

Resin Transfer Moulding – Teil 1

# Massnahmen zur Reduktion der Formfüllzeit

**Durch gezielte Massnahmen ist es dem IWK gelungen, die Formfüllzeit bei RTM-Prozessen zu reduzieren. Zur Zykluszeitverkürzung trägt hauptsächlich die Verwendung hochpermeabler Verstärkungsmaterialien und hochreaktiver, niedrigviskoser Harzsysteme bei, aber auch die korrekte Werkzeugauslegung und eine optimierte Prozessführung.**

**Wilfried Bürzle und Prof. Dr. Markus Henne,**  
Institut für Werkstofftechnik und Kunststoffverarbeitung (IWK), Hochschule für Technik, CH-8640 Rapperswil

Der Resin Transfer Moulding (RTM) Prozess ist ein Herstellungsverfahren für hochbeanspruchte und qualitativ hochwertige, faserverstärkte Kunststoffstrukturen. Bei diesem Prozess handelt es sich um ein Harzinjektionsverfahren, bei dem trockene Faserstrukturen in einem geschlossenen Werkzeug mit einem Harz/Härter-Gemisch getränkt und unter Druck und Temperatur ausgehärtet werden.

Der Prozessablauf ist schematisch in Abbildung 1 ersichtlich. Die textile Faserstruktur wird zugeschnitten, mit einem thermoplastischen Binder versehen und danach erwärmt. Diese weiche Matte wird anschliessend in einem Werkzeug umgeformt, gekühlt und der so entstandene Vorformling ausgestossen. Nach allfälligen Nacharbeiten wird der Rohling in das aufgeheizte Injektionswerkzeug eingelegt. Anschliessend wird in die geschlossene Werkzeugkavität das Harz/Härter-Gemisch in die trockenen Fasern injiziert und die Aushärtung

beginnt. Ist das Bauteil genügend fest, kann es entformt werden. Abschliessend findet eine Temperung statt, bei der das Bauteil seine endgültige Festigkeit erreicht. [1]

Mit der heutigen Technik beträgt die Zykluszeit für RTM-Bauteile typischerweise etwa 40 Minuten. Davon werden für die Formfüllung und die Aushärtung etwa 65% der Zeit beansprucht. Diese hohe Zykluszeit und die komplexe Werkzeugauslegung sowie Prozessführung bedingen, dass die Technik bis heute industriell nur vereinzelt eingesetzt wird.

Durch gezielte Massnahmen zur Prozessbeschleunigung lässt sich die Zykluszeit auf unter 10 Minuten senken. Lösungsansätze zur Prozessbeschleunigung sind neben dem Einsatz hochpermeabler Faserstrukturen und hochreaktiver Harzsysteme auch die Verwendung einer geeigneten Werkzeugtechnik und einer optimierten Prozessführung. All diese Aspekte werden im Folgenden detailliert erläutert.

## Faserstruktur

Die primäre Aufgabe der Faserstruktur ist es, im fertigen Bauteil die Beanspruchung aufzunehmen. Je nach Anforderung werden hierzu hauptsächlich Glas-, Kohle- und Aramidfasern verwendet. Mitunter entscheidend für die mechanischen Eigenschaften des Bauteils ist die textile Struktur der Fasern. Diese kann aber auch Einfluss auf die Verarbeitbarkeit haben. Verwendung finden hauptsächlich Gewebe, Gelege und Faser-matten. Für hochbeanspruchte und qualitativ hochwertige Bauteile besteht die Möglichkeit, die Fasern in einem textiltechnischen Prozess direkt in der richtigen Geometrie zu flechten, stricken oder weben.

## Gewebe

- In RTM-Technik am häufigsten verwendet
- Webart beeinflusst die mechanischen Eigenschaften und die Drapierbarkeit

## Gelege

- Faserrovings schichtweise in gewünschter Orientierung abgelegt
- Keine ondulierten Faserbündel, sehr gute mechanische Eigenschaften

