

SELECTION OF CFRP CURING TECHNOLOGIES FROM ENERGETIC POINT OF VIEW

- MANUSKRIFT -

M. DANILOV, W. Hagedorn, P. Hilmer, M. Opitz
German Aerospace Centre, Lilienthalplatz 7
38108 Braunschweig, Germany

1. EINLEITUNG

Fibre reinforced composite is an innovative material which became irreplaceable in the aeronautic branch. Several primary and secondary parts of modern aircraft and helicopter systems are manufactured of thermosetting or thermoplastic material reinforced by carbon or glass fibres.

Due to an enormous number of composite parts, several material combinations and manufacturing processes are established nowadays. Polymerization (curing) of matrix material is the essential step of each manufacturing process and is required as soon as thermosetting resins are treated. The most common curing techniques are based on convective energy transport in an oven or an autoclave; or on conduction from an electrically heated solid or a fluid. Besides these two options, several innovative techniques were developed and partly established in the past – such as inductive, infrared or microwave heating – which are based on energy transport by electromagnetic fields. The decision in favour or against certain curing technique is mostly made on basis of manufacturers experience, customer request, available equipment or financial resources.

This paper is intended as a help during the decision-making process by introduction of an additional criterion – the energetic impact of a curing technology and its compatibility with parts to be manufactured. In the first step the aimed part is described by a set of quantifiable parameters: e.g. size, complexity, reinforcing material, manufacturing process etc. Let be supposed, that convective heating is applicable limitless (suitable to heat up and cure all composite parts notwithstanding its parameters mentioned above) (BILD. 1).

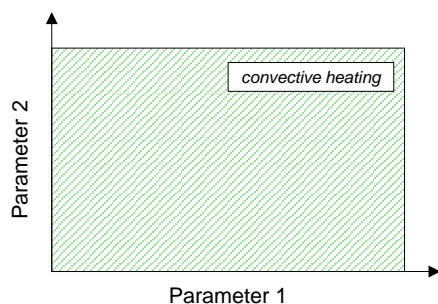


BILD 1: Convective heating being applicable for all parameter combinations

However, due to physical or parameter-dependent constraints (thermal mass, air flow velocity or temperature) the heat flow is mostly limited. Therefore such crucial values as process time or energy consumption are somehow limited as well. In the second step it is assumed, there are regions (set of parameters) where the use of non-convective heating techniques and energy transport mechanisms is more reasonable from the energetic point of view. That means higher heat flows can be achieved, leading to shorter process time and lower overall energy consumption. This idea is depicted below (BILD. 2).

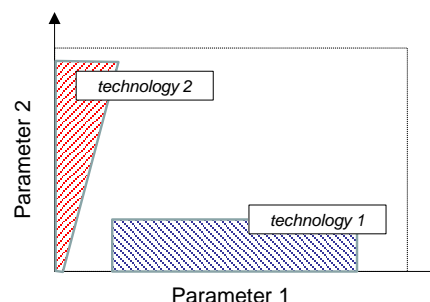


BILD 2: Alternative heating technologies being applicable for *certain* parameter combinations only

This paper shows how the most reasonable curing technique can be selected for a representative part based on its quantifiable parameters and the database developed at the German Aerospace Centre in Braunschweig. The database contains energetic properties of several heating technologies (microwave and fluid) and evaluates their applicability with respect to part parameters. The impact of this approach will be shown and evaluated in terms of achievable energy savings.

2. THERMISCHER PROZESSCHRITT INNERHALB DER FERTIGUNGSKETTE

Für die industrielle Fertigung von Strukturbauteilen für die Luftfahrt aus kohlenstofffaserverstärkten Duroplasten sind mehrere Prozessschritte notwendig, die je nach Anforderungen und verfügbaren Ressourcen zu verschiedenen Fertigungsketten zusammengesetzt werden können [Ehrenstein2006]. Ein Prozessschritt ist jedoch allen Fertigungsketten gemein – die Polymerisation. Im Rahmen der Polymerisation findet die Umwandlung der Monomere zu Polymermolekülen statt, wodurch ein stabiles und temperaturbeständiges

Kunststoffnetzwerk entsteht. Üblicherweise erfordert dieser Vorgang Energie – z.B. in Form von Wärme – die über einen gewissen Zeitraum hineingebracht wird. Den Weg der zugeführten Energie innerhalb des Polymerisationsprozesses zu untersuchen, ist das Ziel dieses Artikels.

