

# IVW - Schriftenreihe Band 28

Institut für Verbundwerkstoffe GmbH - Kaiserslautern

---

Christian Kissinger

Ganzheitliche Betrachtung der  
Harzinjektionstechnik – Messsystem  
zur durchgängigen Fertigungskontrolle

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Kissinger, Christian:  
Ganzheitliche Betrachtung der Harzinjektionstechnik – Messsystem  
zur durchgängigen Fertigungskontrolle / Christian Kissinger . –  
Kaiserslautern : IVW, 2001  
(IVW-Schriftenreihe ; Bd. 28)  
Zugl.: Kaiserslautern, Univ., Diss., 2001  
ISBN 3-934930-24-7

Herausgeber: Institut für Verbundwerkstoffe GmbH  
Erwin-Schrödinger-Straße  
Universität Kaiserslautern, Gebäude 58  
67663 Kaiserslautern

Verlag: Institut für Verbundwerkstoffe GmbH

Druck: Universität Kaiserslautern  
ZBT – Abteilung Foto-Repro-Druck

D-386

© Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, Kaiserslautern 2001

Alle Rechte vorbehalten, auch das des auszugsweisen Nachdrucks, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Photographie, Mikroskopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und das der Übersetzung.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 1615-021X  
ISBN 3-934930-24-7

**GANZHEITLICHE BETRACHTUNG DER  
HARZINJEKTIONSTECHNIK –  
MESSSYSTEM ZUR DURCHGÄNGIGEN  
FERTIGUNGSKONTROLLE**

Beim Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik  
der Universität Kaiserslautern  
am 28.08.2001 eingereichte Dissertation  
zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)**

vorgelegt von

**Dipl.-Ing. Christian Kissinger**

aus Saarbrücken





## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 1996 bis 2001 neben meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Institut für Verbundwerkstoffe GmbH (IVW) in Kaiserslautern.

Meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Manfred Neitzel, danke ich für das mir entgegengebrachte Vertrauen. Zum Gelingen dieser Arbeit haben insbesondere die von ihm großzügig gewährten Freiräume bei der Durchführung der Arbeit beigetragen.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Hellmann für die Übernahme des Korreferats und die Diskussion zum Abschluss der Arbeit. Herrn Prof. Dr.-Ing. Wüstenberg sei an dieser Stelle für die Übernahme des Vorsitzes in der Prüfungskommission gedankt.

Den Mitarbeitern der IVW GmbH, studentischen Hilfskräften sowie Studien- und Diplomarbeitern (s. Anhang), danke ich für die fachliche wie auch moralische Unterstützung. Besonders danken möchte ich Herrn Dr.-Ing. Mitschang für die ständige Diskussionsbereitschaft und Unterstützung.

Dem Preform-RTM-Team gilt an dieser Stelle mein Dank für die gute Zusammenarbeit und Freundschaft in all den Jahren. Erwähnen möchte ich die Kollegen K.-H. Hammer und U. Heissler. Zum Gelingen dieser Arbeit haben besonders auch die Herren G. Röder und P. Daniel beigetragen. Not to forget Anna and Ken. Thank you very much!

Last but not least, wäre all dies ohne die permanente und uneingeschränkte Unterstützung und den Rückhalt meiner Familie nicht möglich gewesen. Mein besonderer Dank gilt daher meinen Eltern und Geschwistern für Ihr Vertrauen und die beständige Zuversicht.

Cornelius, im November 2001

Christian Kissinger

Choose your future.

Choose life.

# Inhaltsverzeichnis

## Vorwort

<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>I</b>
<b>Formelzeichen</b> .....	<b>III</b>
<b>Abkürzungen</b> .....	<b>V</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>VII</b>
<b>1 Einsatz von Faser-Kunststoff-Verbunden</b> .....	<b>1</b>
1.1 Potenziale der Faser-Kunststoff-Verbunde .....	1
1.2 Die Harzinjektionstechnik .....	3
1.3 Einsatz der Harzinjektionstechnik .....	4
1.3.1 Bau und Infrastruktur .....	4
1.3.2 Energietechnik .....	6
1.3.3 Automobilindustrie .....	8
1.3.4 Schienenfahrzeugbau .....	13
1.3.5 Schiffbau und Offshore-Anwendungen .....	14
1.3.6 Luft- und Raumfahrt .....	15
1.3.7 Sport und Freizeit .....	17
1.4 Entwicklungsstand und Potenzial der Harzinjektionstechnik .....	18
<b>2 Harzinjektionstechnik – Verfahrensvarianten</b> .....	<b>21</b>
2.1 Beschreibung der Verfahrensvarianten .....	21
2.1.1 Vakuuminjektionsverfahren .....	21
2.1.2 Resin Transfer Moulding (RTM) .....	22
2.1.3 Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding (VARTM) .....	24
2.1.4 Weitere Verfahrensvarianten .....	25
2.2 Harzinjektionstechniken – Überblick .....	34
2.3 Ganzheitliche Betrachtung des HIT-Fertigungsprozesses .....	36
2.4 Der Kernprozess .....	37
<b>3 Bestimmung der Fließfront in geschlossenen Formen</b> .....	<b>39</b>
3.1 Ausgangssituation .....	39
3.2 Beschreibung bestehender Messsysteme .....	40
3.2.1 Druck-, Temperatur- und Dielektrizitätssensorik .....	40
3.2.2 Lichtwellenleiter und Netzstrukturen .....	42
3.2.3 Piezoelektrische Sensoren .....	44
3.3 Defizite der bestehenden Messsysteme .....	45
<b>4 Kontinuierliche online Messung des Ausbreitungsverhaltens in geschlossenen Werkzeugen</b> .....	<b>46</b>
4.1 Kapazitives Messprinzip .....	46
4.2 Verifikation des Kondensatormessprinzips .....	50
4.3 Kapazitive Bestimmung des Ausbreitungsverhaltens in elektrisch leitenden Verstärkungsstrukturen .....	53
4.4 Sensoraufbau und Sensorgeometrie .....	55

---

<b>5</b>	<b>Permeabilitätsmessung – Aufbau eines Permeameters .....</b>	<b>58</b>
5.1	Permeabilität der Verstärkung – Fließgesetz nach D'Arcy .....	58
5.2	Bestehende Versuchsaufbauten zur Permeationsmessung.....	62
5.3	Beschreibung des ellipsoiden Ausbreitungsverhaltens .....	64
5.4	Online Kalibrierung der Sensoren .....	71
5.5	Kontinuierliche Messung des Ausbreitungsverhaltens .....	79
5.6	Bestimmung der Permeabilität .....	82
5.7	Online Prozesskontrolle .....	88
<b>6</b>	<b>Weitere Messaufgaben .....</b>	<b>91</b>
6.1	Faservolumengehalt und Lagenzahl.....	91
6.2	Kavitätshöhe.....	95
6.3	Aushärtezyklus .....	96
<b>7</b>	<b>Elemente und Organisation der Harzinjektionstechnik.....</b>	<b>101</b>
7.1	Die messtechnischen Lösungen im Überblick .....	101
7.2	Werkzeugbau .....	102
7.3	Verstärkungsstrukturen / Preforming .....	103
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>108</b>
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>110</b>

## Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bedeutung
$A$	[m <sup>2</sup> ]	Fläche / Querschnittsfläche der Kavität [m <sup>2</sup> ]
$A$	[%]	Bruchdehnung
$A$	[1]	Amplitude, Drehmatrix
$a, b$	[m]	Ellipsenhalbachsen in x- bzw. y-Richtung
$a, b, c$	[1]	Glieder der Ellipsengleichung
$A^{-1}$	[1]	Diagonalmatrix
$A^T$	[1]	Transformierte Matrix
$b$	[m]	Breite
$C$	[F]	Kapazität des Kondensators
$c, c_0$	[m/s]	Ausbreitungsgeschwindigkeit
$c, c_p$	[kJ/(kgK)]	spezifische Wärmekapazität
$C_{Fl}, C_{Luft}$	[F]	Kapazität der Flüssigkeit bzw. der Faser
$C_{par}$	[F]	parasitäre Kapazität
$d$	[m]	Dicke, Abstand der Kondensatorplatten
$d_{Fasern}$	[m]	Höhe des von Fasern eingenommenen Volumens im Kondensator
$d_{Luft}$	[m]	Höhe des von Luft eingenommenen Volumens im Kondensator
$d_m$	[m]	mittlerer Abstand
$E$	[MPa]	Elastizitäts-(E)-Modul
$F(\xi_1), F(\xi_2)$	[m <sup>2</sup> ]	Ausgleichsgerade
$g$	[1]	Gemischtes Glied der Ellipsengleichung
$h$	[m]	Höhe der Durchbiegung
$k$	[1]	Faktor zur Beschreibung des Dickenverhältnisses
$K$	[m <sup>2</sup> ]	Permeabilität
$K_1, K_2$	[m <sup>2</sup> ]	Hauptpermeabilität
$l, l_{ges}$	[m]	Länge, Gesamtlänge
$M$	[1]	Matrix
$n$	[1]	Anzahl Verstärkungslagen
$p$	[Pa]	Flächenlast, Injektionsdruck
$p_i$	[Pa]	Innendruck
$P_0, P_1, P_2, P_n$	[1]	Ursprung $P_0$ und Umfangspunkte $P_1, P_2, \dots P_n$ der Ellipse
$Q$	[m <sup>3</sup> /s]	Volumenstrom
$R_0$	[m]	Angusradius
$R^2$	[1]	Bestimmtheitsmaß
$R_{fx}, R_{fy}$	[m <sup>2</sup> ]	Ausbreitung der Ellipse in x- und y-Richtung
$R_m$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Zugfestigkeit

$R_{p0,2}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Dehngrenze
$S_{E,K}$	[1]	Steigung der Ausgleichsgeraden für Ellipse, Kreis
$t$	[m]	Plattendicke
$t$	[s]	Zeit
$u, v$	[1]	Hauptachsen im gedrehten uv-Koordinatensystem
$V_f$	[%]	Faservolumengehalt
$x$	[1]	Vektor
$x^T$	[1]	transformierter Vektor
$x_f$	[m]	Fließweg
$\alpha$	[1]	Verhältnis der Hauptpermeabilitäten
$\alpha$	[1/K]	Längenausdehnungskoeffizient
$\beta$	[°]	Drehwinkel der Ellipse
$\Delta p$	[Pa]	Differenzdruck
$\epsilon, \epsilon_{Fl}, \epsilon_{Fasern}$	[1]	Dielektrizitätskonstante (Flüssigkeit, Faser)
$\epsilon_0$	[F/m]	elektrische Feldkonstante
$\eta$	[mPa s]	Viskosität
$\theta, \theta'$	[°]	Winkel zw. gedrehtem und Ursprungs-Koordinatensystem
$\lambda, \lambda_0$	[m]	Wellenlänge
$\lambda_1, \lambda_2$	[1]	reelle Eigenwerte der Matrix M
$\xi$	[g/m <sup>2</sup> ]	Flächengewicht Verstärkungslage
$\xi_0$	[1]	elliptisches Äquivalent zum Einlasslochradius
$\xi_{f1,2}$	[1]	transformierte, elliptische Halbmesser
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Dichte
$\varphi$	[1]	Faservolumen
$v$	[m/s]	Fließgeschwindigkeit

## Abkürzungen

Kurzform	Bedeutung
AF	Aramidfaser
Al	Aluminium
ARTM	Advanced Resin Transfer Moulding
AVK-TV	Arbeitsgemeinschaft Verstärkte Kunststoffe – Technische Vereinigung e.V.
BMC	Bulk Moulding Compound
C	Kohlenstoff
CCRS	Capacitive Condensator Reading System
CF	Kohlenstofffaser
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
Cu	Kupfer
DPRTM	Differential Pressure Resin Transfer Moulding
EP	Epoxidharz
FIV	Flächeninjektionsverfahren
FKV	Faser-Kunststoff-Verbund
FRP	Fiber Reinforced Plastic
GF	Glasfaser
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
GMT	Glasmattenverstärkter Thermoplast
HB	Brinell-Härte
HI	Harzinjektion
HIT	Harzinjektionstechnik
HV	Vickers-Härte
KFZ	Kraftfahrzeug
kW	Kilowatt
LCM	Liquid Composite Moulding
LFT	Langfaserverstärkter Thermoplast
LKW	Lastkraftwagen
MAK	Maximale Arbeitsplatzkonzentration
Mg	Magnesium
MW	Megawatt
NF	Naturfaser
PA	Polyamid
PC	Polycarbonat
PE	Polyethylen
PH	Phenol
PP	Polypropylen

---

PUR	Polyurethan
QM	Qualitätsmanagement
QS	Qualitätssicherung
RTM	Resin Transfer Moulding
SCRIMP®	Seeman Composite Resin Infusion Molding Process
SF	Sensorfläche
SLI	Single Line Injection
SMARTweave®	Sensor Mounted As Reinforcing Thread
SMC	Sheet Moulding Compound
TERTM	Thermal Expansion Resin Transfer Moulding
TFP	Tailored Fiber Placement
TR	Tailored Reinforcement
UD	Unidirektional
UP	Ungesättigter Polyester
VARTM	Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding
VE	Vinylester
Zn	Zinn



## Abstract

Within Fibre Reinforced Plastics (FRP) manufacturing technologies, Liquid Composite Moulding (LCM) describes a group of cost efficient processes that provide an outstanding variety of possibilities for the manufacture of parts of virtually any size and complexity. In addition to the classic pressure supported Resin Transfer Moulding (RTM) process, techniques such as the VARTM (Vacuum Assisted RTM), the ARTM (Advanced RTM) and the SCRIMP<sup>®</sup> (Seeman Composite Resin Infusion Molding Process) are well established. Each of the different techniques utilizes the same method – a thermoset resin is injected into a mould containing the reinforcement. The impregnation of the reinforcing structure by a resin in a closed mould permits the combination of a wide range of matrix systems and reinforcing materials. With the gelation and curing of the resin after the completed injection, the finished part is ready to be demoulded.

The overall process is influenced by many parameters including:

- the reinforcing structure,
- the viscosity and curing properties of the thermoset resin,
- the position of inlet and outlet,
- the pressure distribution throughout the mould and
- the geometry and size of the part.

Though the process chain has to be analysed as one – from the raw materials to the finished part – the key step within that chain is the injection and impregnation of the porous reinforcing structure within the closed mould. An inherent property of any porous material characterized by its ability to let a fluid flow through under the driving force of a pressure gradient, is the material's permeability. Because it controls the propagation velocity of the resin system in the mould, the permeability of the reinforcing material is crucial for both understanding and modeling the RTM-process. Consequently, measurement and determination of the flow front propagation is necessary to further the development of the LCM-process and to maximize high volume productions while maintaining overall quality and process control.

The importance of the reinforcing structure and the effects on the RTM-process make it clear that a separate evaluation of key characteristics such as permeability is the best

way to understand the process. As such, characterizing the permeability of fibre structures can offer valuable information about the general design of the preform structure as well as the preform structure's influence on permeability alterations.

Though the importance of an online control of the in-mould flow propagation processes is recognized as an important tool, existing efforts to describe and control the flow front position on a continuous basis have severe problems. Apart from others, the high temperatures and pressures occurring, the thermosetting materials and their chemistry, as well as the high geometrical complexity of moulds are issues to be taken into account during the development of new mould integrated sensor systems.

A customized Capacitive Condensator Reading System (CCRS) provides the ability to incorporate the above features with a continuous online determination of the flow-front position in closed moulds. The condensator is integrated within the mould surface and is able to measure the spreading of the resin by the differentiation of the complex dielectric constant of air and resin. This system resolves the particularly difficult problem of gathering data concerning the permeability of conductive fabrics (i.e. of carbon fibre fabrics), which cannot be measured by a standard capacity sensor. Investigation and experimental work lead to the result that (although exhibiting a 'Faraday's cage') by using an insulated sensor and a newly developed and customized electronic data acquisition system the propagation of a fluid can be determined.