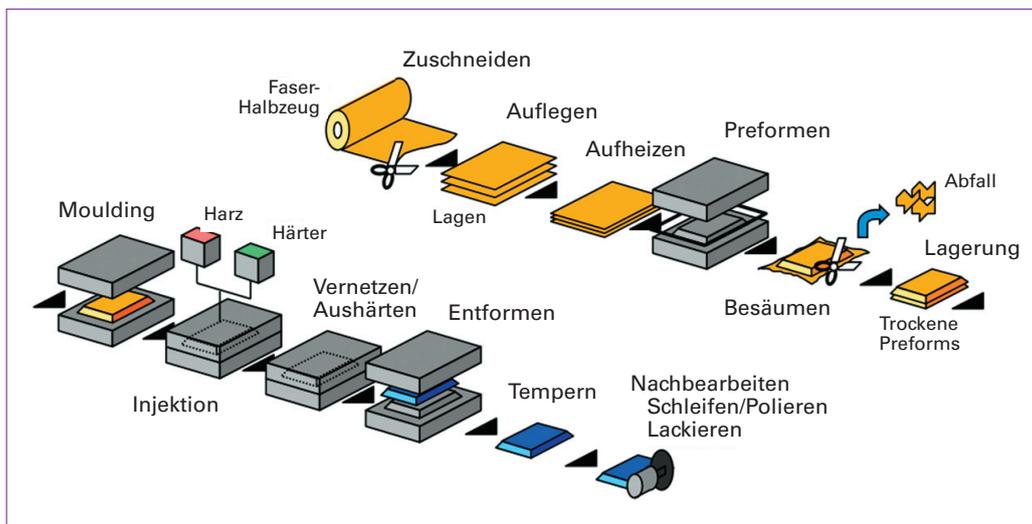
## Fasermatten

- Verwendung bei niedrig beanspruchten Bauteilen mit beschränkter Verstärkungswirkung

## Permeabilität der Faserstruktur

Neben den mechanischen Eigenschaften ist für die Harzinjektionsprozesse eine weitere Eigenschaft von Bedeutung: die Permeabilität. Diese beschreibt die Durchlässigkeit der Faserstruktur gegenüber einem durchströmenden Fluid. Sie ist abhängig von:

**Abbildung 1:**  
RTM-Prozessablauf.



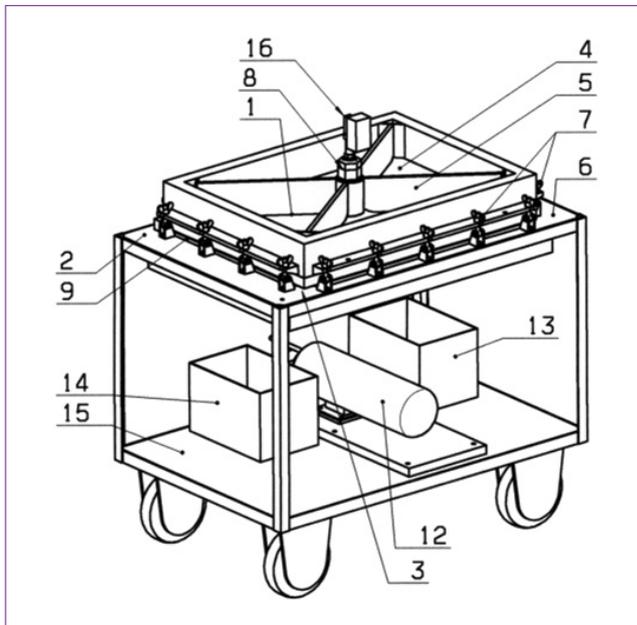


Abbildung 2: Permeabilitätsmesswerkzeug.

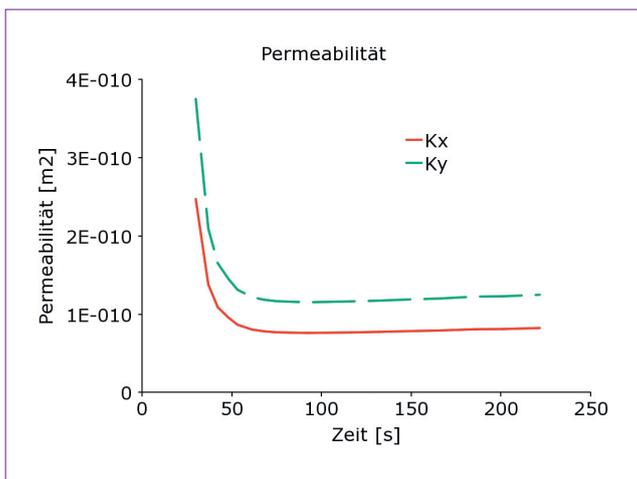


Abbildung 3: Verlauf der Permeabilität.