Für die systematische Untersuchung dieser Fragestellung sei angenommen, dass mehrere Prozessteilnehmer innerhalb des Polymerisationsprozesses miteinander in Wechselwirkung stehen. Dabei werden Energieströme, je nach den Eigenschaften der einzelnen Teilnehmer, über die dazwischenliegenden internen Grenzen hinweg ausgetauscht – emittiert, absorbiert, transmittiert und sie können dabei auch umgewandelt werden. Der elektrische Strom ist die ursprüngliche und alleinige Energiequelle innerhalb des Prozesses, die Exothermie innerhalb des Prozessgutes sei vernachlässigt. Das Prozessgut sowie die Anlagentechnik, die Fertigungs(hilfs-)mittel und die Umgebung fungieren als Energiesenke. Im Mittelpunkt des Polymerisationsprozesses steht die Temperierung des Prozessgutes – alle Energieströme, die dahin gerichtet sind (E_{FP}), sind demzufolge erwünscht. Alle Energieströme, die über die externe Prozessgrenze hinweg zur Umgebung (E_{AU}) oder zu den sonstigen Prozessteilnehmern gerichtet sind, oder in diesen gespeichert ($E_{GA}-E_{AF}$, $E_{AF}-E_{FP}$) werden, sind als Verluste zu betrachten (BILD 3).

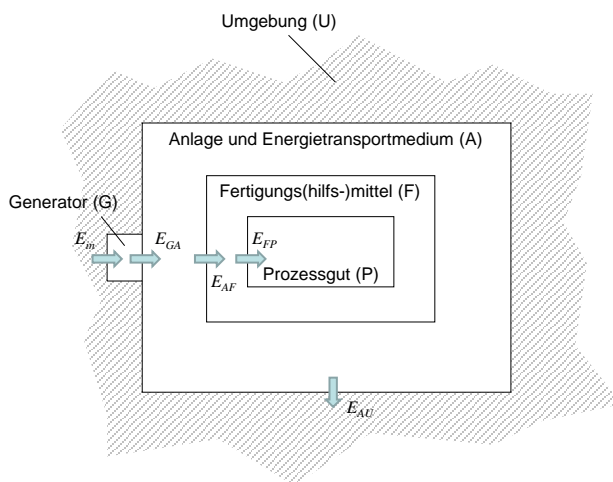


BILD 3: Energetische Skizze eines Temperierprozesses

Anhand der Energieströme, bzw. ihrer Größenordnung lässt sich die energetische Bilanz eines jeden Temperierprozesses aufstellen. Von besonderem praktischem Interesse ist der energetische Wirkungsgrad η , der als das Verhältnis der im Prozessgut gespeicherten Energiemenge E_P zur eingespeisten Energiemenge E_{in} definiert sei (GL. 1)

$$\eta = \frac{E_P}{E_{in}} \quad (\text{GL. 1})$$

In den weiteren Kapiteln dieses Papers wird anhand eines Testkörpers der Wirkungsgrad für die herkömmliche, konvektionsbasierte Temperiermethode und für die konkurrierenden Methoden ermittelt und diskutiert.

3. KONVEKTIONSBASIERTE ERWÄRMUNGSTECHNOLOGIE UND IHRE MERKMALE

Die Erwärmung von Materialien mittels erzwungener Konvektion ist ein hinreichend bekannter Prozess. Innerhalb der Fertigungskette für (kohlenstoff-)faserverstärkte Duroplaste findet die Temperierung in Öfen oder druckbeaufschlagten Öfen – den Autoklaven – statt. Dabei wird die elektrische Energie mittels eines Heizelements in die thermische Energie eines gasförmigen Energietransportmediums (Luft oder Edelgas) umgewandelt und von einem Lüfter innerhalb der Prozesskammer zum Zirkulieren gebracht. Die Energieübertragung zum Prozessgut oder zu den Fertigungs(hilfs-)mitteln findet über erzwungene Konvektion statt. Die pro Flächeneinheit konvektiv übertragene Energiemenge (Energieeintrag) kann berechnet werden mit (GL. 2):

$$\frac{\dot{Q}}{A} = \alpha \cdot (T_F - T_W) \quad (\text{GL. 2})$$

mit T_F – Fluidtemperatur und T_W – Prozessguttemperatur. Von entscheidender Bedeutung ist der Wärmeübergangskoeffizient α , der von folgenden Aspekten abhängig ist:

- Strömungsverhältnisse (laminar oder turbulent),
- Materialeigenschaften des Fluids (charakterisiert durch die Prandtl-, Nusselt- und die Reynoldszahl),
- Form, Größe und die Oberflächenbeschaffenheit des Prozessgutes

An dieser Stelle sei angenommen, dass bei technisch relevanten Temperierprozessen die Luft als Energietransportmedium jeden Punkt des Prozessgutes erreichen kann. Somit sind Prozessgüter unabhängig von ihrer Form, Größe, bzw. sonstigen Parametern temperierbar. Der Energieeintrag ist jedoch von den physikalischen Eigenschaften des Energieübertragungsmediums (Dichte, spezifische Wärmekapazität, etc.) abhängig. Die Anlagentechnik setzt allerdings Grenzen bezüglich des Energieeintrags, indem zum Beispiel die maximale Strömungsgeschwindigkeit oder die Temperatur des Energieübertragungsmediums beschränkt werden. In den nachfolgenden Kapiteln sind Temperierversuche beschrieben, die in einem Konvektionsofen mit den Abmessungen ca. 0,7 m x 0,65 m x 0,45 m und in einem Autoklaven mit den Abmessungen ca. Ø1,15 m x 1,2 m durchgeführt wurden.

4. KONKURRIERENDE ERWÄRMUNGSTECHNOLOGIEN UND IHRE MERKMALE

Parallel zum konvektiven Energieübergang, existieren weitere Mechanismen, die für industrielle Fertigung von faserverstärkten duroplastischen Bauteilen ausgenutzt werden können. Dazu gehören sowohl Wärmeleitung als auch die Energieübertragung mittels elektromagnetischer Felder.

Der Effekt der Wärmeleitung kann mit Hilfe einer elektrisch oder mit einem Fluid (Öl, Wasser) beheizten Presse

industriell ausgenutzt werden. Die letztere Variante – ein Fluidtemperiergerät – ermöglicht nicht nur die aktive Erwärmung, sondern auch die aktive Kühlung und wird aus diesem Grund in diesem Artikel detaillierter betrachtet (BILD 4). Das verwendete Wassertemperiergerät (1) wandelt in der Temperiereinheit die Energie des elektrischen Stromes in thermische Energie eines flüssigen Energietransportmediums (Wasser) um. Das Medium transportiert die Energie über ein Leitungssystem zum formgebenden Werkzeug (3), von dem sie über Wärmeleitung zum eigentlichen Prozessgut gelangt (2).

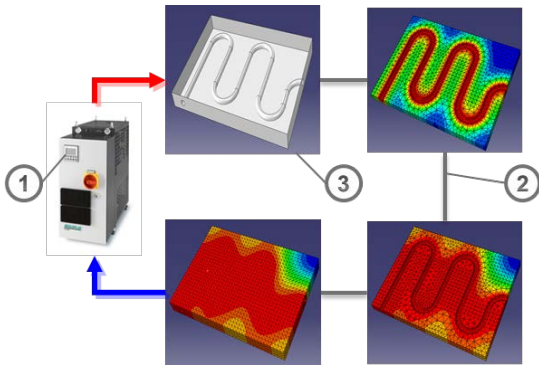


BILD 4: Schematische Darstellung des Kreislaufs Wassertemperiergerät – Formwerkzeug

Obwohl die Konstruktion einer derartigen Anlage und entsprechend angepasster Formwerkzeuge nicht trivial ist, bietet sie zahlreiche Vorteile, wie die Möglichkeit der aktiven Kühlung und hohe Energietransferraten [Regloplas2006]. Die Energieübertragung ist abhängig von den Eigenschaften des Prozessgutes und des Formwerkzeugs sowie von der Kontaktbedingung zwischen diesen. Für die Versuchsdurchführung wurde an das Wassertemperiergerät ein zweiseitiges Formwerkzeug mit einer Prozessfläche von ca. 0,34 m x 0,185 m und einer Werkzeugwanddicke 20 mm eingesetzt.