As a result, the newly developed capacitive sensor system allows the online determination of the flow front propagation of liquid systems in both non electric conducting and conducting reinforcing structures throughout the injection processes in closed moulds. When compared to existing measurement methods, the benefits of the Capacitive Condensator Reading System are:

- online continuous determination of flow front propagation,
- online data acquisition for permeability calculations,
- online fibre volume fraction control,
- online cavity height control,
- online curing documentation

and the ability to

- allow high volume fractions and injection pressures,
- withstand high tool and resin temperatures,
- allow any geometry within the tool.

With the understanding that the process chain is a complex production cycle with its various interacting elements and the possibility to document these completely in an overall quality and process control, the realization of the potentials of the LCM-technologies will perform even more outstanding manufacturing possibilities for high quality and high volume productions in the future.



# 1 Einsatz von Faser-Kunststoff-Verbunden

## 1.1 Potenziale der Faser-Kunststoff-Verbunde

Verbundwerkstoffe stellen die fortschrittlichsten und anpassungsfähigsten Ingenieurwerkstoffe dar, die bis heute von Menschen eingesetzt werden [1]. Speziell die Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV) mit polymeren Matrices setzen sich dabei zunehmend in industriellen Anwendungen durch und haben aus einer Reihe von Gründen in vielen Bereichen einen festen Platz eingenommen [2]. Sie zeichnen sich gegenüber klassischen metallischen Werkstoffen wie Stahl und Aluminium insbesondere durch ein geringeres spezifisches Gewicht bei höherer spezifischer Steifigkeit und Festigkeit aus [3].

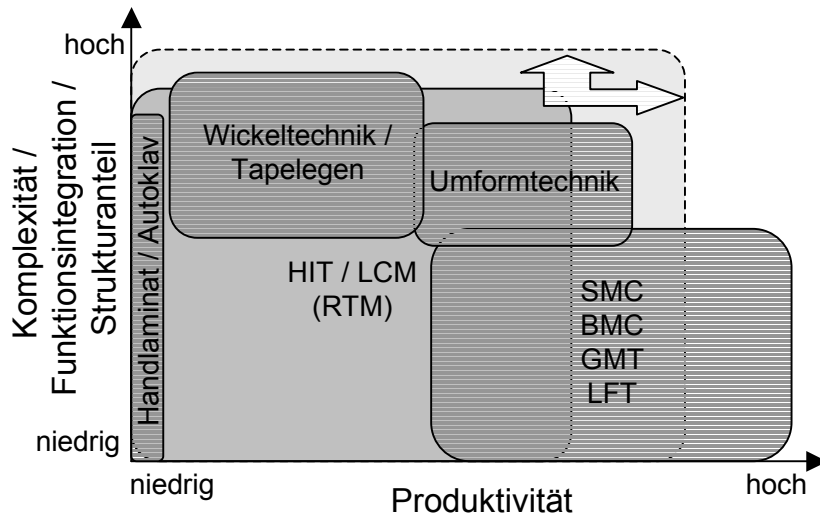
Grundsätzlich bestehen diese Materialien aus einer Kunststoffmatrix und verstärkenden Fasern. Dabei übernimmt die Matrix die Aufgabe, die Fasern in ihrer Position zu fixieren und den Lastein- und -austrag zwischen den Verstärkungsfasern zu gewährleisten sowie diese vor äußeren Einflüssen zu schützen [4]. Die Fasern bestimmen in hohem Maße die statischen und dynamischen Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften, wobei sich eine optimale Werkstoffausnutzung nur dann ergibt, wenn die Fasern entlang der Belastungsrichtung liegen (hohe Anisotropie) [5]. Prinzipiell zeichnen sich FKV deshalb durch eine sehr große Variabilität hinsichtlich

- Faserausrichtung (quasiisotrop, anisotrop, orthotrop)
- Faserart (Glas-, Kohlenstoff, Aramid-, Natur-, Metallfasern, ...)
- Verstärkungstyp (Kurz- und Langfasern, Matten, Gestricke, Gewebe, Gelege, ...)
- Faservolumengehalt (bis 65 Vol.-%)
- Schichtaufbau (Sandwich, Abfolge orthotroper Schichten)
- Matrixsystem (Duroplaste, Thermoplaste)

aus [6]. Die Art und die Verteilung der Verstärkungsfasern, die durch deren textile Strukturen gegeben sind, entscheiden über den Grad der Ausnutzung der Fasereigenschaften [7], aber auch über die möglichen Verarbeitungstechniken und die entstehenden Kosten [8].

Einen Überblick der heute eingesetzten Verarbeitungstechniken zur Herstellung von Faser-Kunststoff-Verbunden, dargestellt in Abhängigkeit der Bauteilkomplexität, der Funk-

tionsintegration und dem Einsatz als Bauteile mit strukturellen Aufgaben über der Stückzahl je Fertigungseinheit (Produktivität) des jeweiligen Verfahrens zeigt Bild 1-1.



**Bild 1-1** Einsatz verschiedener Verarbeitungstechniken

Neben Verfahren wie der Umformtechnik und den Fließpressverfahren (SMC, BMC, GMT, LFT), der Wickel- bzw. Tapelegetechnik oder der Herstellung von Bauteilen im Autoklav, ist eine Gruppe von Verarbeitungsverfahren unter dem Oberbegriff Harzinjektionstechnik (HIT) oder *Liquid Composite Moulding* (LCM) zusammengefasst.

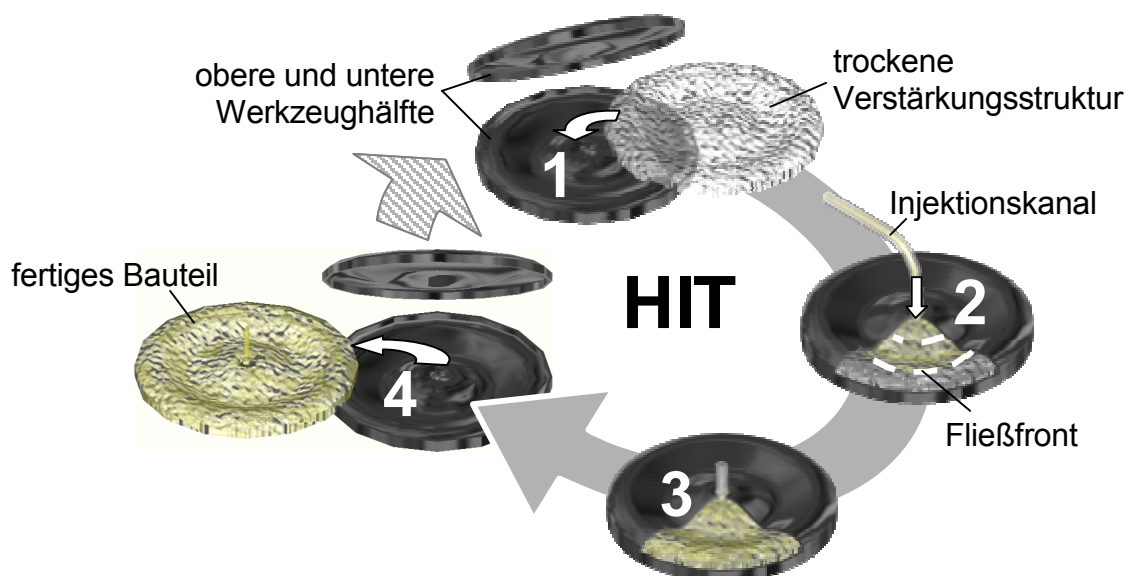
Vor dem Hintergrund einer Kostenreduzierung zur Fertigung von sehr komplexen und großen Bauteilen [9], befindet sich diese Technologie, vielfach unter dem Begriff *Resin Transfer Moulding* (RTM) beschrieben, in den letzten 20 Jahren in einem besonderen Wachstum [10]. So hat sich die Gesamtmenge an im RTM-Verfahren gefertigten Bauteilen in Europa von 1999 mit 46 kt auf ca. 86 kt für das Jahr 2000 erhöht [11].