- Art und Aufbau der Textilien
- Faserwerkstoff
- Schlichte und Haftvermittler auf den Fasern
- Oberflächenspannung der Fasern

Für die praktische Anwendung hat ebenfalls der Faservolumengehalt einen entscheidenden Einfluss auf die Durchlässigkeit.

Bei geringen Injektionsdrücken ist die Permeabilität stark von Kapillareffekten überlagert. Dies bedeutet, dass die Fließfront schneller voranschreitet als angenommen. Des Weiteren ist die Permeabilität richtungsabhängig. Entsprechend den Hauptfließrichtungen entsteht

eine Ellipse analog zu den zwei Hauptachsen oder das Harz bildet sich kreisförmig aus.

Die Permeabilität kann entweder experimentell oder rechnerisch ermittelt werden. Die rechnerischen Ansätze sind jedoch aufgrund der erreichbaren Genauigkeit bis heute für die praktische Anwendung ungeeignet. Die experimentelle Bestimmung hingegen benötigt eine geeignete und exakt kalibrierte Messvorrichtung und Messdatenerfassung.

**Permeabilitätsmessungen**

Bei der experimentellen Bestimmung der Permeabilität wird der Fließfrontfortschritt beobachtet. Dabei wird zwischen eindimensionaler und zweidimensionaler Strömung des Fluids unterschieden. Bei den Messungen müssen zu verschiedenen Zeitpunkten die Position der Fließfront sowie der dazugehörige Injektionsdruck bekannt sein.

Untersuchungen zeigen, dass mit der zweidimensionalen Messung nicht nur die Anzahl Messungen reduziert wird, sondern auch die Messgenauigkeit zunimmt.

Die Permeabilitätsmessungen, die im Zusammenhang mit dieser Arbeit erstellt wurden, sind mit einer zweidimensionalen Strömung durchgeführt worden. Der Versuchsaufbau, die Durchführung und die Auswertung werden deshalb nachfolgend kurz erläutert.

Der Messaufbau (Abb. 2) besteht aus einem ebenen Werkzeug mit einer Stahlplatte<sup>2</sup> als unteres und einer Panzerglasplatte<sup>4</sup> als oberes Werkzeug. Die Kavitätshöhe kann über Distanzleisten<sup>9</sup> eingestellt werden. Bei dieser Messmethode wird die Testflüssigkeit, beispielsweise Glycerin, zentral in die Faserstruktur injiziert. Je nach Architektur der Fasern bildet sich die Flüssigkeit kreisförmig oder elliptisch aus.

Durch Längenmarkierungen auf der Glasplatte, einer Druckanzeige und einer Stoppuhr werden die relevanten Messdaten aufgezeichnet. Mittels mathematischen Umrechnungen [2] können die Permeabilitätswerte bestimmt werden.

**Resultate der Permeabilitätsmessungen**

Auf ihre Permeabilität wurden vier unterschiedliche Glasfaserstrukturen untersucht. Unten aufgeführt sind die Materialbezeichnungen sowie die aus den Messungen resultierenden Permeabilitätswerte.

Die Auswertung der Messungen zeigt einen zeitlichen Verlauf der Permeabilität, wie in Abbildung 3 am Beispiel des triaxial-Glasgeleges ersichtlich ist.

**Diskussion der Messresultate**

Die Beobachtungen während den Messungen zeigten, dass der Fließfrontverlauf in die drei Formen isotrop, orthotrop und rosettenförmig eingeteilt werden kann. Abbildung 5 veranschaulicht diese Fließfrontformen.

Wie den ermittelten Permeabilitätswerten entnommen werden kann, ist die Durchlässigkeit der Faserstruktur stark unterschiedlich. Die Formel von Kozeny und Carman (1) zeigt, dass die Permeabilität stark vom Faservolumengehalt abhängig ist [3].

$$K = \frac{R^2}{4c} \cdot \frac{(1-\phi)^3}{\phi^2} \quad (1)$$

φ: Faservolumengehalt

R: Faserradius

c: Kozeny-Konstante

| Hersteller / Bezeichnung / Spezifikationen                     | Faservolumengehalt [%] | Permeabilitätswerte              |                                  |
|--|------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
|  |                        | K <sub>x</sub> [m <sup>2</sup> ] | K <sub>y</sub> [m <sup>2</sup> ] |
| St. Gobain vetrotex, Unifilo Glasmatte, 450 g/m <sup>2</sup>   | 14                     | 1.19E-09                         | 1.08E-09                         |
| Swiss-Composite, Glasgewebe Köper, 390 g/m <sup>2</sup>        | 38                     | 3.49E-11                         | 2.97E-11                         |
| Selcom, triaxial- Glasgelege, 45/90/-45, 978 g/m <sup>2</sup>  | 45                     | 1.05E-11                         | 1.58E-11                         |
| Saertex, Bi-direktional Glasgelege, 0/90, 845 g/m <sup>2</sup> | 49                     | 2.11E-11                         | 2.05E-11                         |

Tabelle 1: Prüfmateriale und Messresultate.