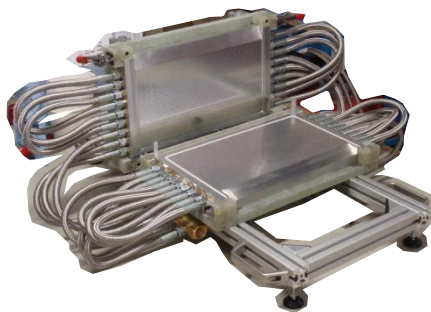


BILD 5: Formwerkzeug für fluide Temperierung

Der Energieübertrag durch elektromagnetische Felder hat zwei unterschiedliche Ausprägungen: in Form von Wärmestrahlung im Infrarotbereich und in Form von dielektrischen und Leitungsverlusten im Mikrowellenfeld. Während die erstere Variante hinreichend gut bekannt ist, wurde die letztere in den vergangenen Jahren intensiv erforscht [Meyer2007], [Feher2009]. Für die Temperierung im Mikrowellenfeld wird der elektrische Strom in ein hochfrequentes Feld (Frequenz meist bei 2,45 GHz) umgewandelt. Treffen die Hochfrequenz(HF)-Wellen auf ein verlustbehaftetes Material, so wird ihre Energie durch dielektrische Verluste oder Leitungsverluste in Wärme umgewandelt. Der Energieeintrag hängt dabei wesentlich

von den elektromagnetischen Eigenschaften des Prozessgutes – seiner elektrischen Permittivität ϵ und der magnetischen Permeabilität μ – ab. Ein wesentliches Merkmal der mikrowellenbasierten Temperierung ist die direkte Zugänglichkeit des Prozessgutes. Befindet sich das Prozessgut in einer Fertigungsumgebung, die keinen direkten Zugang der elektromagnetischen Wellen zum Material ermöglicht (z.B.: ein Laminat im beidseitigen metallischen RTM-Formwerkzeug), so ist kein Energieeintrag möglich. In den späteren Versuchen kam ein Mikrowellenkammerofen mit der Kammergröße von 1 m x 1 m x 1 m zum Einsatz (BILD 6).



BILD 6: Mikrowellenkammerofen

5. ENERGETISCHER WIRKUNGSGRAD DER ERWÄRMUNGSTECHNOLOGIEN

Der Wirkungsgrad einzelner Erwärmungstechnologien wurde ermittelt, indem ein ebener, plattenförmiger Testkörper entsprechend einem repräsentativen Temperaturprofil (BILD 7) temperiert wurde. Das Temperaturprofil besteht aus einem Gradienten, in dem die Temperatur des Testkörpers von Raumtemperatur aus um 120 K erhöht wird und aus einer Haltephase, in der konstante Temperatur aufrechterhalten wird.

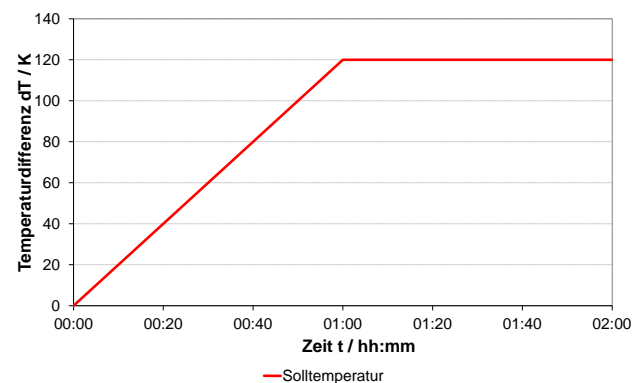


BILD 7: Solltemperaturprofil

Der Testkörper befindet sich bereits vor der Versuchsdurchführung im polymerisierten Zustand. Dadurch kann ausgeschlossen werden, dass eine exotherme Reaktion stattfindet und somit eine zusätzliche Wärmequelle die Ergebnisse beeinflusst. Die Abmessungen des Testkörpers betragen 340 mm x

185 mm x ca. 2,1 mm, er besteht aus 8 HTS-Kohlenstofffaserlagen eingebettet in duroplastisches Harz mit der Bezeichnung 977-2 des Herstellers Cytec. Die Masse beträgt ca. 0,230 kg.

