

# Modelling of thermal aspects in liquid composite moulding for industrial applications

**Doctoral Thesis**

**Author(s):**

Henne, Markus

**Publication date:**

2003

**Permanent link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-004619872>

**Rights / license:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#)

DISS. ETH Nr. 15157

**Modelling of Thermal Aspects in Liquid Composite Moulding for  
Industrial Applications**

ABHANDLUNG

Zur Erlangung der Titels

DOKTOR DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN

der

EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZÜRICH

vorgelegt von

MARKUS HENNE

Dipl. Masch. Ing., ETH  
geboren am 10.Mai 1972

von

Schaffhausen (SH) und Sargans (SG)

Angenommen auf Antrag von

Prof. Dr. Paolo Ermanni  
Prof. Dr. Patricia Krawczak

2003

## **Abstract**

Fibre-reinforced polymer composites chiefly consist of glass, carbon or aramide fibres embedded in a polymer matrix. Continuously fibre-reinforced composites with the fibres oriented in line with the principal stress are characterised by optimum strength and rigidity per unit weight, for use in heavily loaded primary structures.

Composite components can be manufactured by various processes; for structural components for example, the resin injection process known as Resin Transfer Molding (RTM) is gaining in importance. The automotive industry in particular uses RTM because of its low cost, and the process will be applied to an increasing extent in aircraft manufacturing in future. In the RTM process fibre preforms are placed in a mould into which a reactive resin is injected, impregnating the preforms and then curing. This manufacturing process makes it possible to produce complex, highly integrated structural components.

Numerical simulation methods are increasingly being used to optimise the production process, reducing the time to market, the costs and the production risk. It is possible to simulate all process stages such as heating of the fibres, resin injection, and resin curing. The state of the art is such that the process is modelled isothermally by a simplified method without taking into account the chemical reactions, since the quality and complexity of the available material models does not justify the expense of a more elaborate thermal simulation.

To shorten the cycle time of the production process, highly reactive resin systems are used that significantly reduce the curing time, which accounts for the bulk of the cycle time. In rapid curing resin systems the individual process stages of impregnating the preforms and curing the polymer can no longer be separated, because the resin starts to cure during the injection process. The viscosity of the resin increases rapidly as curing advances, making it essential to inject quickly enough to fill the mould before the increasing viscosity stops the flow. There are various ways of speeding up injection, for example by using manifolds and by sequential injection from several injection points.

In these accelerated processes thermal effects become more important because the majority of the material variables and thus the progression of the process are affected by the temperature. Thus temperature has to be taken into account in the material models for the resin systems; and furthermore the exchange of heat between the mould and the

cavity, the heat transport effects in the cavity, and the heat build-up generated by exothermic cross-linking all play a decisive role. The currently available models for simulating the chemical reactions and viscosity are complex and are not easily validated for the resin systems of interest; therefore they are not yet used for industrial process optimisation.

Because of this weakness, new material models for rapid curing epoxy resins were developed in the present work that can be readily validated using analytically evaluated data, thus permitting their application in routine product development.

Models were developed that satisfy the physical and chemical boundary conditions, allowing them to be used with advantage in optimising the RTM process.

Experimental investigations into transverse heat transport in porous fibre beds have resulted in a new analytical heat transport model that is ideally suited for implementation in a process simulation program. The model was developed for glass and carbon fibre reinforced non-crimped fabrics. There was good agreement between the model and the experimental results.

The new material models were incorporated into a commercial software program based on the finite element method. The program was used to simulate the process of manufacturing a carbon fibre reinforced automotive component, and the results confirmed the accuracy of the new models and demonstrated their suitability for industrial use.

The new models permit the quantitative prediction of the progress of the process.

This work thus makes it possible for the first time to use numerical simulation to make a decisive contribution to optimising the resin transfer moulding process with rapid curing resin systems.

## **Zusammenfassung**

Faserverstärkte Kunststoffe bestehen vorwiegend aus Glas-, Kohlenstoff- oder Aramidfasern, welche in einer Polymermatrix eingebettet sind.

Kraftflussgerecht orientierte kontinuierlich faserverstärkte Verbundwerkstoffe zeichnen sich durch optimale gewichtsspezifische Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften für den Einsatz in hochbelasteten Primärstrukturen aus.

