselfeld ausgesetzt, dringt die elektromagnetische Welle zwar in das Dielektrikum ein, wird dabei jedoch gedämpft. Dabei wird Energie frei-

gesetzt und ein Ausdruck für die Leistungsdifferenz ΔP definiert [1, 5].

$$\Delta P = P(1 - e^{-2ax}) \quad (3)$$

a := Dämpfungskonstante
x := Wegstrecke in Feldrichtung im Dielektrikum

Die Dämpfungskonstante a ist gegeben durch:

$$a = \omega \sqrt{\frac{\mu' \varepsilon'}{2} \sqrt{\left(1 + \frac{\chi^2}{\omega^2 \varepsilon'^2}\right)} - 1} \quad (4)$$

μ' := Realteil der komplexen Permeabilität
 χ := Leitfähigkeit des Dielektrikums

Die Leitfähigkeit des Dielektrikums folgt aus dem Imaginärteil der komplexen Dielektrizitätskonstanten [4].

$$\chi = \omega \varepsilon_0 \cdot \varepsilon'' \quad (5)$$

Relevant für die Prozessierung ist hier jedoch die Eindringtiefe in ein Dielektrikum. Die Eindringtiefe wird als die Strecke definiert, bei der die Leistungsdifferenz ΔP umgesetzt wurde. Sie ist ebenfalls von der Wellenlänge des Wechselfeldes λ_0 und zeigt, dass mit fallender Frequenz die Eindringtiefe zunimmt, aber auch die freigesetzte Wärme im Dielektrikum abnimmt. Die Wellenlänge der Mikrowelle von 2,45 GHz bietet hier einen guten Kompromiss.

$$v = \frac{\lambda_0}{2\pi \sqrt{\varepsilon''} \tan \delta} \quad (6)$$

Die Eindringtiefe der Mikrowelle in zu erwärmenden Produkt ist ein Maß für die gleichmäßige Durchwärmung bezogen auf die Bauteilwandstärke. Sofern ein Bauteil eine größere Wandstärke besitzt, als die Eindringtiefe der Mikrowelle im Bauteilwerkstoff, nimmt der Einfluss der inneren Wärmeleitung im Bauteil wieder zu.

Vor diesem Hintergrund wird deutlich, dass Prozesse und Verfahren nur erfolgreich durchführbar sind, sofern bestimmte dielektrische Randbedingungen berücksichtigt werden. Die dielektrische konstante Oberfläche, d. h. eine Oberfläche, die gleichmäßig in Abhängigkeit der Feldverteilung erwärmt wird, ist gerade für CFK mit seinen stark

dielektrisch unterschiedlichen Ausgangskomponenten notwendig. Kritisch sind in einem Mikrowellenprozess Übertemperaturen, die nicht messtechnisch erfasst werden. Solche Übertemperaturen werden durch „Hotspots“ und „Arcings“ hervorgerufen.

Das Entstehen von Hotspots resultiert zum einen aus einer inhomogenen Feldverteilung im Prozessraum und zum anderen aus Werkstoffen mit unterschiedlichen dielektrischen Eigenschaften. Bezogen auf die Kohlenstofffaser und eine Matrix, wird die Matrix wesentlich stärker im Mikrowellenfeld erwärmt als die Faser. Deswegen sind Harzansammlungen, so genannte Harznester, am Bauteil zu vermeiden, da diese Bereiche eine Eigendynamik besitzen, die ein Bauteil schädigen können.

Arcings sind Lichtbogeneffekte, die durch hohe lokale Potentialunterschiede hervorgerufen werden.

Labortechnische Grundlagenuntersuchungen

Die Grundlagenuntersuchungen finden in einem Mikrowellenuniversalofen, gemäß Abbildung 1, mit einer Größe von etwa 1m³ statt. Der Mikrowellenofen hat eine Gesamtleistung von 8kW und ist eine über die Temperatur geregelte Anlage. Zur Temperaturmessung sind 3 Pyrometer und 4 faseroptische Thermoelemente vorhanden. Mikrowellenspezifische Verfahrensparameter werden über einen Richtkoppler erfasst, der die emittierte und reflektierte Mikrowellenleistung misst und damit eine Beurteilung der Effektivität des Mikrowellenprozesses ermöglicht.