Zur Erfassung der Testkörpertemperatur sind in das Innere des Testkörpers 6 metallische Thermoelemente des Typs J einlaminiert. Wird der Testkörper entsprechend dem Sollprofil temperiert, speichert er eine Wärmemenge E_p , die sich mit GL. 3 berechnen lässt:

$$E_p = m \cdot c_p \cdot \Delta T \quad \text{GL. 3}$$

mit: m – Masse des Testkörpers, c_p – spezifische Wärmekapazität des Testkörpermaterials (700 J/kgK für CFK [Adomeit2010]) und ΔT – Temperaturdifferenz. Für den o.g. Testkörper beträgt die gespeicherte Wärmemenge $5,5 \cdot 10^{-3}$ kWh. GL. 3 besagt, dass während der Haltephase bei konstanter Temperatur keine Energiezunahme im Prozessgut erfolgt und deshalb im Idealfall keine Energiezufuhr von der Anlagentechnik notwendig ist.

Während der Versuchsdurchführung in einem herkömmlichen konvektionsbasierten Ofen, einem Autoklaven, in einem Wassertemperiergerät und in einem Mikrowellenkammerofen wurden kontinuierlich die Testkörpertemperatur und die Energieaufnahme am elektrischen Anschluss einer jeden Anlage aufgezeichnet. Die Messergebnisse sind wie folgt (BILD 8 – BILD 11):

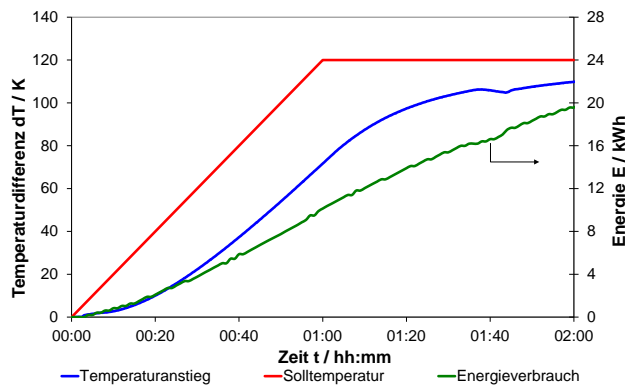


BILD 8: Temperatur- und Energieprofil bei der Temperierung des Testkörpers im herkömmlichen Autoklaven

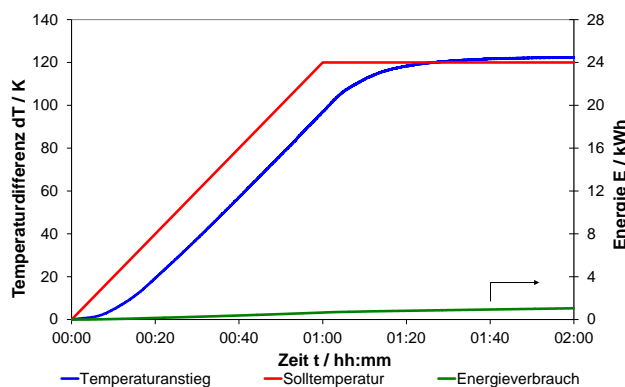


BILD 9: Temperatur- und Energieprofil bei der Temperierung des Testkörpers im herkömmlichen Ofen

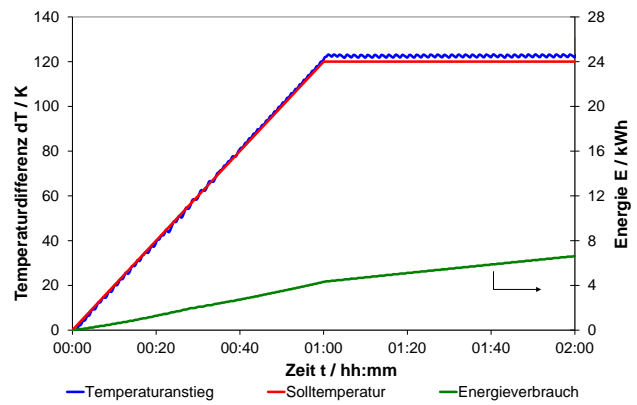


BILD 10: Temperatur- und Energieprofil bei der Temperierung des Testkörpers im Wassertemperiergerät