Der Zusammenhang aus der Formel von Kozeny und Carman kann auch verwendet werden, um einen gemessenen Permeabilitätswert bei einem bestimmten Faservolumengehalt umzurechnen auf eine neue Permeabilität bei einem gewünschten Faservolumengehalt. Dies wird in Formel (2) dargestellt.

$$K^* = \frac{K_0 \cdot \varphi_0^2 \cdot (1-\varphi)^3}{(1-\varphi_0)^3 \cdot \varphi^2} \quad (2)$$

$K_0$ : Gemessener Permeabilitätswert  
 $\varphi_0$ : Faservolumengehalt bei der Messung  
 $K^*$ : Neuer Permeabilitätswert  
 $\varphi$ : Gewünschter Faservolumengehalt

Bei der Betrachtung von Abbildung 3 fällt sofort die ausgeprägte Zeitabhängigkeit der Permeabilität auf. Dem Leser mag sich an dieser Stelle die Frage stellen, welche Effekte dieses Verhalten hervorrufen und welcher Wert als Permeabilität angegeben wird.

Bei dem zeitlichen Verlauf ist zwischen ungesättigter Permeabilität am Anfang und gesättigter Permeabilität im Bereich der konstanten Werte zu unterscheiden. Am Anfang der Messung strömt das Fluid durch die trockenen Fasern. Der Fließfrontverlauf ist stark von Kapillareffekten überlagert, weshalb die Faserstruktur eine höhere Permeabilität aufweist. Je länger die Messung dauert, umso mehr Fluid muss durch die bereits getränkten

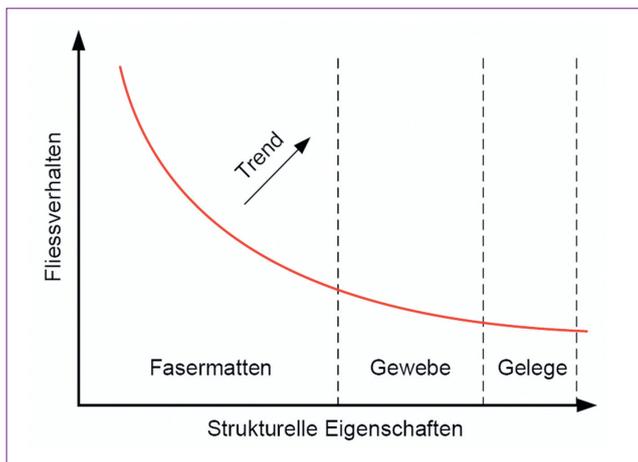


Abbildung 4: Vergleich der Eigenschaften.

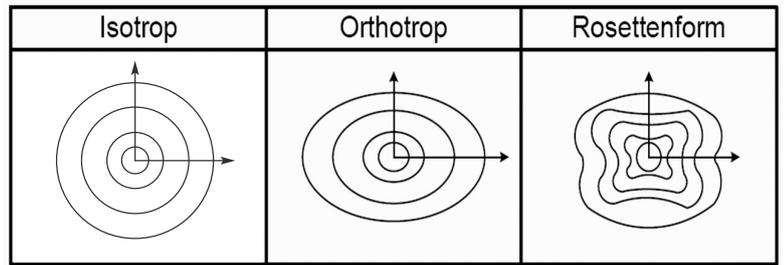


Abbildung 5: Fließfrontformen.

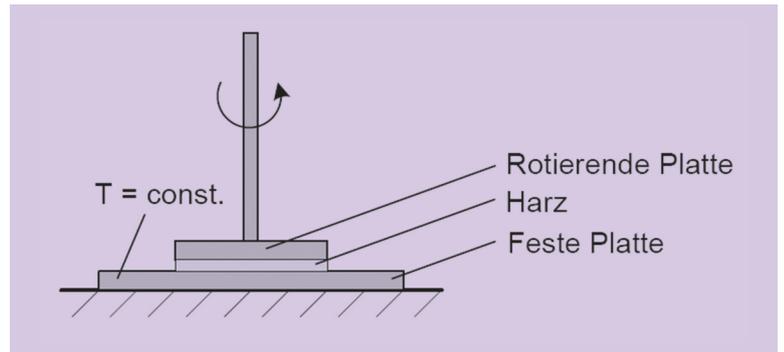


Abbildung 6: Aufbau eines Plattenrheometers.