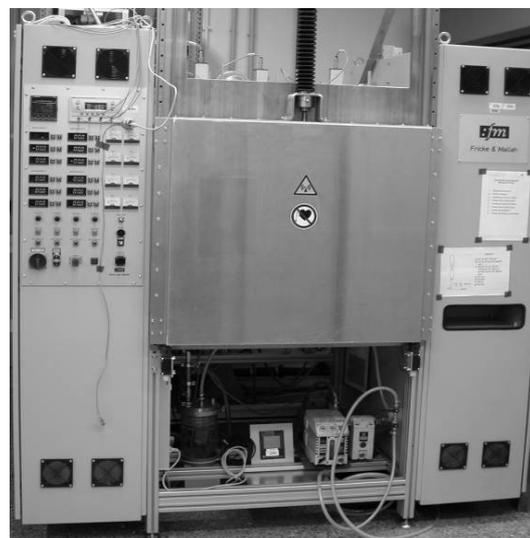


Abbildung 1 Mikrowellenuniversalofen, 2,45GHz 8kW

Die Verwendung der Mikrowellenerwärmung ist für die Verfahrensschritte des Preformings, der Vorkonditionierung von Harz und der Bauteil-aushärtung anwendbar. Die Aushärtung von Bauteilen mittels der Mikrowellenerwärmung erfolgt bei der Verwendung von Prepreg ebenso wie bei Injektionsverfahren. Aufgrund der Laborausstattung mit einem Multi-Mode-Atmosphären-Mikrowellenofen werden zunächst autoklavlose Injektionsverfahren betrachtet.

Injektionsverfahren für faserverstärkte Verbundbauteile stellen momentan für viele Bauteile den Stand der Technik dar. Die Injektion eines Matrixsystems ist abhängig von seiner Viskosität. Je geringer die Viskosität desto einfacher ist ein Injektionsprozess durchführbar, zudem wird die Injektionszeit verkürzt. Die Viskosität eines Matrixsystems ist abhängig von der Temperatur und dem Polymerisationsgrad, während der Polymerisationsgrad selbst abhängig von der Temperatur und der Zeit ist.

Von daher wird das Harz als Vorbereitung für eine anschließende Injektion auf eine definierte Temperatur erwärmt, um optimale Eigenschaften bezüglich des Fließverhaltens und Verarbeitungsdauer zu erzielen. Die Erwärmung einzelner Harzgebände hängt stark von der Form der Gebinde ab und ist mit dem Stand der Technik sehr zeitaufwendig. Für Luftfahrtanwendungen sind 10 bis 20 kg Chargen weit verbreitet. Wegen der geringen inneren Wärmeleitung des Harzsystems werden Gebinde bis zu 4h in einem vorgeheiztem Umluftofen eingelagert. Erst nach dieser Zeit ist das gesamte Gebinde hinreichend gleichmäßig erwärmt. Ein Abkürzen dieses Prozesses mit dem Stand der Technik ist kaum möglich. Wird das Gebinde in einem zu heißen Umluftofen erwärmt, ist die Erwärmung des Gebindes stark inhomogen. An den Wänden des Gebindes können dann ggf. so hohe Temperaturen entstehen, dass eine exotherme Reaktion des Systems nicht mit Sicherheit vermeidbar ist. Diese Temperaturüberhöhung kann durch die innere Wärmeleitung des Gebindes nicht ausgeglichen werden. Die auf Abbildung 2 dargestellten Temperaturverläufe sind eine Referenzmessung, die konventionell in einem 10kg-Standardgebände durchgeführt wurde. Die Erwärmung erfolgte in einem auf 80°C vorgeheiztem Umluftofen. Über Konvektion und Strahlung wird erst nach ca. 8h eine gleichmäßige Temperatur im gesamten Gebände eingestellt. Für eine industrielle Anwendung ist das nicht akzeptabel.

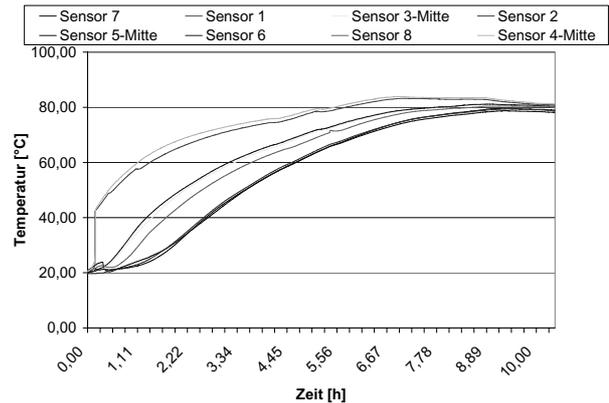


Abbildung 2 Konventionelles Aufheizen eines Harzgebindes

Eine Möglichkeit die Erwärmungszeit zu verkürzen ist die Verwendung der Mikrowellenerwärmung. Epoxidharze sind wegen ihrer dielektrischen Eigenschaften besonders geeignet mit Mikrowellen erwärmt zu werden.