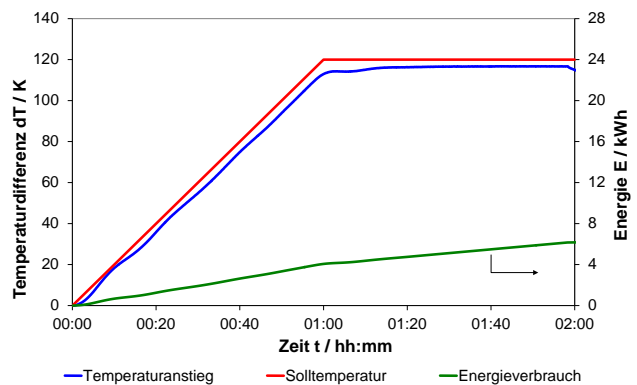


BILD 11: Temperatur- und Energieprofil bei der Temperierung des Testkörpers im Mikrowellenkammerofen

Eine wichtige Kennzahl der Temperierversuche ist der Gesamtenergieverbrauch. Sie ist in der nachfolgenden Tabelle (TAB. 1) zusammengefasst:

Temperiermethode	Gesamtenergieverbrauch E_{in} / kWh	Wirkungsgrad η / %
konvektiv, Autoklav	19,56	0,03
konvektiv, Ofen	1,05	0,52
Wärmeleitung, Wassertemperiergerät	6,63	0,08
dielektrisch/induktiv, Mikrowellenofen	6,16	0,09

TAB. 1: Gesamtenergieverbrauch und Wirkungsgrad der Temperierverfahren

Die Größenordnung des berechneten Wirkungsgrades η deutet darauf hin, dass alle aktuell verfügbaren Temperierverfahren, unabhängig von den zugrundeliegenden physikalischen Mechanismen, stark verlustdominiert sind [Danilov2010]. Lediglich ein geringfügiger Bruchteil der im Idealfall benötigten Energie wird im Prozessgut gespeichert, der Rest dissipiert zur Umgebung oder wird in den sonstigen Wärmesenken (Fertigungsmittel und Hilfsmittel und Anlagentechnik) gespeichert.

Weiterhin ist erkennbar, dass der Energieeintrag über erzwungene Konvektion mit einem Nachteil behaftet ist – der Temperaturanstieg im Prozessgut findet nicht unmittelbar statt, sondern erst nach einer Verzögerung. Bei der Temperierung über Wärmeleitung und hochfrequente Felder im Mikrowellenofen ist der

Temperaturanstieg direkt und folgt unmittelbar der Solltemperatur.

Daraus lässt sich die Aussage ableiten, dass bei der konvektiven Wärmeübertragung die thermische Masse des Energieübertragungsmediums einen eindeutigen Einfluss auf den Gesamtenergieverbrauch und den Wirkungsgrad des Prozesses besitzt.

6. ANWENDUNGSGEBIETE DER TEMPERIERTECHNOLOGIEN

Einer der zentralen Gedanken dieser Arbeit ist die Annahme, dass unterschiedliche faserverstärkte Bauteile durch einen Satz verschiedener, teilweise auch zahlenmäßig erfassbarer Parameter beschrieben werden können:

- Größe: klein / mittel / groß
- Komplexität: eben / einfach gekrümmt / doppelt gekrümmt
- Thermische Eigenschaften: niedrige / mittlere / hohe Glasübergangs- oder Schmelztemperatur
- ...

Stellt man einzelne Parameterkategorien als Achsen dar, so lässt sich ein mehrdimensionales Koordinatensystem aufspannen, in dem jedes Faserverbundbauteil als ein Punkt eindeutig identifiziert ist. In derartigen Diagrammen können ebenfalls Bereiche gekennzeichnet werden, in denen die Temperierung der Bauteile mittels eines bestimmten Verfahrens möglich oder möglich ist sinnvoll ist (BILD 12):

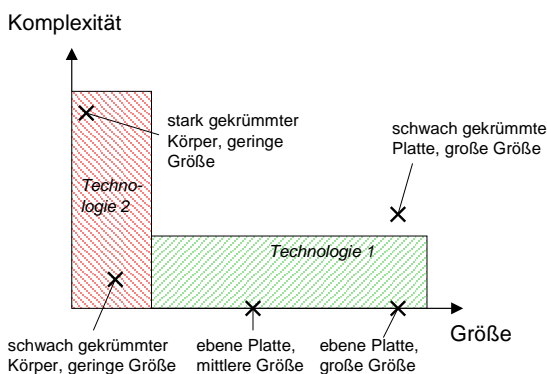


BILD 12: Beispielhafte Darstellung eines 2D-Koordinatensystems, mit dem Wirkungsbereich zweier unterschiedlicher Temperiertechnologien