Ausgehend von der Umsetzung erster, einfacher Bauteile mit niedrigen Stückzahlen als Weiterführung der Handlaminieretechnik zu einem geschlossenen Verfahren mit verbesserter Bauteilqualität, einer höheren Produktivität und Reproduzierbarkeit mit minimalen Belastungen am Arbeitsplatz (MAK-Werte), hat sich diese Verfahrensgruppe als universell einsetzbar erwiesen [12, 13]. Von der labortechnischen Herstellung einfacher Strukturen mit nur wenigen Bauteilen (Prototypen, 0-Serien) bis hin zu komplexen, integralen Strukturen in Mittel- und Großserien haben sich prozesssichere und wirtschaftliche Fertigungen etabliert.

## 1.2 Die Harzinjektionstechnik

Unter dem Oberbegriff Harzinjektionstechnik (HIT) bzw. *Liquid Composite Moulding* (LCM) werden Verarbeitungsverfahren zusammengefasst, die durch Ablegen einer trockenen Verstärkungsstruktur in eine Werkzeugkavität und das anschließende Imprägnieren der Fasern mit niedrigviskosen Matrices in der geschlossenen Form charakterisiert sind [14]. Die Entwicklung dieser Verfahren nimmt ihren Anfang mit einer als 'Bristol method' beschriebenen Technik zur Herstellung von Radomen für das Flugzeug *Hawker Hunter* durch die Bristol Aircraft Ltd., Filton, UK im Jahr 1954. Schon zu diesem Zeitpunkt sagten die Entwickler dieser Methode ein besonderes Potenzial zur vollautomatischen Herstellung glasfaserverstärkter Kunststoffe (GFK) voraus [15].

Der grundsätzliche Verfahrensablauf, schematisch dargestellt in Bild 1-2, hat sich seit diesen Anfängen nicht verändert.



**Bild 1-2** Schematischer Ablauf der Harzinjektionstechnik

- 1 – Verstärkungsstruktur einlegen, Werkzeug schließen
- 2 – Injektion der flüssigen Matrix in die geschlossene Form
- 3 – Aushärten des Matrixsystems
- 4 – Entformung des fertigen Bauteils

In ein in der Regel zweiteiliges Werkzeug wird die noch trockene textile Verstärkungsstruktur als Faservorformling (Preform) mit der Ausrichtung der Fasern entsprechend der mechanischen Belastungen im Bauteil in die Kavität abgelegt (1). Nach dem Schließen der Form erfolgt die Injektion (2) des flüssigen Harzes (hauptsächlich Polyester-,

Vinylester- oder Epoxidharze), wobei die Füllzeit vom Injektionsdruck, der Harzviskosität, der Bauteilgröße, dem Angussystem und der vom Verstärkungsmaterial (Faservolumengehalt  $V_f$ ) definierten Durchlässigkeit abhängt [16]. Der anschließenden Aushärtung (3) des reaktiven Harzsystems folgt das Entformen des fertigen Bauteils (4). Auf Basis dieses Grundprinzips haben sich eine Vielzahl von Verarbeitungstechniken entwickelt. Es gibt also nicht ein Harzinjektionsverfahren, vielmehr hat sich eine Familie von Harzinjektionstechniken etabliert [17].

Nach diesen Verfahren gefertigte Bauteile kommen heute in den unterschiedlichsten Anwendungen zum Einsatz. Anhand einiger ausgesuchter Beispiele aus den Bereichen

- Bau und Infrastruktur,
- Energietechnik,
- Automobilindustrie,
- Schienenfahrzeugbau,
- Schiffbau und Offshore,
- Luft- und Raumfahrt sowie
- Sport und Freizeit

werden nachfolgend die Potenziale der Harzinjektionstechnologie deutlich und bestehende Entwicklungstendenzen aufgezeigt.

## **1.3 Einsatz der Harzinjektionstechnik**

### **1.3.1 Bau und Infrastruktur**

Im Bereich Infrastruktur und Bauwesen bietet der Einsatz von Verbundwerkstoffen vor allem auf Grund deren Korrosions- und Witterungsbeständigkeit entscheidende Vorteile gegenüber klassischen Konstruktionswerkstoffen wie Stahl und Beton [18].

Die Realisierung von kompletten Brückenstrukturen aus FKV [19] bietet neben diesem Vorzug der größeren Korrosions- und Witterungsbeständigkeit eine Reihe weiterer Vorteile gegenüber dem Einsatz der klassischen Konstruktionswerkstoffe [20]:



- Niedriges Gewicht ermöglicht Transport und Nutzung bestehender Fundamente
- Transport ermöglicht Vorfertigung
- Vorfertigung reduziert Kosten und minimiert Fertigstellungszeit vor Ort
- Dadurch Minimierung von Nutzungsausfall und Verkehrsbehinderung
- Kostengünstige Integration von Anbindungspunkten und Inserts
- Erhöhte Lebensdauer
- Korrosionsbeständigkeit bedingt minimale Wartung und Reparatur

Eine GFK-Brücke mit einer Breite von 5,2 m, einer Länge von 11,9 m und einer Dicke der Fahrbahndecke von bis zu 0,25 m zeigt Bild 1-3.



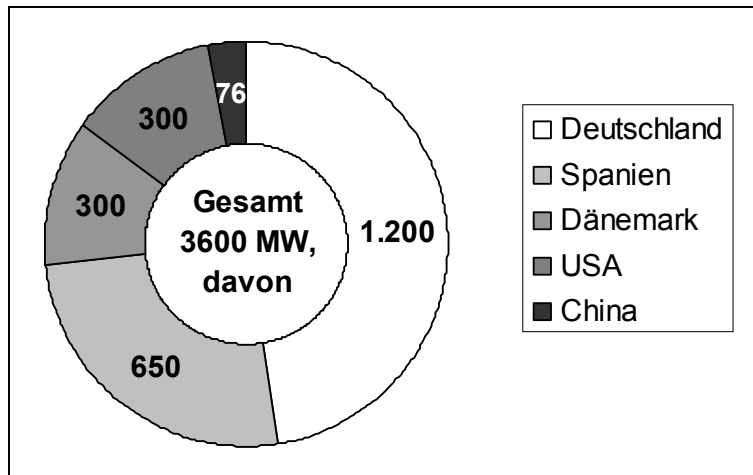
**Bild 1-3** Mill Creek GFK-Brücke [21]

Die Brücke mit einem Gesamtgewicht von 12.700 kg hat bei einer Belastung von 30 t eine Durchbiegung von nur 4,4 mm und genügt damit US amerikanischen Normen.

Mit einer geplanten Einsatzdauer der GFK-Brücke von 75 Jahren im Vergleich zu 30 Jahren für eine herkömmliche Betonbrückenkonstruktion [22] ergibt sich bei etwa gleich hohen Herstellungskosten beider Konstruktionen bereits zum Zeitpunkt des Baus der Brücke die 2,5-fache Wirtschaftlichkeit. Der geringere Wartungs- und Reparaturaufwand und die dadurch und durch die längere Einsatzdauer weitaus größere Verfügbarkeit der GFK-Brücke schaffen über deren gesamter Einsatzzeit (*Life Cycle Cost Estimation*) [23] weitere erhebliche Kosteneinsparungen.

### 1.3.2 Energietechnik

Seit 1993 verzeichnen Windkraftanlagen weltweit das größte Wachstum im Bereich der Energiegewinnung. Mit der Errichtung von Windkraftanlagen für insgesamt 3.600 Megawatt (MW) alleine in 1999 bedeutet dies eine Steigerung von 36 % auf nun insgesamt 13.400 MW im Vergleich zum Vorjahr [24]. Bild 1-4 zeigt die führende Position Deutschlands im internationalen Vergleich mit 1.200 MW neu installierter Leistung in 1999 [25].



**Bild 1-4** 1999 weltweit neu installierte Kapazitäten im Windkraftanlagenbau in MW

Diese Marktentwicklung basiert nicht zuletzt auf der Reduzierung der Kosten je Kilowatt (kW) gewonnener Energie [26]. Nach ersten Versuchen mit Stahl und Aluminium sind heutige Flügel praktisch ausnahmslos aus Faser-Kunststoff-Verbunden. Die technologische Weiterentwicklung vor allem der Flügel hat in der Zeit von 1981 bis 1995 zu Gewichtseinsparungen von etwa 2/3 geführt. Waren erste Windkraftanlagen mit Rotoren von ca. 7 m ausgestattet, die eine Leistung von etwa 55 kW erzeugen konnten, so erreichen heutige Anlagen mit Flügeln von über 30 m Länge bis zu 1,65 MW [27]. Eine Anlage dieser Größenordnung zeigt Bild 1-5.