Um die Eignung der Mikrowellenerwärmung zur Vorkonditionierung von Epoxidharzen, in diesem Fall RTM6 von Hexcel, nachzuweisen, wird eine Untersuchung in Anlehnung an ein konventionelles Fertigungsverfahren durchgeführt. Da in diesem Fall lediglich die Matrix einem nicht qualifizierten Verfahren unterzogen wird, sind die durch die Matrix bedingten Werkstoffparameter festzustellen. Hierfür sind die Restenthalpie, die Viskosität, sowie die Schubfestigkeit und der Schubmodul ausgewählt. Dazu werden Werkstoffproben gefertigt, die unter identischen Bedingungen ausgehärtet werden. Der einzige prozesstechnische Unterschied zwischen den Proben liegt bei der Vorbehandlung der Matrix, die in einem Fall konventionell innerhalb von 4h in einem Umluftofen erwärmt wird und im anderen Fall mittels Mikrowellen innerhalb von 25min. In beiden Fällen beträgt die Temperatur des Matrixsystems nach der Erwärmung 80°C.

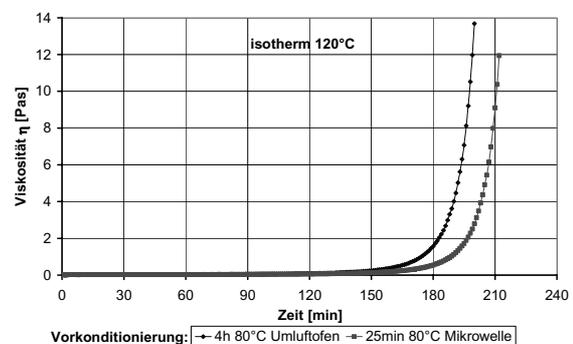


Abbildung 3 Viskositätsverlauf von RTM6

Die Rheologieauswertung aus Abbildung 3 zeigt deutlich den für die Mikrowellen unkritischen Einfluss auf die Viskosität. Für eine der Harzerwärmung angeschlossene Injektion ist die Viskosität des Matrixsystems weitestgehend zu reduzieren. Durch den geringeren Anstieg der Viskosität ist mit Mikrowellen erwärmtes RTM6 für Injektionsprozesse mindestens genau so geeignet wie konventionell erwärmtes RTM6. Das Zeitfenster zum Durchführen einer Injektion wird durch mit Mikrowellen vorerwärmtes Harz erweitert.

Um einen Einfluss auf den Polymerisationsgrad und die Restenthalpie zu untersuchen, wird mit Mikrowellen vorerwärmtes RTM6 und konventionell vorerwärmtes RTM6 bei 180°C ausgehärtet und anschließend mittels einer DSC-Analyse ausgewertet. Die Aushärtung der einzelnen Proben erfolgt unter gleichen Bedingungen, so dass der einzige prozesstechnische Unterschied in der Vorerwärmung der Matrix besteht. Nach Abbildung 4 liegt auch für die im System verbliebene Restenthalpie kein signifikanter Einfluss der Mikrowellenerwärmung auf das Harzsystem RTM6. Die gemessene Restenthalpie ist mit den Referenzproben (CONV1, CONV2) auf einem Niveau.

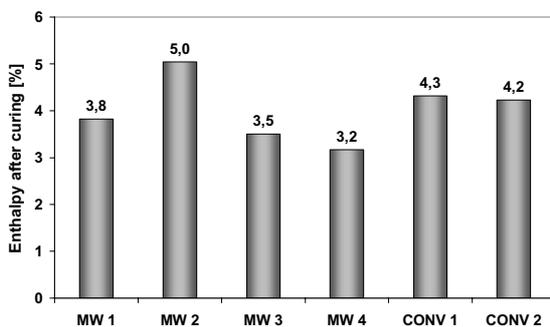


Abbildung 4 Enthalpie nach Härtingszyklus

Eine eventuelle Beeinflussung der chemischen Struktur des Harzsystems, die Auswirkungen auf die Grenzschicht zwischen der Faser und der Matrix besitzen, wird anhand der Schubfestigkeit und des Schubmoduls eines konventionell ausgehärteten Verbundes untersucht. Zur Untersuchung der chemischen Bindungseigenschaften der Matrix an die Kohlenstofffaser werden nach einer Airbus-internen Norm, der AITM 1.0007, die Schubeigenschaften eines Verbundbauteils untersucht. Die Herstellung des Bauteils erfolgt unter Verwendung der Mikrowellen – Harzerwärmung (MW) und einer Referenz (REF), die nach der momentan verwendeten konventionellen Heizmethode erwärmt wird. Die Aushärtung

der einzelnen Werkstoffproben erfolgt unter identischen Bedingungen. Die Untersuchung wird mit einer HTA 6K Faser durchgeführt, die zu einem Gewebe verwoben ist. Die in Abbildung 5 dargestellten Ergebnisse zeigen keinen direkten Einfluss der Mikrowellenerwärmung auf die Schubfestigkeit, dies gilt ebenfalls für den Schubmodul, der hier nicht aufgeführt ist. Ebenfalls bei einer hier nicht aufgeführten Infrarotspektroskopie ist keine Änderung der Struktur in der Matrix erkennbar.

