

Werkzeugtemperierung zur Fertigung integraler CFK-Komponenten

A. Stieglitz¹, W. Fröhlingsdorf²

¹ Faserinstitut Bremen e.V. Am Biologischen Garten 2, 28359 Bremen

² MET Motoren- und Energietechnik GmbH Erich-Schlesinger-Straße 50, 18059 Rostock

Das zur Herstellung von Faserverbundstrukturen verbreitete RTM Verfahren (Resin Transfer Moulding) zur Herstellung von Faserverbundwerkstoffen ermöglicht einen hohen Freiheitsgrad bzgl. der Bauteilgeometrie, ähnlich wie bei Spritzgussprozessen oder im Metallguss. Zunächst wird trockenes Fasermaterial in die Kavität eines Formwerkzeuges drapiert und in einem weiteren Prozessschritt ein niederviskoses Harzsystem injiziert. Das Aufheizverhalten der zumeist metallischen Werkzeuge wird im Rahmen eines Forschungsprojektes speziell im Hinblick auf die Herstellung integraler Vielholmerboxstrukturen untersucht. Durch die Erhöhung der geometrischen Bauteilkomplexität und Anzahl von erforderlichen Kernen in einem Werkzeug, steigt die erforderliche Dauer der Wärmeübertragung in innenliegende Werkzeugteile. In einer vergleichenden Betrachtung werden unterschiedliche Werkstoffe untersucht, um die erforderlichen Formwerkzeuge zu realisieren. Zur Reduzierung der Zykluszeit bei der Herstellung dieser Bauteile wird das RTM Verfahren um eine variotherme Öltemperierung ergänzt. Zur Bewertung der integrierten Fluidheizung und Anpassung der eingebrachten Wärmemenge wird der Aufheiz- und Aushärtprozess in verschiedenen Varianten simuliert.

Einer der bestimmenden Parameter zur Etablierung eines effizienten und kostengünstigen Fertigungsprozesses für Hochleistungsfaserverbunde ist die Geschwindigkeit der Wärmeübertragung in das Formwerkzeug zur Polymerisation der Matrix. Speziell bei der Herstellung einer monolithischen Hohlstruktur mit Verstärkungsholmen ist für die Nutzung einer konventionellen Heizung wie beispielsweise in einem Ofen oder einer elektrischen Heizpresse eine gute Wärmeleitfähigkeit des Werkzeugmaterials erforderlich. Die

besondere Herausforderung ergibt sich hierbei im Wesentlichen durch die isolierende Wirkung der evakuierten Kavität mit dem textilen Preform. Bei der Nutzung eines RTM-Prozesses mit einer konventionellen Werkzeugbeheizung muss sichergestellt sein, dass das Innere des Formwerkzeuges durch Wärmeleitung über die stirnseitige Anbindung der Kerne und durch den Faserpreform sowie durch Wärmestrahlung erwärmt wurde. Der Aufheizprozess muss so gesteuert werden, dass die Temperatur der

inneren Oberfläche des Formwerkzeuges vor der Harzinjektion innerhalb einer tolerierten Schwankungsbreite liegt. Besonderes Augenmerk ist hier bei der Erwärmung der inneren Kerne erforderlich, welche durch die Kavität mit Preform von den äußeren Werkzeugteilen isoliert werden.

Da eine homogene Erwärmung der Kavität hierbei in der Regel nicht erreicht werden kann, muss das Formwerkzeug auf einer Temperaturstufe gehalten werden, so dass die tolerierte Schwankungsbreite der Temperatur erreicht wird.

Der industrielle Bedarf zur Herstellung von Faserverbundstrukturen besteht in der Beschleunigung des Heizzyklus von RTM Werkzeugen. Da für Haltezeiten zur Aushärtung eine definierte Mindestdauer vorgeschrieben ist, sollen zur Beschleunigung des Fertigungszyklus die Temperaturgradienten erhöht werden. Es wird eine Temperatursteigerung von 5 °C/min angestrebt, um hoch reaktive Harzsysteme für den Flugzeugbau zu verarbeiten.