**Bild 1-5** Windkraftanlage mit ca. 1,3 MW Leistung, Flügellänge 30,5 m [28]

Die Herstellung von Flügeln dieser Größe macht neue Techniken erforderlich, mit denen sowohl die aufgrund der Marktentwicklung erforderlichen Stückzahlen [29] als auch die qualitativen Anforderungen erfüllt werden können. So wird mit dem Wechsel vom Handlaminieren zur Herstellung der Flügel in geschlossenen Verfahren wie beispielsweise dem *Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding* (VARTM) auch die Einhaltung von MAK-Werten (Maximale Arbeitsplatz Konzentration) realisiert. Darüber hinaus wird die Produktivität aufgrund der möglichen Automatisierung des Prozesses gesteigert und eine gleichbleibend hohe Qualität sichergestellt [30]. Dies unter anderem durch den Einsatz von trockenen Faservorformlingen (Preforms), die der Nutzung der Fasereigenschaften der Verstärkungsstrukturen zur Optimierung der Belastbarkeit, der Steifigkeit und des Gewichts zu gute kommen und nicht zuletzt eine Reduzierung der Herstellungskosten (bei gleichbleibend hoher Qualität) möglich machen [31].

Mit der Weiterentwicklung der Herstellungstechnologie können zukünftig weitaus größere Rotordurchmesser realisiert werden [32]. Die größten Windräder Norddeutschlands beispielsweise, aufgestellt im Herbst 2000, haben bei Rotordurchmessern von je 70 m eine Energieleistung von 1,8 Megawatt, und decken mit einer jährlichen Produktion von 5,7 Millionen Kilowattstunden den Bedarf von 2000 Haushalten ab [33].

### 1.3.3 Automobilindustrie

Erst in den letzten Jahren ist ein Sinneswandel in der Automobilindustrie unverkennbar [34]. Die VDI-Nachrichten zitieren zum Thema Verbundbauteile im Automobilbau einen Vertreter der Zulieferindustrie: „Die Kfz-Hersteller haben ihre Vorbehalte gegen Großbauteile aus Kunststoff endlich aufgegeben“ [35].

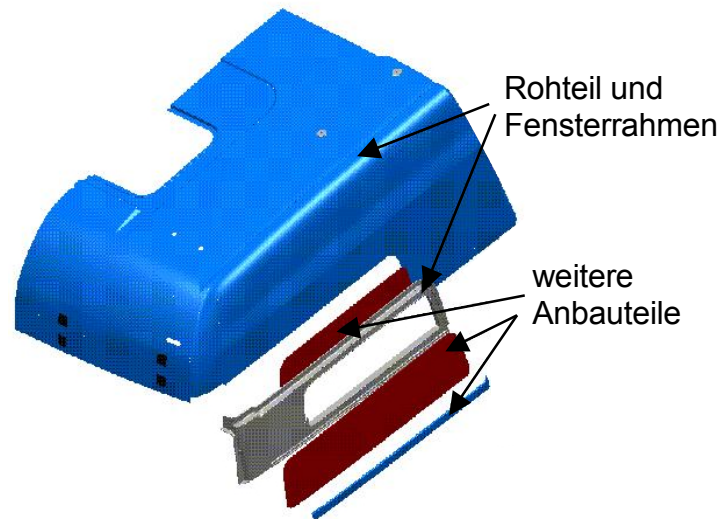
Bestätigt wird diese Aussage beispielsweise mit der Fertigung eines Hochdachs bei IVECO [36] oder der LKW-Frontpartie mit integrierten Kotflügeln im RTM-Verfahren bei Tecnofibras S/A, Brasilien. Die Herstellung dieses Bauteils im RTM-Verfahren mit einer Größe von 2,2 m x 1,6 m x 1,2 m, einem Stückgewicht von nur 22 kg und einer Wanddicke von 3,5 mm, dargestellt in Bild 1-6, erlaubt bei Zykluszeiten von maximal 15 min eine Gesamtjahresstückzahl von 20.000 Teilen.



**Bild 1-6** LKW-Frontpartie mit integrierten Kotflügeln und Kühlergrill [37]

Durch den Einsatz vorgefertigter, an die Bauteilgeometrie und die Bauteilbelastungen angepasste Verstärkungsstrukturen (Vorformlinge) werden reproduzierbare Fasergehaltsanteile von bis zu 70 % realisiert. Die Preforms werden mittels eines Handhabungssystems in das geöffnete Werkzeug eingelegt. Nach dem Schließen des Werkzeugs ist der Füllvorgang bei einem Injektionsdruck von 6 bar innerhalb von 4 min beendet. Die anschließende Reaktion und Aushärtung nimmt etwa weitere 6 min in Anspruch. Das fertige Bauteil wird ebenfalls per Handlingroboter entnommen.

Sehr deutliche Vorteile durch den Einsatz von Verbundwerkstoffen im Vergleich zu metallischen Strukturen beweist das mit dem Innovationspreis der AVK-TV für die 'beste Anwendung des Jahres 2000' ausgezeichnete LKW-Hochdach der Firma Fritzmeier Composite GmbH&Co., Bruckmühl-Hinrichsseggen [38]. Die besonderen Vorteile liegen in der Einteiligkeit und Integralität der Sandwich-Lösung. So entfallen beispielsweise die aufwändigen Innenverkleidungen und Isolationsmaßnahmen vollständig (Bild 1-7).



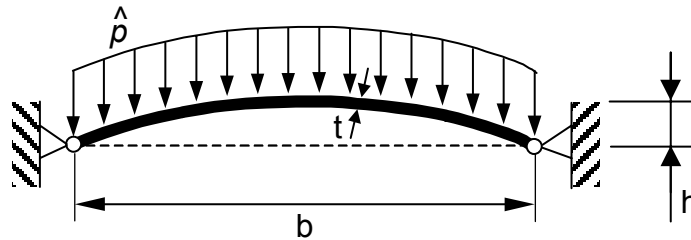
**Bild 1-7** Hochdach der Firma Fritzmeier Composite, hergestellt für die MAN-LKW-Serie im Harzinjektionsverfahren [39]

Die Kapazität der Produktion der Hochdächer für die neue LKW- Baureihe TG der MAN-Nutzfahrzeuge AG beträgt im Normalbetrieb (3-Schichtmodell) ca. 60 Hochdächer je Werkzeug und Arbeitstag. Die Ausführung als RTM-Sandwichstruktur führt im Vergleich mit der Bauweise in Stahlblech zu einer Einsparung von mehr als 40 % am Gesamtgewicht bei geeigneter Wahl von Material und Fertigungsvariante [40].

Dieses Gewichtseinsparungspotenzial aufgrund der Materialauswahl kann anhand einer analytischen Betrachtung beispielsweise der sich ergebenden Wanddicken (und damit des Gewichts) einer Schalenstruktur bei gleicher Belastung und Durchbiegung, aber Verwendung unterschiedlicher Materialien, nachvollzogen werden. Es wird der Vergleich einer FKV-Schalenstruktur zu einer Ausführung in Stahlblech durchgeführt. Die Elemente sollen so dimensioniert sein, dass sich bei einer zu wählenden Last für beide Ausführungen die gleiche Durchbiegung ergibt. Bei annähernd gleichen konstruktiven und technischen Eigenschaften der Bauteile ist bei deren Vergleich insbesondere das Gewichtseinsparungspotenzial des FKV-Bauteils von Interesse.

Grundlage der Berechnung ist eine Betrachtung nach Wiedemann, die eine analytische Lösung für ein vereinfachtes Stabilitätsproblem 'Durchschlagen des Schalenstreifens unter Außendruck' liefert [41]. Als Modell dient ein schwach gekrümmter Schalenstreifen, dessen Längsränder radial und tangential gestützt sind (Bild 1-8). Belastet ist der Schalenstreifen mit einer Flächenlast  $\hat{p}$ , die der kritischen Last entsprechen soll. Die Stärke der Schalenkrümmung wird durch das Verhältnis von  $h$  zu  $t$  beschrieben, wobei  $t$

die Dicke der Platte und  $h$  die 'Höhe' der Durchbiegung ist. Der Abstand zwischen den beiden Plattenenden wird durch das Maß  $b$  bestimmt.