Fasern nachgedrückt werden. Aus diesem Grund sinkt die Permeabilität. Wird eine Faserstruktur mit einem Permeabilitätswert charakterisiert, so gibt man den Mittelwert der gesättigten Permeabilität an.

Bei der Auswahl der Faserstruktur stehen in erster Linie die mechanischen Eigenschaften im Vordergrund. Bei den Harzinjektionsprozessen sollte jedoch auch auf die Verarbeitbarkeit der Faserstrukturen geachtet werden. Es ist dabei ein Kompromiss zwischen dem Fließverhalten und den strukturellen Eigenschaften der Faser zu wählen, wie in Abbildung 4 ersichtlich ist.

**Matrixsysteme**

Die Matrix hat die Aufgabe, die lasttragenden Fasern miteinander zu verbinden und zusammenzuhalten. Aus diesem Zusammenhang lässt sich schnell erkennen, dass sowohl Eigenschaften wie die Benetzbarkeit, sprich die Haftung der Matrix an der Faser, als auch die mechanischen Eigenschaften der Matrix von grösster Bedeutung sind. Den Anforderungen an RTM-Matrixsysteme werden aufgrund ihres speziellen Verarbeitungszwecks bis heute ausschliesslich Duomere gerecht. Am häufigsten werden für die RTM-Prozesse Epoxide, Polyester und Vinylester verwendet.

*Epoxide*

- Geringe Reaktionsschwindigkeit
- Gute mechanische Eigenschaften

*Polyester*

- Einfache Handhabung und geringer Preis, darum am häufigsten verwendet
- Geringe mechanische Eigenschaften

*Vinylester*

- Allgemein bessere mechanische Eigenschaften als Polyester
- Gute Chemikalien- und Wasserbeständigkeit

**Anforderungen an RTM-Matrixsysteme**

Für die Anwendung in den Harzinjektionsprozessen werden spezielle Anforderungen an das Matrixsystem gestellt. Hinsichtlich der Reduktion der Formfüllzeit ist vor allem die Verarbeitungs- und Aushärtungscharakteristik von Interesse.

*Dynamische Viskosität*

Die vollständige Imprägnierung der Faserstruktur im Matrixwerkstoff ist Voraussetzung für eine hohe Bauteilqualität. Dabei ist die Viskosität des Harz/Härter-Gemisches ein entscheidender Punkt, deren Bedeutung mit steigendem Faservolumengehalt zunimmt. Eine vollständige Imprägnierung kann nur mit sehr niedrigviskosen Systemen gewährleistet werden.