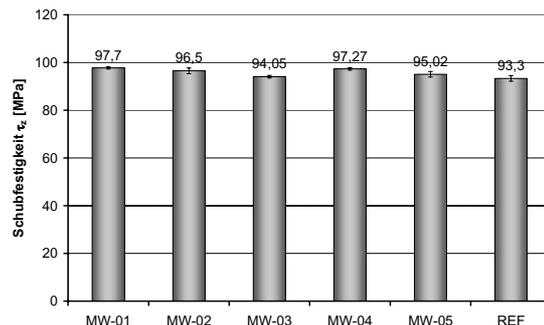


Abbildung 5 Schubfestigkeit eines kohlenstofffaserverstärkten Verbundes mit 57% Faservolumengehalt

Der prinzipielle Nachweis für die Eignung der Erwärmung von RTM6 mittels Mikrowellen ist damit gegeben. Damit einhergehend ist ein erhebliches Einsparpotential im Hinblick auf die Prozesszeit, die zur Vorbereitung der einzelnen Harzbatches benötigt wird.

Das Ausschöpfen des vollen Potentials der Mikrowellenerwärmung ist nur mit einer angepassten Anlagentechnologie zu erreichen. Mittels spezieller Anlagen sind die oben beschriebenen Effekte noch steigerungsfähig. Dazu wurde eine Anlage, Abbildung 13, speziell für die Erwärmung von RTM6 entwickelt.

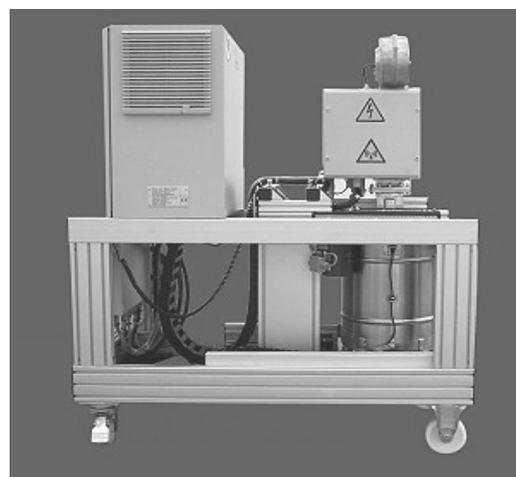


Abbildung 6 Mikrowellenharzerwärmungsanlage

Die Anlage erwärmt 10kg RTM6 von Raumtemperatur auf 80°C innerhalb von minimal 12 Minuten. Im Vergleich mit der auf Abbildung gezeigten Temperaturverteilung wird gemäß Abbildung 14 das Leistungsspektrum der Anlage deutlich. Die Temperaturverteilung innerhalb des Gebindes ist hinreichend homogen, so dass auch die Viskosität des gesamten Gebindes als gleichmäßig anzunehmen ist. Die Temperatur innerhalb des Gebindes wurde über 8 Stunden gehalten, um die Stabilität und Prozessgenauigkeit der Anlage zu verdeutlichen.