**Bild 1-8** Schwach gekrümmter Schalenstreifen, Längsränder radial und tangential gestützt

Für den kritischen Flächenlastwert gilt nach Wiedemann für eine nicht verrippte Struktur:

$$\frac{\hat{p}}{E} \left( \frac{b}{t} \right)^4 \approx 29 \frac{h}{t} \quad (1-1)$$

Aufgelöst nach  $t$  ergibt sich:

$$t \approx \sqrt[3]{\frac{\hat{p} b^4}{E 29h}} \quad (1-2)$$

Werden für zwei Schalenstrukturen die gleiche Flächenlast  $\hat{p}$  sowie die gleichen geometrischen Abmessungen  $b$  und  $h$  festgelegt, erhält man die folgende vereinfachte Beziehung für das Plattendickenverhältnis:

$$\frac{t_1}{t_2} \approx \frac{\sqrt[3]{\frac{\hat{p} b^4}{29h E_1}}}{\sqrt[3]{\frac{\hat{p} b^4}{29h E_2}}} = \sqrt[3]{\frac{E_2}{E_1}} \quad (1-3)$$

Die analytische Betrachtung zeigt, dass lediglich der E-Modul in die Bestimmung der Plattendicke eingeht. Der Faktor  $k$  zur Beschreibung des Dickenverhältnisses beispielsweise eines FKV-Bauteils zu einem Stahlblechbauteil berechnet sich damit wie folgt:

$$\frac{t_{FKV}}{t_{Stahl}} \sim \sqrt[3]{\frac{E_{Stahl}}{E_{FKV}}} \Rightarrow t_{FKV} \sim t_{Stahl} \cdot \sqrt[3]{\frac{E_{Stahl}}{E_{FKV}}} = t_{Stahl} \cdot k \quad (1-4; 1-5)$$

Ein Vergleich unterschiedlicher Materialien beschränkt sich also bei dieser Betrachtung auf die Kenntnis des jeweiligen E-Moduls und deren Verhältnisse zueinander im Faktor  $k = \sqrt[3]{E_{\text{Stahl}} / E_{\text{FKV}}}$ . Der E-Modul für die Werkstoffe Stahl, GFK und CFK ist in Tabelle 1-1 zu finden. Zur Festlegung dieses Materialkennwertes liegt eine isotrope (Stahl) bzw. quasiisotrope (GFK, CFK) Betrachtung zugrunde. Die Materialkombinationen der GFK- und CFK-Lamine sind wie folgt festgelegt:

CFK: T300 B-6K-50B Gewebe	GFK: E-Glas Gewebe
EP Harz LY 556 / HT 976	EP Harz LY 556 / HT 976
Faservolumen $V_f = 50 \%$	Faservolumen $V_f = 50 \%$

**Tabelle 1-1** E-Modul verschiedener Materialien und daraus resultierende Dicken bei gleicher Belastung und Durchbiegung der Schalen

Material der Schale	E-Modul [MPa]	k	Dicke t [mm]
Stahl	210.000	1	0,7
GFK <sub>quasiisotrop</sub>	26.000	2,0	1,4
CFK <sub>quasiisotrop</sub>	54.300	1,6	1,1

Anhand der bestimmten Dicke für die Schalen bei Verwendung von CFK bzw. GFK und Stahlblech erfolgt eine Abschätzung des resultierenden Gewichts auf der Grundlage einer angenommenen Fläche von beispielsweise  $1 \text{ m}^2$ . Tabelle 1-2 fasst die Ergebnisse für den Fall einer unverrippen Struktur zusammen.

**Tabelle 1-2** Gewicht einer Schalenstruktur (Fläche  $A = 1 \text{ m}^2$ ) bei Verwendung unterschiedlicher Materialien aber gleicher Belastung und Durchbiegung

Material der Schale	Dichte $\rho$ [ $\text{g/cm}^3$ ]	Dicke t [mm]	Gewicht [kg]
Stahl	7,8	0,7	5,5
GFK <sub>quasiisotrop</sub>	1,9	1,4	2,7
CFK <sub>quasiisotrop</sub>	1,5	1,1	1,7

Die Untersuchung macht deutlich, welche Gewichtseinsparungen unter Berücksichtigung der zur Abschätzung getroffenen Annahmen und Vereinfachungen möglich sind. In diesem Fall würde die Verwendung von CFK zu einer Gesamtgewichtseinsparung von ca. 3,8 kg oder 70 % im Vergleich zur gängigen Stahlblechbauweise bei der ange-

nommenen Größe der Schale von 1 m<sup>2</sup> führen. Mit einer Bauweise in GFK ist eine Gewichtseinsparung der Schalenstruktur von 50 % zu realisieren.

Das zuvor am Beispiel des Hochdachs (Bild 1-7) erläuterte Gewichtseinsparungspotenzial kann anhand der analytischen Betrachtung und unter den hier getroffenen Annahmen so nachvollzogen und bestätigt werden.

Es ist festzustellen, dass bei gleicher Durchbiegung gleich großer Schalen trotz der größeren Bauteildicken eine deutliche Gewichtseinsparung bei Verwendung von FKV-Strukturen realisiert werden kann. Dieses Ergebnis ist um so 'gewichtiger', als für die hier beschriebene Betrachtung ein quasiisotroper Laminataufbau für die Festlegung des E-Moduls zugrunde gelegt wurde, und dadurch das eigentliche Potenzial der Faser-Kunststoff-Verbunde – eine belastungsgerechte Auslegung und Faserorientierung – nicht genutzt ist.

Beim Omnibusbau erfolgt der Einsatz von FKV als Werkstoff beispielsweise für die Karosserieaußenhaut insbesondere aus Gründen der einfachen dreidimensionalen Formbarkeit. Ziele der Verwirklichung von glasfaserverstärktem Kunststoff im Omnibusbau sind eine

- Vereinfachung der Bus-Fertigung durch Teilereduktion unter Ausnutzung der Integrationsmöglichkeiten des Kunststoffes
- Reduzierung der Durchlaufzeit durch Verringerung der Fertigungstiefe
- Senkung des Strukturgewichts
- Erhöhung der Struktursteifigkeit und der Crashfestigkeit
- gute Wärme- und Geräuschisolation
- Verringerung der Gesamtkosten.

Die geplante Serienstückzahl von Neoplan für den Cityliner [42] von etwa 500 Stück pro Jahr wird mit einem Harzinjektionsverfahren gefertigt. Ergebnisse der Umsetzung sind eine optimierte Fertigungsabfolge, eine Verkürzung der Fertigungszeit von 14 auf 4 Stunden, eine Minimierung des Gesamtgewichts des gefertigten Frontends von 130 auf 85 kg, eine verbesserte Wärme- und Geräuschisolation sowie eine deutliche Qualitätssteigerung und ein Kostenreduzierungs-Potenzial von 15 % im Vergleich zur traditionellen metallischen Bauweise [43].



Ein aktuelles Beispiel für den Einsatz der Injektionstechnologie im Automobilbau sind verschiedene Bauteile wie beispielsweise Elemente der Bodengruppe der Dodge Viper, dargestellt in Bild 1-9.



**Bild 1-9** Dodge Viper, Träger verschiedener Bauteile hergestellt im HI-Verfahren [44]

Ebenso sind Teile des GM Silverado Pickup [45], die Heckspoiler von Fiesta [46] und Porsche [47] an verschiedenen Sondermodellen oder auch die Fahrerkabine des Kleintransporters Unimog U100 der Firma DaimlerChrysler, Gaggenau [48] mit einer der Verfahrensvarianten der Harzinjektionstechnologie hergestellt. Das Potenzial der HI-Verfahren wird vor allem auch in Zukunftsprojekten der Automobilindustrie, so bei der BMW AG, München erkannt [49].

### 1.3.4 Schienenfahrzeugbau

Beim Schienenfahrzeugbau liegt der Nutzen der FKV, und hier vor allem der Injektionstechniken, in den Möglichkeiten zur integralen Bauweise von sehr komplexen und großflächigen Strukturen wie in Bild 1-10 am Beispiel eines Kühlwaggonaufbaus dargestellt.