Der Fertigungsprozess zur Herstellung von Faserverbundbauteilen mit dem RTM Verfahren ist komplex, da vorbereitende Prozessschritte wie das Preforming wesentlichen Einfluss auf die Fertigungsqualität und die späteren Bauteileigenschaften haben. Zudem sind Prozessparameter (Aufheizrate, Temperaturverteilung, Druckaufbringung) zur Aushärtung von

hoher wirtschaftlicher Bedeutung, da die Belegungszeit eines Formwerkzeugs von hoher Bedeutung für die erreichte Fertigungsrate ist. Temperaturunterschiede wirken sich hierbei in hohem Maße negativ auf das Füllverhalten bei der Injektion aus, da die lokal unterschiedliche Viskosität den Verlauf einer erzeugten Fließfront verändert. Zudem wird die geometrische Abbildung der Werkzeugkavität beeinträchtigt, da in Abhängigkeit von den Temperaturdifferenzen im Werkzeug unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten von Faser und Matrix die Bildung von Eigenspannungen im Bauteil begünstigen, welche zu geometrischem Verzug führen können, wodurch zudem eine Schwächung der mechanischen Kennwerte hervorgerufen werden kann. [1]

In der Regel haben Harze, die im Bereich Flugzeugbau für eine lasttragende Struktur verwendet werden können bei ihrer Aushärtung eine Volumenabnahme von etwa 3%. Zum Zeitpunkt einer maximalen Polymerisation in Bereichen der Hautfläche ist im dargestellten Beispiel das Harz im Holmbereich auf Grund der späteren Wärmeübertragung noch flüssig oder gelförmig. Generell besteht bei einem Bauteil mit unterschiedlichen Wandstärken das Risiko, dass im Bereich erhöhter Wandstärke eine frühe Polymerisation durch zeitlich verzögerten Harzschrumpf zu harzarmen Bereichen in anliegenden

Bereichen führen kann. Im Fall der Vielholmerbauweise ist das Hautlaminat im Lasteinleitungsbereich deutlich stärker ausgelegt, als die Holme – hierbei besteht bei einer stark inhomogenen Erwärmung des Werkzeuges ein Risiko in der zeitlich verzögerten Polymerisation. Kritisch kann sich dieser Effekt auswirken, wenn das Abführen thermischer Energie durch eine besonders geringe Wärmeleitfähigkeit des Werkzeugmaterials eingeschränkt wird. Eine weitere Ursache, die diesbezüglich zu einem kritischen Verhalten führen kann ist die geringe Abfuhr von Reaktionswärme innerhalb dickwandiger Lamine, wodurch sich erhebliche Temperaturgradienten bis hin zu einer Schädigung der Matrix einstellen können. [2]

Temperierung bei Gießverfahren – Spritzguss/Druckguss und Übertragbarkeit auf RTM Prozesse
Bei ähnlichen Produktionsverfahren, bei denen eine Werkzeugkavität gefüllt wird, beispielsweise beim Spritzguss oder Druckgussverfahren wird ein Werkzeug in der Regel durch folgende Methoden temperiert:

1. Elektrische Heizung: In Abhängigkeit von der Bauteilkomplexität kann mit moderatem Aufwand eine elektrisch betriebene Widerstandsheizung in ein Formwerkzeug integriert werden. Die Heizleistung ist sehr genau regelbar, jedoch ist eine Kühlung nur schwer zu realisieren. Auf Grund dessen fehlt mit diesem Verfahren die erforderliche Dynamik und eine Anpassung an

komplexe Konturen ist mit hohem Aufwand verbunden.

2. Induktion: Eine hohe Heizleistung mit lokalem Eintrag in einer Kavität ist generell möglich, jedoch mit sehr hohen Werkzeugkosten verbunden. Ein integrierter Preform wirkt sich negativ auf einen reproduzierbaren Heizprozess aus, da eine wechselnde Faserorientierung aus Kohlenstofffasern unterschiedliche Wärme generiert. Eine Kühlung des Bauteils oder Werkzeuges ist mit diesem Verfahren nicht möglich.