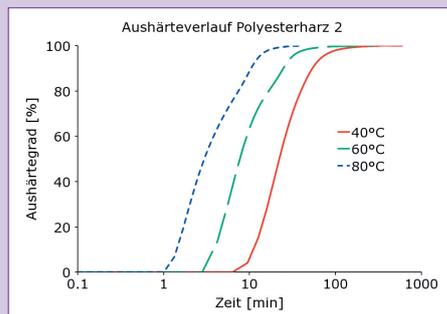
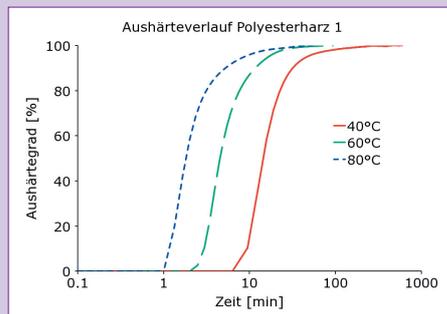
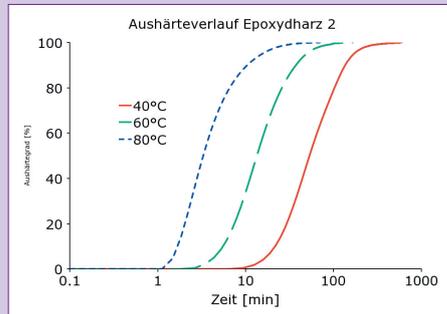
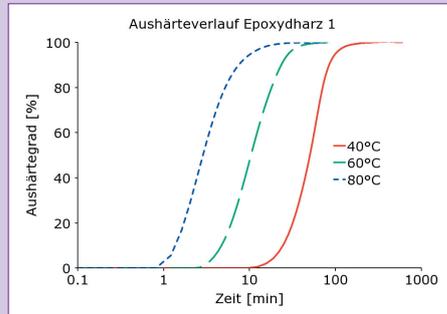
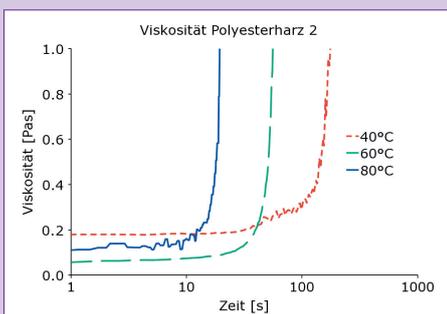
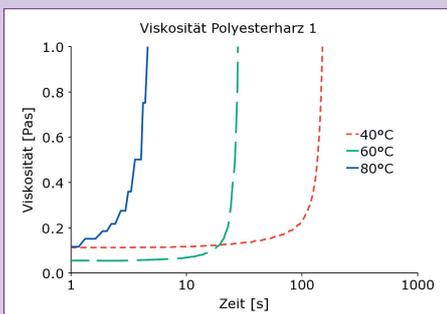
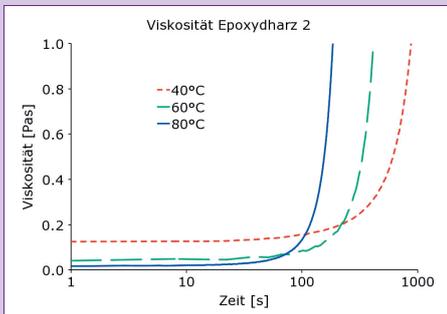
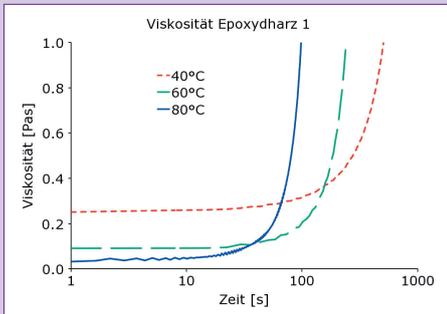


Abbildung 7: Temperaturabhängige Viskositätsverläufe.

Abbildung 8: Aushärtungsverläufe.

Zur Messung der Viskosität eignen sich vor allem Plattenrheometer. Diese bestehen aus einer unteren, festen und einer oberen, rotierenden Platte (Abb. 6). Die Temperatur der unteren Platte kann definiert werden. Zur Messung wird das im Eisbad gemischte Harz/Härter-Gemisch zwischen den Platten aufgebracht. Gemessen wird das notwendige Drehmoment, damit die gewählte Schergeschwindigkeit aufrechterhalten bleibt. Mit den auf-

Tabelle 2: Untersuchte Matrixsysteme.

tretenen Schubspannungen und der Schergeschwindigkeit kann anschließend der zeitabhängige Verlauf der Viskosität aufgezeichnet werden.

*Aushärtungscharakteristik*

Ein ideales Harz für die RTM-Prozesse hat während der Injektion eine konstant niedrige Viskosität. Sobald die Injektion abgeschlossen ist, sollte das Harz schlagartig gelieren und aushärten. In der Praxis zeigen die Harze ei-

nen mehr oder weniger sanften Übergang zwischen flüssiger Phase und geliertem Zustand. Dieser Umschlagspunkt wird von den Herstellern als Gelzeit bzw. Topfzeit angegeben und bezeichnet die zur Verfügung stehende Verarbeitungszeit.

Für die Messung des Aushärtungsverlaufes wird die so genannte Differential Scanning Calorimetry (DSC) verwendet. Dabei wird die Differenz der Wärmeströme vom Ofen zur Probe und vom Ofen zur Referenzprobe als Funktion der Temperatur und der Zeit gemessen. Die DSC ist eine quantitative Methode zur Messung von Wärmeeffekten (Enthalpien). Aus den Resultaten lässt sich der Aushärtegrad in Funktion der Zeit bestimmen.