**Bild 1-10** Kühlwaggonaufbau [50]

Die Integration von Funktionen wie beispielsweise die Wärmeisolation durch den Einsatz von Sandwichelementen [51], die vor allem aus strukturmechanischen Gründen von Vorteil sind, machen die Verwendung von FKV in diesen Fällen besonders interessant. Die geringen Werkzeugkosten und die praktisch nicht limitierten Möglichkeiten in der Größe herzustellender Verbundstrukturen mit einem Flächeninjektionsverfahren (FIV) wie beispielsweise dem *Seeman Composite Resin Infusion Molding Process* (SCRIMP®) in entsprechenden Stückzahlen [52] sowie das Arbeiten mit einem geschlossenen Verfahren sind besondere Vorteile und bestimmen für diesen Anwendungsfall die Wahl der Herstellungsvariante.

Gleiches gilt beispielsweise für das *Personal Carrier System* der Asea Brown Boveri AG (ABB), Schweiz oder auch das im *Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding* (VARTM) hergestellte Dach des Talent der Deutschen Bahn AG. Bei der Firma Alusuisse Airex AG, Schweiz werden mit diesem Verfahren seit einigen Jahren komplette Führerstandskabinen für Schienenfahrzeuge mit bis zu 450 kg Eigengewicht in einem Fertigungsschritt hergestellt.

### 1.3.5 Schiffbau und Offshore-Anwendungen

Die Notwendigkeit der Einhaltung von gesetzlichen Vorgaben wie beispielsweise der MAK-Werte von Styrol und anderen Lösungsmitteln hat dazu geführt, dass offene Herstellungsverfahren wie das typisch für den Schiffbau eingesetzte Handlaminieren zur Fertigung von extrem großen und komplexen Strukturen durch die schon zuvor angesprochenen geschlossenen Verfahren wie das FIV-Verfahren oder auch das Vakuuminjektionsverfahren ersetzt werden [53], bei denen auch Preforms immer häufiger zum Einsatz kommen [54]. Mit diesen neuen Fertigungsverfahren hergestellte Bauteile reichen von flächigen Spantelementen und Rumpfabschnitten [55] über komplette Rumpfstrukturen (Bild 1-11) bis hin zu integralen Schiffaufbauten und Bootskörpern.



**Bild 1-11** Fertigung Rumpf [56]

- 1 – Belegung des geöffneten Werkzeugs (Sandwichaufbau)
- 2 – Entformung des fertigen Bootsrumpfes als integrale Struktur
- 3 – Fertiger Bootskörper

Diese Entwicklung zum Einsatz von FKV und der Nutzung der gegebenen Gestaltungsfreiheiten ist im gesamten Schiff- und Offshorebereich zu beobachten [57, 58].

### 1.3.6 Luft- und Raumfahrt

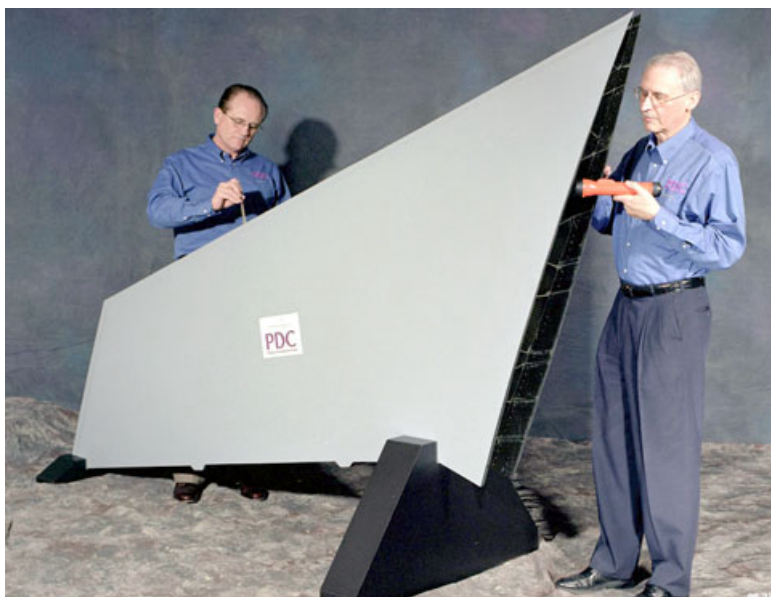
Der Einsatz der Harzinjektionstechnologien im Luftfahrtbereich wird vor allem wegen der bestehenden Potenziale zur Fertigung von hochpräzisen Bauteilen mit Dickenabweichungen von weniger als 0,3 mm, der Möglichkeit zur Fertigung von hochkomplexen funktionsintegrierten Strukturen und dem damit verbundenen Kosteneinsparungspotenzial aufgrund der Gewichts- und Teilezahlreduzierung vorangetrieben [59, 60, 61]. In der zivilen Luftfahrt (Bild 1-12) werden verschiedene Bauteile mittels RTM-Verfahren hergestellt [62].



**Bild 1-12** Airbus A340–300 [63]

Bei allen Airbus-Typen mit CFK-Seitenleitwerk wird die Verbindung zum Flugzeugumpf mittels Seitenruderbeschlägen realisiert [64]. Diese werden mit bis zu etwa 80 Gewebelagen in Bauteildicken von ca. 40 mm im Injektionsverfahren in einem vorgeschalteten Prozess gefertigt. Bei der folgenden Herstellung des Seitenleitwerks im Autoklav werden die vorgefertigten Seitenruderbeschläge im Lagenaufbau integriert und so während des Härtingszyklus des Prepregs in die Gesamtstruktur mit eingebunden.

Im militärischen Bereich findet das RTM-Verfahren zur Herstellung von Strukturbauteilen umfassend Anwendung [65]. So hat beispielsweise die Lockheed Martin Aeronautics Company mit der Fertigung des Seitenleitwerks des *Joint Strike Fighter* als Demonstrator eine der größten und komplexesten RTM-Flugzeug-Strukturen [66] mit einer Länge von 3,65 m und einem Gesamtgewicht von über 90 kg (Bild 1-13) realisiert.



**Bild 1-13** Lockheed Martin Aeronautics Company 'Vertical Tail' [67]



Mit der Realisierung als RTM-Struktur wurde aus zuvor 13 Einzelkomponenten mit über 1.000 Verbindungselementen ein einziges Bauteil. So konnten die Herstellungskosten um über 60 % reduziert werden [68].

Bei weiteren Ansätzen zur Realisierung von Flugzeugstrukturen kommen Verfahren wie DPRTM (*Differential Pressure RTM*) oder SLI (*Single Line Injection*) zum Einsatz. Beim RFI-Verfahren (*Resin Film Infusion*) [69] wird das Harzsystem über der gesamten Bauteiloberfläche als Harzfolie oder -film mit der Verstärkungsstruktur aufgelegt. In einem Autoklavzyklus wird dieser Film durch erhöhte Temperaturen verflüssigt. Durch die beaufschlagte Vakuum- und Druckkraft erfolgt der Harzfluss und damit die Imprägnierung ausschließlich in Dickenrichtung [70, 71].

### 1.3.7 Sport und Freizeit

Ein Beispiel zum Einsatz von FKV im Sport- und Freizeitbereich ist der im RTM-Schlauchblas-Verfahren hergestellte Monocoque-Rahmen des vollgederten Mountainbikes Spyce XT [72] der Villiger Söhne AG, Schweiz dargestellt in Bild 1-14.



**Bild 1-14** Arrow Spyce XT [73]

Zur Fertigung des Rahmens wird eine Preform in ein mehrteiliges Werkzeug eingelegt und anschließend in einem Fertigungsschritt injiziert. Die Herstellung einer Preform ermöglicht die Montage von verschiedenen Verstärkungselementen für die spezifischen Belastungen in der Struktur zu einer Einheit [74]. Dies minimiert den Belegungsanfang

im offenen Werkzeug und ist darüber hinaus ein Schritt zu einer den gesamten Fertigungsprozess umfassenden Qualitätssicherung.