3. Flüssigkeitsheizung: Im Spritzguss ist die Heizung mittels flüssiger Medien auf Grund der moderaten Werkzeugkosten und der Möglichkeit zur dynamischen Prozessführung verbreitet. Die Maximaltemperatur ist jedoch in der Regel auf etwa 200 °C beschränkt. Bei der Verwendung von Thermalölen muss die Abnutzung von Ölen durch Temperaturschwankungen und ggf. Sauerstoffeinfluss berücksichtigt werden. Das Verfahren bietet Risiken der Kontamination von Faserpreforms, ermöglicht aber neben schnellen Temperaturwechseln eine Kühlung des Formwerkzeuges.

Zur Verbesserung der thermischen Abläufe im RTM Werkzeug wurde eine Temperierung mittels flüssiger Medien gewählt, da sowohl Heiz- als auch Kühlphasen positiv beeinflusst werden können. Eine Kombination aus elektrischer Heizung und Kühlung mittels flüssiger Medien ist durchaus vergleichbar und auf die folgenden

Untersuchungen gleichwertig anwendbar.

Die Ziele der Temperierung sind in Abhängigkeit vom Produkt oftmals unterschiedlich. Die Reduzierung von Zykluszeiten bei der Produktion, Vermeidung von Spannungen im Bauteil oder das Erreichen von Oberflächen mit besonders geringer Rauheit oder definierter Strukturierung können je nach Anwendung unterschiedlich gewichtet werden.

Es wurde in das Werkzeug kavitätsnah eine variotherme Öltemperierung integriert, so dass eine aktive Regelung während der Temperierphasen eingesetzt werden kann. Die Integration von zusätzlichen Medien, wie beispielsweise Öle im Fertigungsprozess von CFK-Strukturen ist nicht unproblematisch. Bereits geringe Mengen, die während der Fertigung in Kontakt mit dem Bauteil (Harz oder Faserpreform) kommen führen zur Kontamination. Ein Dichtungskonzept muss daher nicht nur die Kavität von der Umgebung

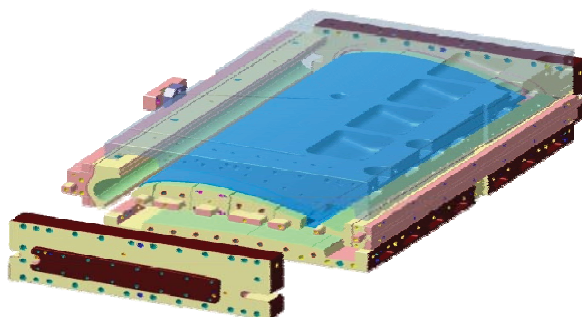


Abbildung 1: Schematische Darstellung des RTM Formwerkzeuges

zuverlässig isolieren, sondern ein weiteres Medium in einem getrennten Kreislauf abschirmen. Im Fall des RTM Werkzeuges zur Herstellung des Landeklappendemonstrators wird das Thermalöl in drei separaten Kreisläufen unterschiedliche Temperaturprofile realisieren, um das Heizen und Kühlen des Formwerkzeuges weitestgehend homogen zu gestalten. Hierzu ist eine Berechnung des Wärmeeintrages in Abhängigkeit von der lokal beeinflussenden Werkzeugmasse von hoher Bedeutung. Um hierbei eine angepasste Steuerung des Wärmemengeneintrages realisieren zu können wurden sowohl das Werkzeug, als auch der Bedarf des Wärmeeintrages für jeden Heizkanal detailliert untersucht und das Zusammenwirken mit der Software Ansys simuliert. Für jede Heizsektion wird ein Temperaturverlauf des Heizmediums ermittelt, welcher kontinuierlich an den Heizbedarf angepasst wird. Dadurch wird der Aufheizprozess in besonderem Maße beeinflussbar, da das Temperaturprofil innerhalb des Werkzeuges an den lokalen Bedarf angepasst werden kann. Es wird ermöglicht, dass während des Aufheizprozesses Temperaturschwankungen ausgeglichen werden können und auf eine lokale Temperaturüberhöhung beispielsweise auf Grund einer exothermen Temperaturschwankung reagiert werden kann.