Das BILD 12 kann folgendermaßen interpretiert werden:

- die beiden ebenen Platten (mittlere und große Größe) können mit der Technologie 1 temperiert werden,
- die schwach gekrümmte Platte großer Größe kann weder mit der Technologie 1, noch mit der Technologie 2 temperiert werden,
- der stark gekrümmte Körper geringer Größe kann mit der Technologie 2, jedoch nicht mit der Technologie 1 temperiert werden,
- der schwach gekrümmte Körper geringer Größe kann sowohl mit der Technologie 1 als auch mit der Technologie 2 temperiert werden.

Im letzteren Fall ist es von besonderem Interesse Erkenntnisse zu besitzen, welche Temperiertechnologie einen besseren Wirkungsgrad ermöglicht. Dies soll nachfolgend exemplarisch anhand der gewonnenen Versuchsergebnisse und der vorhandenen Erfahrungswerte dargestellt werden.

Eingangs wurde bereits erwähnt, dass der konvektive Wärmeübergang geeignet ist, um Körper beliebiger Form und Größe zu temperieren. Mit steigender Größe und Komplexität ist es jedoch anzunehmen, dass der Wirkungsgrad des Verfahrens sinkt (BILD 13):

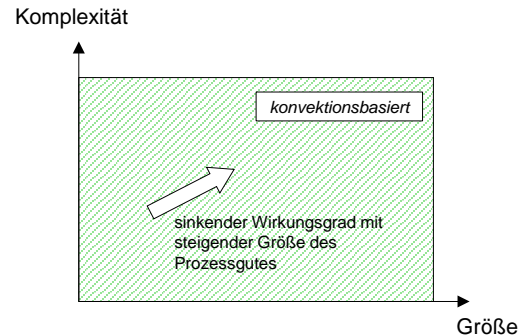


BILD 13: Wirkungsbereich der konvektionsbasierten Temperiertechnologie

Die auf Wärmeleitung basierte Methode ermöglicht eine trägheitsfreie Temperierung und verfügt über einen vergleichsweise hohen Wirkungsgrad, ist aufgrund der komplexen Formwerkzeugkonstruktion (z.B.: Temperierkanalführung) jedoch eher für einfache, flächige Bauteile beliebiger Größe geeignet. In diesem Bereich ist sie der konvektionsbasierten Technologie überlegen (BILD 14):

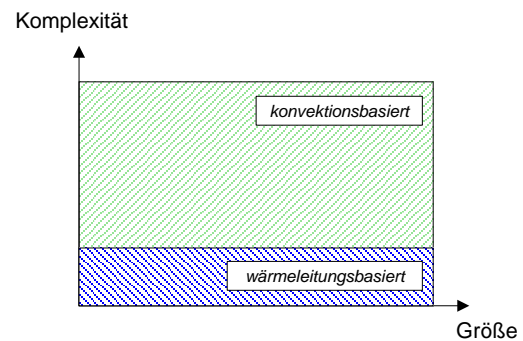


BILD 14: Wirkungsbereich der konvektionsbasierten und der wärmeleitungs-basierten Temperiertechnologie

Die auf hochfrequenten Feldern basierte Temperiertechnik ist für die Temperierung von einfach gekrümmten Körpern beliebiger Größe geeignet (BILD 15). Im Bereich der ebenen Platten ist sie der auf Wärmeleitung basierten Technologie im Hinblick auf den energetischen Wirkungsgrad ebenbürtig.