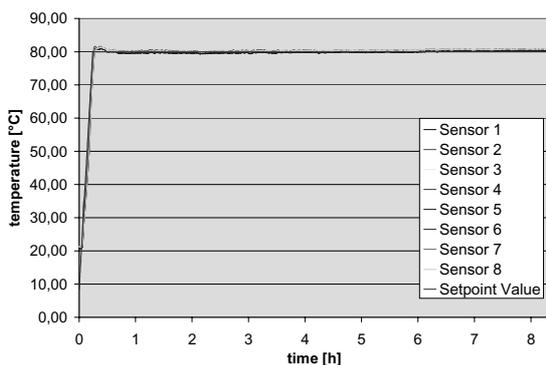


Abbildung 7 Temperaturverteilung in einem 10kg-RTM6 Gebinde in mehreren Ebenen

Das Einsparen von Prozesszeit wird ebenfalls für das Verfahren des Preforming untersucht. Das Preforming mit der Bindertechnologie bietet Ansatzmöglichkeiten ebenfalls mikrowellenbasierte Erwärmungsverfahren einzusetzen, um stoffspezifische Eigenschaften wie schlechte Wärmeleitung im trockenen Faser-Preform in ihrer Auswirkung zu minimieren. Bei der Bindertechnik werden Fasergelege und Fasergewebe mit einem duroplastischen oder thermoplastischen Kunststoff teilweise imprägniert. Die Imprägnierung erfolgt mittels Kunststoffvliesen, Kunststoffpulver oder Fäden. Der Binder schmilzt oder vernetzt durch eine thermische Aktivierung. Im späteren Verbund bindet das Matrixsystem den Binder als eine Komponente in der chemischen Struktur oder die Bestandteile verbleiben physikalisch im Verbund.

Die thermische Aktivierung der Faserlagen erfolgt heute mittels konventioneller Heizmethoden. Die einfachste Methode ist hierbei die Verwendung von Heizplatten oder Bügeleisen, mit denen das Faserhalbzeug behandelt und in ein Formwerkzeug drapiert wird. Andere Verfahren finden in Heißluftöfen und Infrarotanlagen Anwendung, in denen flexible Membranen verwendet werden. Die Membranen drücken das Faserhalbzeug mit-

tels Vakuum in die gewünschte Kontur, die Aktivierung des Binders erfolgt über eine zusätzliche Heizeinrichtung durch Konvektion und Wärmestrahlung. Auf diese Weise werden einzelne oder mehrere Faserlagen gleichzeitig abgelegt. Der Eintrag der Wärme in das Produkt ist hier jedoch nicht sehr effizient. Die Erwärmung steht im direkten Verhältnis zur Temperatur im Heißluftofen, der passiv die Fasern und den Binder erwärmt. Notwendig ist dabei die Erwärmung der Ofenatmosphäre und des Formwerkzeug, weshalb nur ein Bruchteil der Energie für das eigentlich zu erwärmende Produkt nutzbar ist. Hier bietet die Mikrowellentechnologie Abhilfe, da die Mikrowellen die Kohlenstofffasern selektiv erwärmen. Die Erwärmung findet ausschließlich im Preform und nicht in der Peripherie statt. Die Integration der Mikrowellenerwärmung in den Preformprozess ist dabei nicht trivial. Zu Grunde liegen die Anforderungen aus dem Prozess, die die Konturtreue des Faserpreforms und die Anwendung der Vakuumumformung beinhalten. Zur Durchführung einer Mikrowellenerwärmung ist die mindestens einseitige Transparenz eines Formwerkzeuges sicherzustellen, damit die Mikrowellen bis zum Produkt vordringen.

Neben den prozesstechnischen Anforderungen bleiben Einflüsse der Mikrowellenerwärmung auf die Fasern selbst zu untersuchen. Gegenstand der hier beschriebenen Untersuchung ist eine HTA 6K Faser, die in zu einem Gewebe verwoben ist; Typ Cramer 445. Einen möglichen Effekt der Mikrowellenerwärmung ist für die Grenzschicht zwischen Faser und Matrix zu untersuchen, die u. a. durch die Schlichte der Faser beeinflusst wird. Des Weiteren wird die Zugfestigkeit der Faser untersucht, um etwaige strukturelle Änderungen der Faser auszuschließen.

Innerhalb der folgenden Arbeiten wird die prinzipielle Eignung der Mikrowellenerwärmung für das Preformverfahren gezeigt. Das Verfahren wird prinzipiell mit einem einfachen Aufbau nachgebildet. Der Aufbau besteht aus 8 Lagen kohlenstofffaserverstärktem Gewebe und wird symmetrisch auf einer Aluminiumplatte abgelegt. Mit Hilfe einer Membran werden die Fasern über ein Vakuum konsolidiert und anschließend im Mikrowellenfeld erwärmt. Der Preformprozess erfolgt in ca. 20 min. Ein Einfluss der Mikrowellenerwärmung auf die Festigkeit der Faser oder die Struktur der Schlichte bleibt Abbildung 6 zu entnehmen. Verglichen werden die mit dem Mikrowellenpreforming ermittelten Werte mit

konventionellen Verfahren, wie dem Aufbügeln einzelner Faserlagen und einem konventionellen Umluftofen. Die Mikrowellenerwärmung wurde bei 2 Temperaturniveaus durchgeführt, wobei die Fasern im ersten Versuch bis auf 90°C und im zweiten bis 120°C erwärmt werden. Dies hat jedoch lediglich einen Einfluss auf die Haptik des trockenen Preforms, der nach einer Behandlung mit 120°C eine höhere Steifigkeit als die übrigen Preforms aufweist. Auf die mechanischen Kennwerte hat dies jedoch keinen gravierenden Einfluss. Die Zug und Schubeigenschaften sind auf Abbildung 7 und 8 auszugsweise dargestellt. Auch bei weiteren Untersuchungen wurde kein Einfluss der Mikrowellenerwärmung auf die mechanischen Eigenschaften des Verbundes festgestellt.