Wärmeleitung im RTM Formwerkzeug

Es werden zur Herstellung der integralen Boxstruktur zwei Werkzeugkonzepte mit unterschiedlichen Werkstoffen untersucht. Zum einen wird die Herstellung der Komponente in einem Werkzeug aus Aluminium untersucht, zum anderen wird ein Stahl mit geringer thermischer Ausdehnung verwendet. Bei der Nutzung von Aluminium ist es auf Grund der guten Wärmeleitfähigkeit nicht zwangsläufig notwendig, dass die Heizleistung nahe der Kavität in das Formwerkzeug eingeleitet wird. Ein guter Wärmetransport ermöglicht ein relativ gleichmäßiges Aufheizen von Formwerkzeugen, wodurch der erhöhte Aufwand einer aktiven Temperierung im Inneren des Werkzeuges vermieden werden kann. Der Bedarf die geometrische Form mit besonderes geringer Toleranz abzuformen kann den Einsatz von Formoberflächen aus einem Chrom-Nickel Stahl (Invar-Stahl; Pernifer) erfordern, da eine besonders geringe Temperatúrausdehnung realisiert werden kann. Der Werkstoff wird insbesondere zur Ausformung von Hohlstrukturen, bei denen Hinterschneidungen durch das Werkzeug realisiert werden sollen, da bei der Entformung des Bauteils keine Spannungen durch unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten hervorgerufen werden. Diese Stähle haben jedoch auf Grund ihrer hohen Wärmekapazität und geringen Leitfähigkeit in der Regel deutlich

schlechtere Eigenschaften bezüglich einer gleichmäßigen und schnellen Erwärmung der Kavität. Zur Realisierung einer monolithischen Boxstruktur wurde daher die Variante eines Invar RTM Werkzeuges mit einer Flüssigkeitsheizung entwickelt. Das Formwerkzeug beinhaltet separate Heizzonen, welche individuell angesteuert werden können. Die Wärme soll im Werkzeug so eingebracht werden, dass eine Werkzeugerwärmung mit relativ geringen Temperaturdifferenzen erfolgen kann. Über die Thermalölbohrungen wird ein hoher konvektiver Wärmestrom vom Wärmeträger an das FEMI abgegeben, welcher die bauteilnahen Werkzeugbereiche gezielt erwärmt. Es können dabei verschiedene thermische Zonen des Werkzeuges z.B. durch Steuerung der Fluidtemperatur und Geschwindigkeit erwärmt werden, so dass nur geringe Temperaturdifferenzen auftreten. Unter der Berücksichtigung, dass die Anzahl von Heizkanälen begrenzt ist, steht jedoch eine maximal reduzierte Aufheizzeit zum Teil im Widerspruch mit einer homogenen Beheizung der Kavitätsoberfläche. Durch die Simulation in Ansys kann diesbezüglich ein sinnvoller Kompromiss berechnet werden.

Aufbau des Formwerkzeuges

Das betrachtete Werkzeug aus Invar-Stahl verfügt über eine Masse von etwa 3.800 kg und dient der Herstellung eines

Fertigungsdemonstrators der Vielholmerbox von etwa 1.500 mm Länge. Die Höhe der Holme beträgt etwa 115 mm – die Ausformung der monolithischen Hohlstruktur erfolgt durch metallische Kerne, welche zur Abbildung der inneren Kontur und zur Ausformung von Hinterschneidungen im Bauteil geteilt werden. Die Kerne werden daher, soweit erforderlich ebenfalls aus Invar Stahl gefertigt. Der innere Bereich der Kerne sowie die Teile des Werkzeuges bei denen die innere Kontur keine Hinterschneidung aufweist wird durch

Aluminiumelemente ausgeformt, um ein Freischrupfen nach der Aushärtung zu ermöglichen.