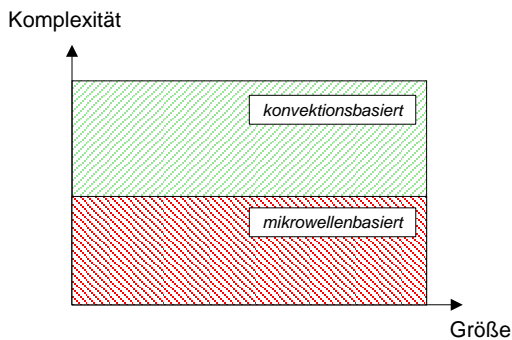


BILD 15: Wirkungsbereich der konvektionsbasierten und der mikrowellenbasierten Temperiertechnologie

7. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Innerhalb der modernen und fortschrittlichen Fertigungsketten für faserverstärkte Duroplaste ist die Polymerisation ein zeit- und energieaufwändiger Prozessschritt. Um Ersparnisse in diesem Bereich zu erzielen, forscht man an alternativen Temperiertechnologien, die den Stand der Technik – meist konvektionsbasierte Prozessierung im Ofen oder im Autoklaven – ersetzen können. Insbesondere die energetische Effizienz ist bei der Entwicklung ein wichtiges Kriterium.

Drei Erwärmungstechniken, die auf unterschiedlichen thermodynamischen Effekten – Konvektion, Wärmeleitung und HF-Feld-Materie-Interaktion – beruhen, wurden hinsichtlich ihres energetischen Wirkungsgrades untersucht. Dabei wurde im konvektionsbasierten Ofen und Autoklaven, in einem Wassertemperiergerät und in einem Mikrowellenofen ein ebenes Testlaminat temperiert. Zur Prozessbewertung stehen die am elektrischen Anschluss der jeweiligen Anlage aufgenommene Energiemenge und die im Testlaminat gespeicherte thermische Energie zur Verfügung. Der Vergleich zeigt, dass der energetische Wirkungsgrad einer jeden Technologie sehr gering ist – ein Großteil der in die Anlage eingespeisten Energie dissipiert zur Umgebung oder bleibt in den sonstigen Wärmesenken gespeichert.

Auf Konvektion basierende Techniken zeichnen sich durch eine träge Temperaturentwicklung im Laminat aus. Dies ist begründet durch die hohe thermische Masse des Energietransportmediums, das die Wärme vom Generator zum Prozessgut transportiert. Wärmeleitungsbasierte und mikrowellenbasierte Verfahren sind zwar nicht uneingeschränkt einsetzbar, ermöglichen aber eine trägheitsfreie Temperierung des Prozessgutes ohne nennenswerte Differenz zwischen der Soll- und der Ist-Temperatur des Prozessgutes.

Die oben präsentierten graphischen Darstellungen der Wirkungsbereiche einzelner Technologien erlauben einen ersten Hinweis darauf welche Technologie für die Fertigung welcher Art von Bauteilen aus Energiespargründen zu bevorzugen ist. In den weiteren Arbeiten ist es geplant zum einen die experimentelle Datenbasis zu erweitern und Erfahrungen für weitere Prozessgutparameter zu sammeln und zum anderen daraus analytische Gesetzmäßigkeiten abzuleiten. Das endgültige Ziel der Arbeiten ist es dem Fertigungsingenieur eine Entscheidungshilfe zu Verfügung

zu stellen, die eine Verbindung zwischen dem zu produzierenden Bauteil und den verfügbaren materiellen und finanziellen Ressourcen herstellt. Dadurch soll die Entscheidung für oder wider eine bestimmte Temperier- oder Fertigungstechnologie nachvollziehbar und transparent gemacht werden.

QUELLEN

- [Adomeit2010] Adomeit, A., Wille, T.; „Simulation der CFK-Aushärtung am Beispiel einer Haut-Stringer-Verbindung“; IB 131-2010/03, DLR e.V., Braunschweig, 2010
- [Danilov2010] Danilov, M., et al.; „Energy Efficiency of Dielectric Curing of CFRP“; Proceedings Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress, Hamburg, 2010
- [Ehrenstein2006] Ehrenstein, G.W.; „Faserverbundkunststoffe Werkstoff-Verarbeitung-Eigenschaften“; Carl Hanser Verlag, München, 2006
- [Feher2009] Feher, L.E.; „Energy Efficient Microwave Systems: Materials Processing Technologies for Avionic, Mobility and Environment Applications“; Springer, ISBN-13: 978-3540921219, Berlin, 2009
- [Meyer2007] Meyer, M.; „Herstellung von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffbauteilen mit Hilfe von Mikrowellen“; Dissertation, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., ISSN 1434-8454, Köln, 2007
- [Regloplas2006] „Handbuch der Temperierung mittels flüssiger Medien“; Regloplas AG, Hüthig Verlag, 2006