Verbundkunststoffbauteile können mit verschiedenen Prozessen hergestellt werden, wobei für strukturelle Bauteile unter anderem der Harzinjektionsprozess „Resin Transfer Moulding (RTM)“ zunehmend an Bedeutung gewinnt. Vor allem im Automobil- und in Zukunft auch vermehrt im Flugzeugbau werden aus Kostengründen Harzinjektionsprozesse angewendet. Im RTM Prozess werden vorgeformte Faserhalbzeuge in ein Werkzeug eingelegt und durch Injektion mit einem reaktiven Harz imprägniert und ausgehärtet. Dieses Herstellverfahren erlaubt es, komplexe, hochintegrierte, strukturelle Bauteile herzustellen.

Für die Optimierung des Herstellungsprozesses werden in zunehmendem Masse numerische Methoden angewendet, welche es erlauben, die Entwicklungszeit, die Kosten und das Produktionsrisiko zu senken. Es besteht die Möglichkeit alle Prozessschritte, wie das Aufwärmen der Fasern, die Harzinjektion und die Aushärtung des Harzes zu simulieren. Stand der Technik ist es, den Prozess vereinfacht isotherm ohne Berücksichtigung der chemischen Reaktionen zu modellieren, da die Qualität und Komplexität der aktuell verfügbaren Materialmodelle den Aufwand einer aufwendigeren thermischen Simulation nicht rechtfertigen.

Um die Zykluszeit des Herstellungsprozesses zu senken, werden hochreaktive Harzsysteme eingesetzt, welche die Aushärtungszeit, die den grössten Anteil an der Zykluszeit ausmacht, deutlich reduzieren. Bei hochreaktiven Systemen lassen sich die einzelnen Prozessschritte, wie die Imprägnation der vorgeformten Faserhalbzeuge und die Aushärtung des Polymers, nicht mehr trennen. D.h. das Harz beginnt sich bereits während der Injektion zu vernetzen, was sich in einem deutlichen Anstieg der Viskosität des Harzes manifestiert. Dies bedingt, dass der Injektionsvorgang abgeschlossen sein muss, bevor der Harzfluss aufgrund der ansteigenden Viskosität gestoppt wird. Die Injektion kann durch verschiedene Massnahmen beschleunigt werden, z.B. durch Verteilerkanäle und sequentielle Injektion über mehrere Injektionspunkte.

Bei stark beschleunigten Prozessen gewinnen die thermischen Effekte zunehmend an Bedeutung, weil die Mehrzahl der Werkstoffgrößen und somit der Prozessverlauf von der Wärmeeinwirkung beeinflusst wird. Abgesehen von den Materialmodellen für die Harzsysteme, spielt der Wärmeaustausch zwischen dem Werkzeug und der Kavität, Wärmetransporteffekte in der Kavität und die Wärmeentwicklung durch die exotherme Vernetzung eine entscheidende Rolle. Die heutigen Modelle, welche in der Prozesssimulation für die Modellierung der chemischen Reaktion und der Viskosität existieren sind komplex, lassen sich kaum für die gegebenen Harzsysteme validieren und werden darum noch nicht zur Prozessoptimierung im industriellen Umfeld eingesetzt.

Aufgrund dieser Tatsache wurden in der vorliegenden Arbeit neue Materialmodelle für schnell aushärtende Epoxidharze entwickelt, welche durch geringen Aufwand mit analytisch ermittelten Daten für neue Harzsysteme validiert werden können und so eine Anwendung für die Produktentwicklung im täglichen Geschäft erlauben.

Es wurden Modelle entwickelt, die die physikalischen und chemischen Randbedingungen erfüllen und die somit zur Optimierung des RTM-Prozessfensters vorteilhaft eingesetzt werden.

Experimentelle Untersuchungen über den transversalen Wärmetransport in porösen Faserhalbzeugen führen zu einem neuen analytischen Wärmetransportmodell, welches sich für die Implementierung in ein Prozesssimulationsprogramm ausgezeichnet eignet. Das Modell wurde für glas- und kohlenstofffaserverstärkte Gelege entwickelt.

Der Beweis hinsichtlich der Übereinstimmung Modell zu Experiment wurde erfolgreich erbracht.

Die neuen Materialmodelle wurden in ein kommerzielles, auf der Finite Element Methode basierendes, Software Programm eingebaut. Die Simulation zeigt die Leistungsfähigkeit und Industrietauglichkeit der neuen Modelle und beweist anhand eines experimentellen Vergleiches an einem kohlenstofffaserverstärkten Bauteil aus dem Automobilbereich das Potential der Modelle:

Durch die neuen Modelle sind quantitative Aussagen über den Prozessverlauf möglich! Somit ist es erstmals möglich durch die Simulation einen entscheidenden Beitrag zur virtuellen Optimierung des Resin Transfer Moulding Prozesses mit schnellen Harzsystemen zu leisten.