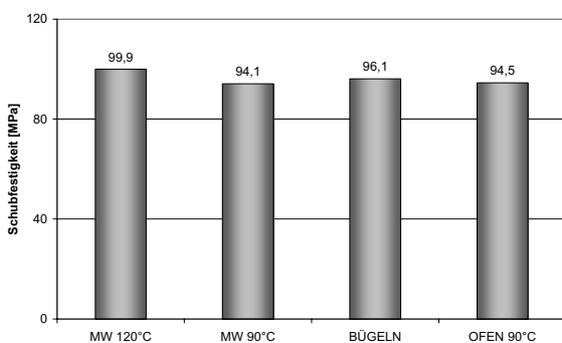


Abbildung 8 Schubfestigkeit für CFK-Gewebe

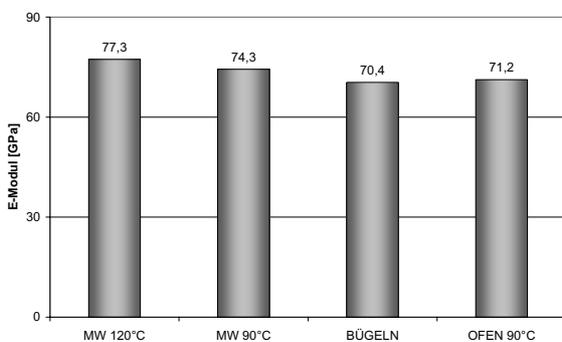


Abbildung 9 E-Modul für CFK-Gewebe

Die hier angegebenen Ergebnisse sind nach einer Airbus-Norm ermittelt worden und statistisch abgesichert. Die Eignung der Mikrowellenerwärmung für das Preforming ist damit nachgewiesen. Die Vorteile liegen bei der Einsparung von Prozesszeit und der Einsparung von Energie. Die Referenzverfahren nahmen 30 bis 50 Minuten in Anspruch, um gleichwertige Festigkeiten beim trockenen Faserpreform zu erzielen.

Zum Abschluss der thermischen Fertigungskette für CFK-Bauteile bleibt die Aushärtung von Strukturen mittels der Mikrowellenerwärmung zu untersuchen.

Im Folgenden wird ausschließlich auf die Aushärtung von injizierten Bauteilen eingegangen, da die zugrunde gelegte Laborausstattung aus einem Atmosphärendruck – Mikrowellenofen besteht. Die dielektrischen Eigenschaften von Prepreg und einem injiziertem Faseraufbau sind ähnlich. Die Aushärtung ist dabei der anspruchsvollste Prozess, da hier die höchsten Temperaturen bei geringen Toleranzen in Verbindung mit der Vakuumfestigkeit des Fertigungsaufbaus erzeugt werden. Die Kenntnis über die Verteilung der Temperatur über dem Bauteil ist dabei notwendig, um die Qualität des späteren Bauteils garantieren zu können. Die maximal im Prozess erzeugte Temperatur beträgt 180°C. Die Höhe der mit Mikrowellen erzeugbaren Temperatur ist u. a. abhängig von der Leistungsdichte einer Mikrowellenkammer, die aus dem Quotienten von maximaler Mikrowellenleistung und dem Kammervolumen entsteht. In den vorliegenden Versuchen betrug die Leistungsdichte etwa 8 kW/m³. Neben der Maximaltemperatur ist die homogene Verteilung der Temperatur über der Bauteilfläche und im Bauteilvolumen entscheidend. Die Temperaturverteilung in einer Mikrowellenanlage ist abhängig von einer geeigneten Einkopplung der Mikrowellen in das System. Die für die Versuche verwendete Anlage ist mit Schlitzhohlleiterantennen ausgerüstet. Ein homogenes Temperaturfeld ist zudem für die Prozesssteuerung notwendig, da der Mikrowellenprozess ein über die Temperatur gesteuerter Prozess ist. Dazu wird die maximale gemessene Temperatur mit dem Sollwert abgeglichen und Mikrowellenleistung entsprechend emittiert. In Anlehnung an einen Serienprozess ist die Temperaturmesstechnik in das Fertigungswerkzeug integriert.