Thermische Analyse der Bauteilherstellung im RTM Verfahren

Zur Simulation der zeitlichen Temperaturänderungen wurden folgende Annahmen getroffen:

Material	Wärmeleitfähigkeit [W/(m K)]	Spezifische Wärmekapazität [J/(kg K)]	Dichte [kg/m³]
Faserpreform	0,12	1000	1170
Verbund aus Gewebe (C-Faser) und Matrix (RTM6 Harz); FVG 60%	0,40	1000	1648
Aluminium	237	903	2702
Invar Stahl	14	515	8130

Tabelle 1: Kennwerte verwendeter Materialien zur Simulation thermischer Abläufe

Die simulierte Erwärmung des beschriebenen Formwerkzeuges mit Hilfe einer Heizpresse, deren Kontaktflächen zur Erwärmung von oben und unten flächig genutzt werden zeigt ein stark inhomogenes Heizprofil. Die Isolierung der inneren Kerne durch den Faserpreform verdeutlicht die starken Temperaturgradienten im Werkzeug. Als Ansicht dient hierbei ein

beispielhafter Schnitt des Werkzeuges im mittleren Bereich des Fertigungsdemonstrators. Die Ansicht verdeutlicht zunächst generell die Problematik bei der Fertigung geschlossener Boxstrukturen.

In Tabelle 1 ist das Maximum der Temperaturdifferenz - nach der Harzinjektion - im Werkzeug dargestellt. Das Temperaturprofil nach

ca. 180 min umfasst an der Kavität Temperaturen zwischen etwa 155°C und 180°C. Die nachfolgend ermittelten

Vernetzungsgraddifferenzen

resultieren aus dem dargestellten Heizzyklus. Die Isolierung (adiabat) der Seitenwände zeigt einen Anstieg der im Werkzeug ermittelten Minimaltemperatur um ca. 4K nach 160 Minuten gegenüber freier Konvektion zur Umgebung. Die gemittelte minimale Aufheizrate des Formwerkzeugs liegt in diesem Fall bei 0.74 K/min (110°C nach 122 Minuten) bei Betrachtung vor dem Ausgleichprozess durch eine Haltephase. In dieser Haltephase erfolgt ein Angleichen der Werkzeugtemperatur, bis die Injektion innerhalb eines vorgegebenen Toleranzfeldes durchgeführt werden kann. Die anschließend erreichte gemittelte minimale Aufheizrate beträgt 0.63 K/min, bis das Werkzeug nach 245 Minuten vollständig auf 175 °C erwärmt wurde.

In einem Optimierungszyklus wird der in Abbildung 2 dargestellte Aufheizprozess als Referenz für die vergleichende Bewertung des Temperierprozesses gewählt.

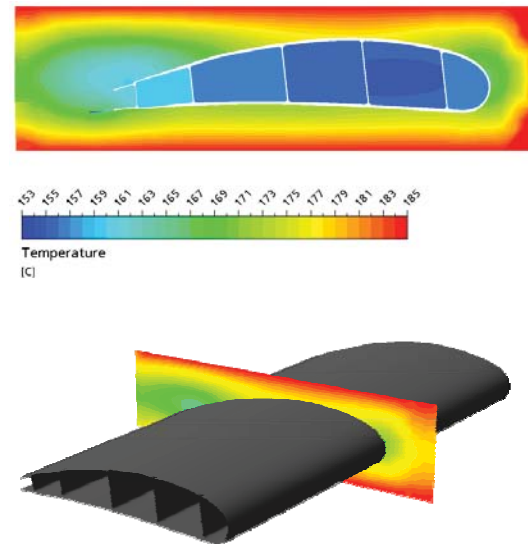


Abbildung 2: Darstellung des Temperaturprofils während der Aufheizphase des RTM Formwerkzeugs in einer elektrischen Heizpresse

Zur Quantifizierung einer im Werkzeug erreichten Homogenität des Prozesses wird das Profil durch die lokal abweichenden Aufheizkurven bewertet. Das Flächenintegral zwischen den Kurven wird hierbei als Maß für die vergleichende Betrachtung gewählt und dient damit in einer vergleichenden Betrachtung zur Beurteilung der erreichten Homogenität gegenüber des Referenzprozesses.