*Reaktionsschwindigkeit*

Alle duromeren Matrixsysteme haben gemein, dass ihr Volumen während der Vernetzungsreaktion abnimmt. Dies wird als Reaktionsschwindung bezeichnet. Als Folge davon können flächige Einfallstellen an der Oberfläche entstehen, was zu einer minderen Bauteilqualität und Schwankungen in der Wandstärke führt. Die Reaktionsschwindung von RTM-Harzen sollte möglichst klein sein. Durch eine einseitige Injektion ist ein Nachfordern von Harz in Bereiche, die nicht in der Nähe des Injektionspunktes liegen, praktisch verhindert.

**Resultate der Harzanalysen**

Die Untersuchungen zum viskosen Verhalten und zum Aushärtungsverlauf der Harze wurden an vier unterschiedlichen Systemen durchgeführt (Tabelle 2).

Die rheologischen Analysen wurden bei 40°C, 60°C und 80°C durchgeführt. Die Resultate der rheologischen Messungen sind in den Abbildungen 7 und 8 aufgeführt.

Den Viskositätsverläufen ist zu entnehmen, dass die Anfangsviskosität bei zunehmenden Temperaturen abnimmt, sprich das Harz wird dünnflüssiger. Gleichzeitig ist aber zu beachten, dass die Viskosität bei höheren Temperaturen deutlich früher ansteigt.

| Bezeichnung / Benennung  | Hersteller / Lieferant |
|--|------------------------|
| Epoxidharz 1: Araldite LY 564 mit Härter XB 3458                   | Huntsman               |
| Epoxidharz 2: Harz Typ L1000 mit Härter EPH 295                    | Swiss- Composite       |
| Polyesterharz 1: Gremopal 136.10 mit Härter Luperox K1             | Gremolith AG           |
| Polyesterharz 2: Crystic 196 LV, vorbeschleunigt mit Härter MEK 50 | Walter Mäder AG        |

Zur Bestimmung des zeitabhängigen Aushärtungsverlaufs des Harz/Härter-Gemisches wurden isotherme DSC-Analysen durchgeführt.

Zusätzlich wurden zu jedem Matrixsystem dynamische DSC-Messungen mit einer Heizrate von 3°C/min durchgeführt (Abb. 9).

**Diskussion der Messresultate**

Die Messresultate belegen die starke Temperaturabhängigkeit des Aushär-

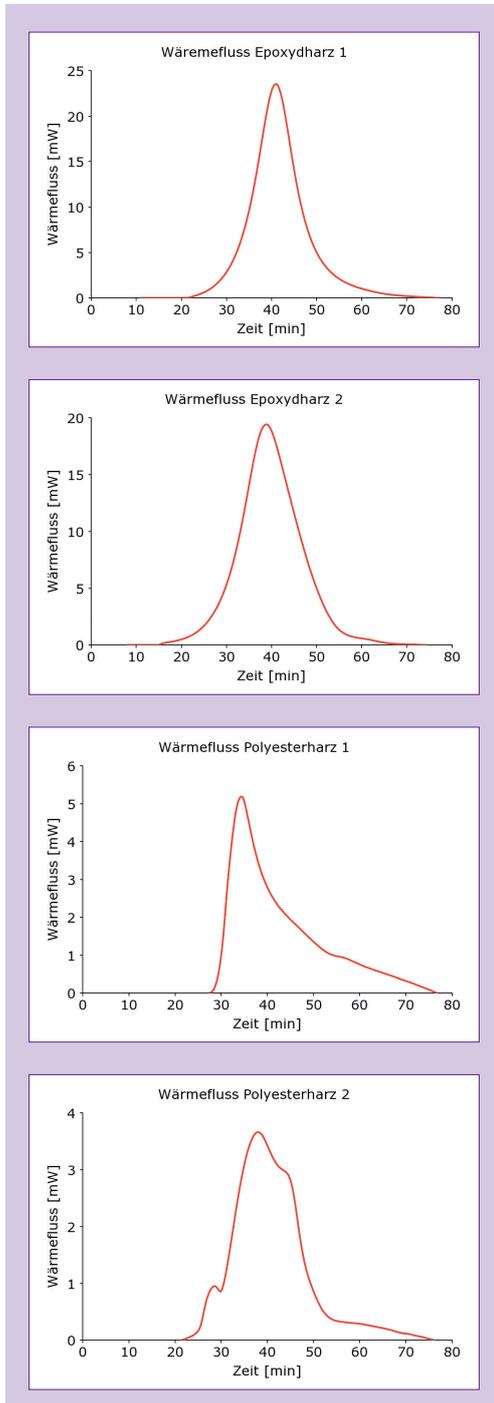


Abbildung 9: Zeitabhängige Wärmeflüsse.