Ein beispielhafter Temperaturverlauf ist auf Abbildung 8 wiedergegeben. An zwei Messstellen wurde die Temperatur protokolliert. Die Schwankungen der Temperatur werden durch die Trägheit der Temperaturmessung im Werkzeug verursacht und liegen nicht an der Mikrowellenanlage selbst. Aus Vorversuchen in die Temperaturverteilung im gesamten Werkzeug bekannt. Die kritischen Stellen werden als Messpunkte zur Prozesssteuerung gewählt, um eine für den Prozess ausreichende Temperaturverteilung zu erzielen.

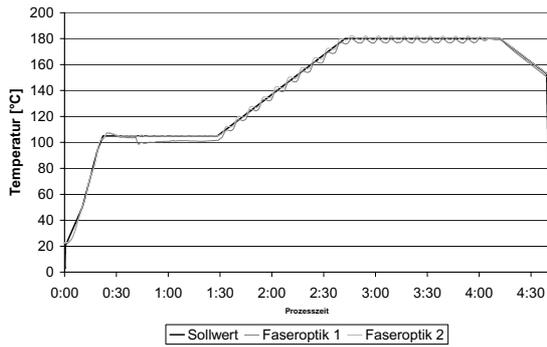


Abbildung 10 Temperaturverteilung in einem Mikrowellenprozess

Zur qualifizierten Aushärtung von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen ist die Kenntnis über einen eventuellen Einfluss der Mikrowellenerwärmung auf den Werkstoff notwendig. Nachdem der Fertigungsaufbau auf die sichere Prozessierung in einem Mikrowellenfeld angepasst ist, wird zunächst ein standardisierter Aushärtungszyklus für das Harzsystem RTM6 von Hexcel durchgeführt. Innerhalb der für das Harzsystem vorgeschriebenen Verarbeitungsparameter werden der Einfluss zur Verkürzung der Aushärtungszeit und die schnellere Prozessierung durch Erhöhung der Heizgradienten untersucht. Die Parameter zur Untersuchung des Mikrowellenprozesses sind die Aushärtungszeit und die Aufheizgeschwindigkeit. Die Aushärtung bei 180°C wird von 90min auf 60min für die Probe MW (1h bei 180°C) verkürzt, die Aufheizgeschwindigkeit von 1°C/min bleibt erhalten. Die Probe MW (3°C pro min) wird mit 3°C/min erwärmt und die Aushärtung bei 180°C 90min gehalten. Verglichen mit dem Mikrowellen-Referenz-Prozess und der Autoklav-Referenz liegt trotz der schnelleren Fertigung keine erhebliche Änderung der Schubfestigkeiten vor (Abbildung 10). Die gefertigten Proben sind nur im Fertigungsverfahren unterschiedlich und bezüglich Faserorientierung und Faservolumengehalt identisch.

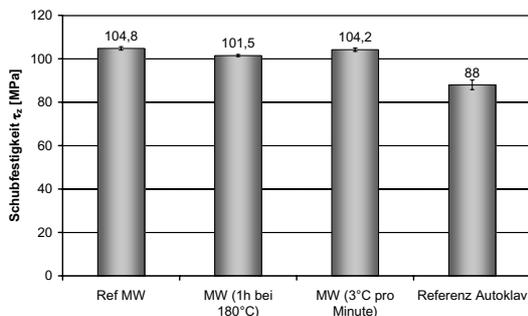


Abbildung 11 Schubfestigkeiten von mit Mikrowellen ausgehärteten Werkstoffproben

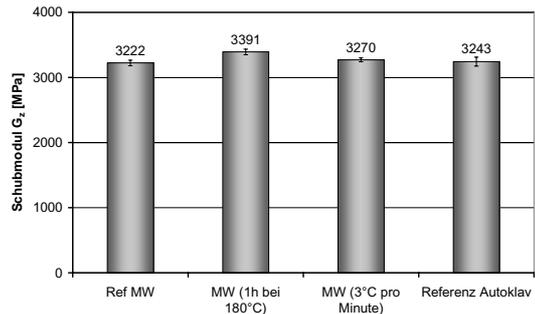


Abbildung 12 Schubmodul von mit Mikrowellen ausgehärteten Werkstoffproben

Die für den Grad der Aushärtung bezeichnende im System verbliebene Enthalpie, Abbildung 11, wird mittels einer differential-scanning-calorimetrie (DSC) gemessen. Die im System verbliebene Enthalpie fällt für alle Mikrowellenprozesse geringer aus, als die in der konventionellen Referenz. Demnach ist der Grad der Vernetzung bei den mit der Mikrowellenerwärmung ausgehärteten Proben höher als die konventionelle Referenz. Entsprechend ist die Glasübergangstemperatur für die mit Mikrowellen ausgehärteten Proben als die konventionelle Referenz.