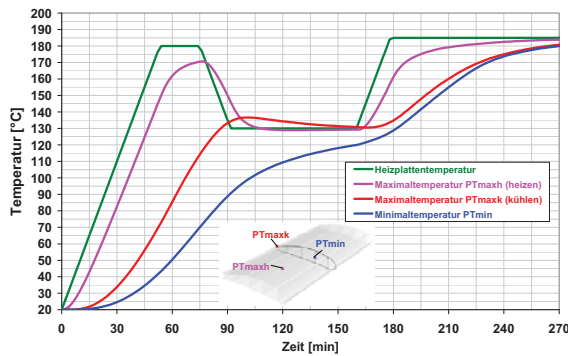


Diagramm 1: Temperaturverlauf im RTM Formwerkzeug an unterschiedlichen Positionen

Die autokatalytische Reaktionskinetik beschreibt den zeitabhängigen Reaktionsfortschritt bzw. Vernetzungsgrad in Abhängigkeit des Reaktionsfortschritts und der Temperatur. Mit zunehmender Temperatur entsteht ein Anstieg der Reaktionsrate. Die maximale Reaktionsrate entsteht bei konstanter Temperatur bei 45% Vernetzungsgrad. Die Reaktionsenthalpie (freigesetzte exotherme Reaktionswärme bei 100% Reaktionsfortschritt) des RTM6 Harzes wurde zu 446 J/g angenommen. Der Werkstoff wird hierbei mit einem Harzmassenanteil von 35 % betrachtet, die Kohlenstofffaser hat einen Anteil der Laminatmasse von 65%.

Annahmen zur Simulation:

- Heizpressen: Verlauf der zeitabhängigen Heizplattentemperatur wie im Diagramm angegeben
- Mit Thermalöl: Geschwindigkeit im Einlass 1 m/s, Gesamtmassenstrom = 3,19 kg/s, Einlasstemperatur = 200°C

(konstant), Dichte = 755 kg/s, $c_p = 2540 \text{ J/(kg K)}$, Wärmeleitfähigkeit = 0.121 W/(mK)

Unter Nutzung des beschriebenen Reaktionsverlaufs wird die Vernetzung an unterschiedlichen Bereichen des Werkzeuges in Abhängigkeit von der Temperaturkurve und Dauer des Wärmeeintrages ermittelt.

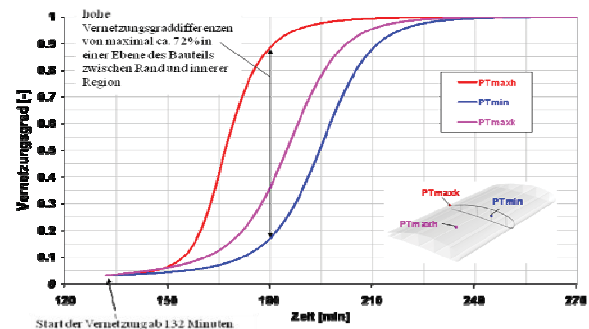


Diagramm 2: Entwickeltes Modell der Reaktionskinetik der RTM6 Polymerisation, veränderte Darstellung nach [3]

Die Auswirkung auf das lokal unterschiedliche Vernetzungsverhalten im Bauteil wurde in Diagramm 2 dargestellt. Zur Ermittlung wurde das reaktionskinetische Materialmodell für das verwendete Harzsystem genutzt und die Polymerisation auf der Grundlage von A.A. Skordos und I.K. Partridge beschrieben [3]. Die Vernetzungsgradverteilung bei Temperierung des Invar Werkzeuges mit einer Heizpresse weist lokal große Unterschiede auf. Eine maximale Differenz der Vernetzung im Werkzeug erfolgt nach 180 Minuten und es wird eine Dauer von etwa 30 min errechnet,

um im Holm einen ähnlichen Vernetzungsgrad zu erreichen.