Abbildung 10: Einflüsse auf die Viskosität.

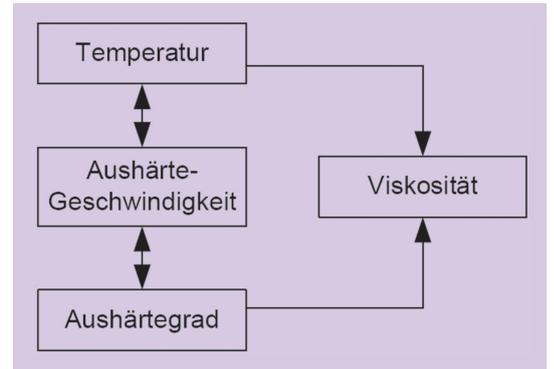


Tabelle 3: Ermittelte Gelzeiten.

| Matrixsystem    | Gelzeit / Topfzeit [min] |      |      |
|-----------------|--------------------------|------|------|
|                 | 40°C                     | 60°C | 80°C |
| Epoxydharz 1    | 16                       | 3.5  | ≈ 1  |
| Epoxydharz 2    | 13                       | 3    | 1.5  |
| Polyesterharz 1 | 8                        | 2.5  | < 1  |
| Polyesterharz 2 | 9                        | 3    | < 1  |

tungsverlaufs und der Viskosität. Mit steigenden Temperaturen wird das Harz/Härter-Gemisch zunehmend dünnflüssiger und die Aushärtung beginnt wesentlich früher und verläuft schneller.

Die Abnahme der Viskosität bei hohen Temperaturen begünstigt die Injektion. Der notwendige Injektionsdruck nimmt dadurch ab bzw. kann bei gleichem Injektionsdruck einen höheren Fließweg erreichen. Zu beachten ist, dass bei einer Viskosität von 1 Pas der Füllstopp eintritt. Dies bedeutet, dass danach kein Harz mehr nachgefördert werden kann. Der Viskositätsverlauf ist also massgebend zur Bestimmung der zur Verfügung stehenden Injektionszeit.

Ein Anhaltspunkt zur Bestimmung der Verarbeitbarkeit eines Harz/Härter-Gemisches ist die Gelzeit. Diese wurde aus den isothermen DSC-Analysen ermittelt. Auch hier zeigt sich die starke Temperaturabhängigkeit. Die Messungen bestätigen die bekannte Faustformel, dass eine Erhöhung der Temperatur um 10°C die Gelzeit halbiert.

Bei der Vernetzungsreaktion der Matrixsysteme wird Wärme freigesetzt. Durch die Enthalpie, die mit den dynamischen DSC-Analysen bestimmt wurde, kann diese Wärmemenge exakt definiert werden. Die Messresultate zeigen, dass die Epo-

xydharze deutlich mehr Wärme freisetzen als die Polyesterharze.

Die freigesetzte Wärme wird auch als autokatalytischer Anteil der Erwärmung bezeichnet. Diese Selbsterwärmung beschleunigt die Aushärtung zusätzlich. Sie ist aber neben der Enthalpie auch vom Aushärtegrad abhängig. Dabei finden zwei gegenläufige Effekte statt. Die durch die Aushärtung auftretende Erwärmung beschleunigt die Aushärtung. Durch den fortschreitenden Aushärtegrad wird jedoch die Reaktionsgeschwindigkeit verringert, da weniger reaktive Moleküle im Harz/Härter-Gemisch vorhanden sind.

Für eine optimale Prozessauslegung muss das Verhalten des Matrixsystems unbedingt bekannt sein. Abbildung 10 veranschaulicht die verschiedenen Einflüsse. Deren Verständnis ist entscheidend zur erfolgreichen Prozessoptimierung in Bezug auf bessere Bauteilqualität und kürzere Zykluszeiten.

Literatur:

- [1] M. Henne, Modelling of thermal aspect in liquid composite moulding for industrial application, Dissertation ETH Nr. 15157, 2003
- [2] A.W. Chan, S-T. Hwang, Anisotropic In-Plane Permeability of fabric Media, Polymer Engineering and Science, August 1991, Vol. 31, No. 16
- [3] P.C. Carman, Fluid flow through granular beds, Transaction of the Institution of chemical Engineers, Vol. 15, pp. 439-458, 1937.