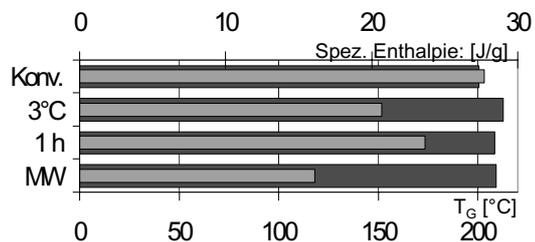


Abbildung 13 DSC Untersuchung für ausgehärtete Strukturen; spezifische Enthalpie im Vordergrund; Glasübergangstemperatur T_g im Hintergrund

Dies ist jedoch kein spezifischer Effekt, der auf die Verwendung von Mikrowellen zurückzuführen ist. Vielmehr ist die direkte Temperaturführung am Bauteil selbst für die bessere Werkstoffperformance verantwortlich.

Vergleicht man den in Abbildung 8 gezeigten Mikrowellenprozess mit der Temperaturführung aus Abbildung 12, so wird deutlich, dass der konventionelle Prozess durch eine thermische Trägheit ausgebremst wird.

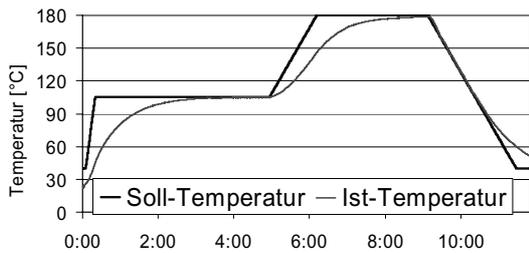


Abbildung 14 Temperaturführung in einem konventionellen Prozess

Zusammenfassung

Die Harzvorkonditionierung und die Prozessierung von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffbauteilen mit Hilfe der Mikrowellenerwärmung ist für die hier vorgestellten Verfahren möglich. Die Mikrowellenerwärmung beeinflusst die Werkstoffeigenschaften der späteren Verbundbauteile nicht negativ. In jedem Fall wurde über eine genaue Temperaturführung und die direkte Erwärmung der Werkstoffe der Prozess verkürzt. Das Potential der Mikrowellenprozesse ist dabei noch nicht ausgeschöpft, da die Aushärtung von Faser-verbundbauteilen und das Preforming noch nicht für eine industrielle Anwendung umgesetzt sind. Die ursprünglichen Ziele Prozesszeit und Energie einzusparen werden jedoch erreicht.

Referenzen

- [1] Roger Meredith; Handbook of industrial microwave heating; IEE Power Series 25
- [2] Einführung in die Festkörperphysik; Verlag R. Oldenburg; 10. Auflage 1993; S. 415 ff.
- [3] M. Rudolph, H. Schaefer; Elektrothermische Verfahren; Springer Verlag; Berlin Heidelberg New York; 1989
- [4] W. v. Münch; Werkstoffe der Elektrotechnik; Teubner; Stuttgart; 1993
- [5] Püschner; Wärme durch Mikrowellen; Philips technische Bibliothek; 1964
- [6] Ermanni, P.; Composites Technologien; ETH Zürich, Skript Version 3.0, Oktober 2004
- [7] Mijovic, Fischbain, Wijaya; Comparison of kinetics in thermal and microwave fields; macromolecules 1992, 25
- [8] Wei, Hawley; kinetics modelling and time-temperature-transformation diagram of microwave and thermal cure of epoxy resins; polymer engineering and science, 1995, vol. 35
- [9] Wei, Hawley, DeLong; comparison of microwave and thermal cure of epoxy resins; polymer engineering and science, 1993, vol. 33
- [10] Meinke, Grundlach; Taschenbuch der Hochfrequenztechnik; Vierte Auflage; Springer Verlag 1986
- [11] M. S. Johnson, C. D. Rudd, D. J. Hill; microwave assisted resin transfer moulding; Composites Part A 29A (1998) p. 71-86
- [12] C. Nightingale, R. J. Day; flexural and interlaminar shear strength properties of carbon fibre/epoxy composites cured thermally and with microwave radiation; Composites Part A 33 (2002)
- [13] Yarlagadda, Hsu; experimental studies of microwave curing and thermal curing of epoxy resin used for alternative mould material; Journal of materials processing technology (2004)
- [14] Bai, Djafari; Interfacial properties of microwave cured composites; Composites 26; 1995
- [15] Woo, Springer; microwave curing of composites; Journal of composite materials; Vol. 18; 1984