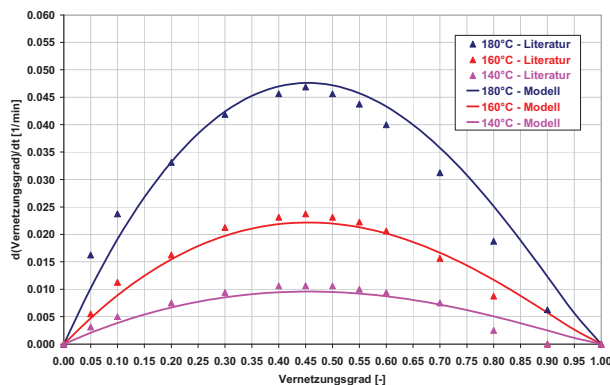


Diagramm 3: Reaktionskinetik des gewählten Harzsystems [3]

Die Nutzung einer kavitätsnahen Öltemperierung zur Beheizung des Formwerkzeuges ermöglicht eine Steuerung der 23 Temperierkanäle im Werkzeug, um einen angepassten Energieeintrag zu realisieren. Es erfolgt eine Regelung der Kanäle durch unterschiedliche Temperaturprofile der Heizflüssigkeit. Die Simulation basiert auf einer maximalen Heiztemperatur der Flüssigkeit von 250 °C, durch die an der Bauteiloberfläche gleichmäßig eine Temperatur von 180 °C erreicht werden soll. Zur Erwärmung der inneren Struktur wurde hierbei die Heizleistung in zweien der fünf Kerne realisiert, um die Holmbereiche erfassen zu können.

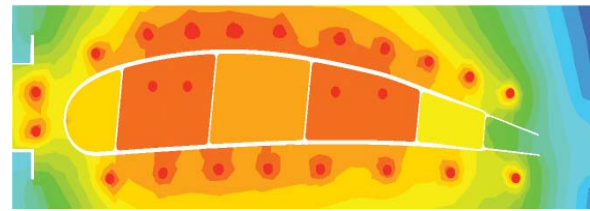


Abbildung 3: Simuliertes Aufheizverhalten des Formwerkzeuges (repräsentativer Querschnitt) mit Fluidheizung

Am Beispiel einer Sektion des Bauteils wird die Veränderung der Vernetzungseigenschaften durch die angepasste Temperierung ermittelt. Hierbei zeigt sich, dass der Verlauf der Vernetzung deutlich homogener gestaltet werden konnte, Abstände zwischen extremen Vernetzungsunterschieden vergrößert werden konnten und die Unterschiede deutlich reduziert wurden. Es werden zudem deutlich schneller höhere Temperaturen im Werkzeug erreicht. Die Erwärmung der Leading Edge Sektion stellt auf Grund der erforderlichen Werkzeuggestaltung eine besondere Herausforderung dar.

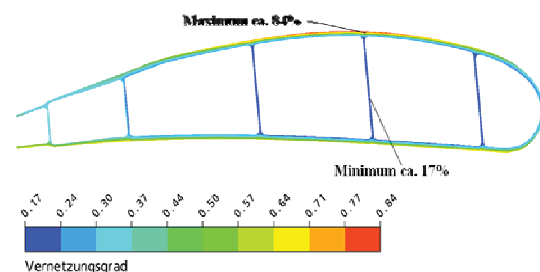


Abbildung 4: Ermittelter Vernetzungsgrad bei der Aushärtung der Vielholmerstruktur im RTM Formwerkzeug aus Invar (Pressenheizung)

Der Kern ist relativ komplex gestaltet und auf Grund der Führung von Dichtungen und Anschlüssen ist eine Temperierung aufwändig. Der untere Bereich ist für eine effektive Fluidströmung zu filigran, so dass hierbei die Aufheizung durch Konvektion erfolgen muss. Bei der weiteren Werkzeuggestaltung wurde darauf geachtet, dass in Bereichen mit Injektionsnuten die erreichte Werkzeugtemperatur mit einem geringeren Gradienten ansteigt. Dadurch wird gewährleistet, dass die Aushärtung in diesen Bereichen etwas später einsetzt, wodurch der Harzschrumpfung im Formwerkzeug durch nachströmendes Harz im Bauteil nicht zu geometrischen Abweichungen führt.

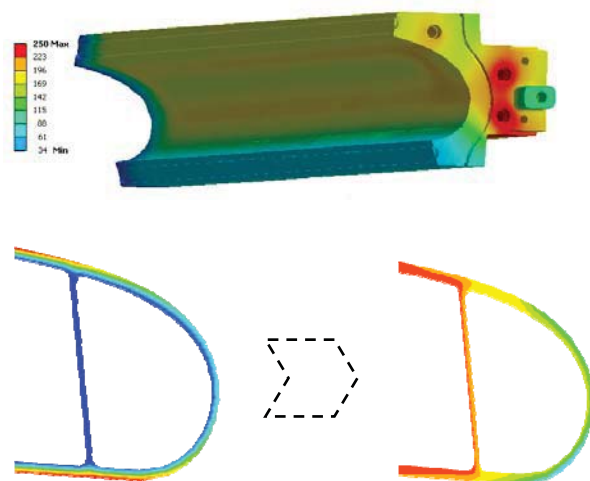


Abbildung 5: Verbessertes Temperaturprofil im Kern der Vorderkantensektion (oben); Vernetzung bei Erwärmung des Werkzeuges in einer Heizpresse (links) und Vernetzung bei Erwärmung des Werkzeuges mittels kavitätsnaher Temperierung (rechts)

Zusammenfassung

Neben Ansätzen, die eine Optimierung der Anordnung von Heizkanälen unter verschiedenen Prämissen ermöglichen ist für den Bereich der CFK-Fertigung in der Regel einen möglichst kurzen Fertigungszyklus und eine hohe Bauteilqualität durch eine kontrollierte Temperaturverteilung zu erreichen. Die Nutzung einer Flüssigkeitstemperierung ermöglicht ein hohes Maß an Freiheitsgraden zur Beeinflussung der Temperaturführung an der Bauteiloberfläche, so dass der Temperierprozess in hohem Maße regulierbar wird. Die isolierende Wirkung des Faserpreform führt zu Temperaturgradienten im Werkzeug, welche einen homogenen Heizprozess besonders bei integralen Strukturen schwierig gestalten.

Das erarbeitete Werkzeugkonzept mit der Möglichkeit unterschiedliche Sektionen mit einem definierten Wärmestrom zu versorgen und damit Konvektionswege deutlich zu reduzieren bietet ein erhebliches Potenzial zur Reduzierung der Temperierzeiten.

Unterschiedliche Ansätze lassen sich noch weiter untersuchen, um einen effizienten Fertigungsprozess gestalten zu können. Ein Ansatz, der weiter untersucht wird ist die Verwendung Verlorener Kerne. Hierbei ergibt sich das Potenzial zur Verbesserung des Aufheizprozesses durch eine tolerierte Inhomogenität. Die geringe Wärmeleitung und damit Wärmesenke im Vergleich mit metallischen Kernen wird deutlich reduziert. Neben

finanziellen und fertigungstechnischen Aspekten bietet diese Alternative damit technologisches Potenzial, welches weiter untersucht wird.

Zusätzlich wird ein Formwerkzeug entwickelt, welches eine weiterführende

Flüssigkeitstemperierung zulässt. In einer Art Matrix, welche sich über das komplette Formwerkzeug verteilt werden 120 separate Heizsektionen geschaffen, um den Temperaturverlauf und das Werkstoffverhalten bei der Produktion definiert beeinflussen und im Detail untersuchen zu können.

[1] Michaud D, Beris A, Dhurjati P. Curing behavior of thick-sectioned RTM composites. J Comps Mater 1998;32(14):1273–95.

[2] Numerical analysis of cure temperature and internal stresses in thin and thick RTM parts - Edu Ruiz*, Francois Trochu

[3] A.A. Skordos, I.K. Partridge: Cure Kinetics Modeling of Epoxy Resins Using a non-Parametric Numerical Procedure, Polymer Engineering and Science, May 2001, Vol. 41, No.5