Weitere typische Anwendungen aus dem Sport- und Freizeitbereich sind beispielsweise Surf- und Snowboards, Ski [75] und der Sportbootbereich [76].

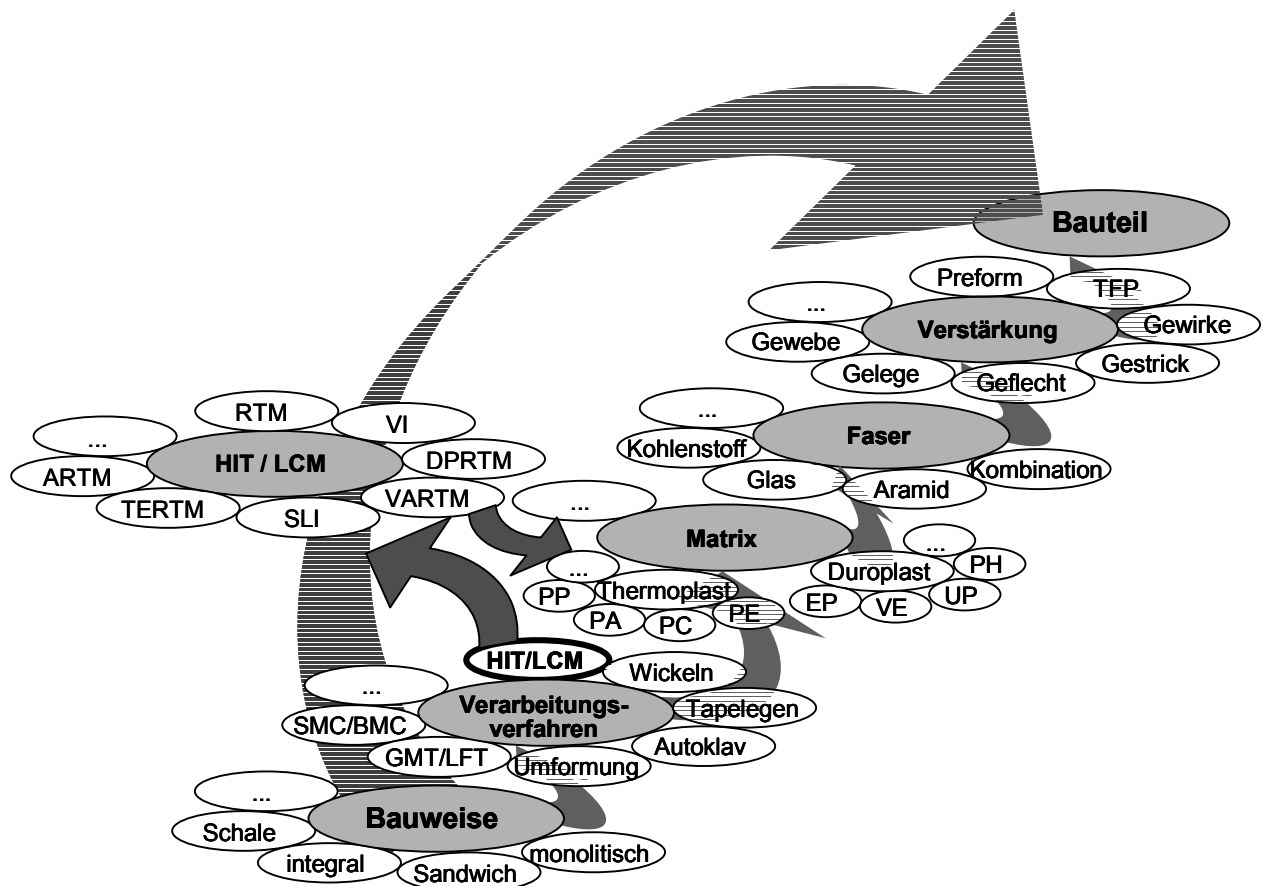
## 1.4 Entwicklungsstand und Potenzial der Harzinjektionstechnik

Die vorgestellten Anwendungsbeispiele repräsentieren ausnahmslos Bauteile, welche nach einer der Varianten hergestellt sind, die unter dem Oberbegriff der Harzinjektionstechnik zusammengefasst werden.

Das Potenzial dieser Familie von Fertigungstechniken liegt in der Möglichkeit, für vielfältige Problemstellungen und Anforderungen maßgeschneiderte Lösungen bieten zu können. Dies zum einen durch den Einsatz einer Vielzahl von unterschiedlichsten Matrixsystemen und Verstärkungsstrukturen, welche wegen der anisotropen Eigenschaften zu einer belastungsgerechten Auslegung von Bauteilen genutzt werden können. Zum anderen ist ein wesentlicher weiterer Vorteil die Möglichkeit zur Auswahl einer geeigneten Verfahrensvariante mit dem geeigneten Werkzeug- und Injektionskonzept.

Dieses Potenzial birgt aber gleichzeitig eines der größten Hemmnisse. Mit den gegebenen umfassenden Auswahlmöglichkeiten ist auch ein mitunter langwieriger und sehr komplexer Entscheidungsprozess von der Wahl der geeigneten Bauweise, über das geeignete Fertigungsverfahren bis hin zu den einzusetzenden Materialien verbunden [77].

Bild 1-15 versucht, diese Vielfalt von Lösungsansätzen und -möglichkeiten zur Fertigung eines FKV-Bauteils zu veranschaulichen.



**Bild 1-15** Vielfalt der Lösungsansätze zur Fertigung eines FKV-Bauteils

Ausgangspunkt ist die Festlegung einer Bauweise, auf deren Basis die Entscheidung für den möglichen Einsatz der HIT fällt. Im folgenden Schritt muss entschieden werden, welche der

- Fertigungsvarianten,
- Matrixsysteme,
- Verstärkungsfasern und
- Verstärkungsstrukturen

zu einem erfolgversprechenden Fertigungskonzept für das Bauteil führen.

Durch die gezielte Auswahl von geeigneten Verstärkungsstrukturen und -materialien – mit Blick z.B. auf mechanische Eigenschaften, Medienbeständigkeit und/oder Kosten – in Kombination mit dem Einsatz von Verarbeitungsverfahren zur effektiven Herstellung der gewünschten Bauteile (in Abhängigkeit von Faktoren wie der Größe, Komplexität oder auch der Stückzahl und der Kostenstruktur) bestehen vielfältige Möglichkeiten für die Umsetzung von Faser-Kunststoff-Verbund-Strukturen mit der HI-Technik in praktisch allen Einsatzbereichen.

Für die Fertigung von Bauteilen aus FKV sprechen die Forderung nach Effizienz, Produktivität und Qualitätsstandards [78]. Mit der Notwendigkeit der Einhaltung von Arbeitsplatzsicherheitsvorschriften kommt dabei den geschlossenen Verarbeitungsverfahren eine immer größere Bedeutung zu [79].

Bei einem Vergleich der FKV-Industrie mit anderen Industriezweigen im Bereich des Ingenieurbaus ist aber trotz aller Potenziale eine Diskrepanz unverkennbar [80]. Auf der einen Seite bieten die Faser-Kunststoff-Verbunde *high-tech* Anwendungen, die höchsten Ansprüchen und Möglichkeiten gerecht werden, auf der anderen Seite scheitert deren adäquate Realisierung häufig am oder im Herstellungsprozess. So haben FKV aufgrund ihrer anisotropen Eigenschaften unstrittig große Technologiepotenziale. Dennoch liegt die Anwendung dieser Werkstoffe in der Praxis hinter den berechtigten Erwartungen zurück [81].

Zur Herstellung von FKV allgemein und speziell für mit der Harzinjektionstechnik hergestellte Bauteile ist es daher notwendig, den gesamten Entscheidungsprozess von der Auslegung des Bauteils hinsichtlich der einzusetzenden Materialien, der Bauweise und der Wahl des Verarbeitungsprozesses bis hin zum fertigen Bauteil transparent zu gestalten und so eine den gesamten Fertigungsprozess einbeziehende Betrachtungsweise zu ermöglichen. Eine ganzheitliche Betrachtung des Fertigungsprozesses der HIT ist damit Ziel und Weg zugleich.

Ziel dieser Arbeit ist es, ausgehend von einer Analyse der einzelnen Verfahrensvarianten grundsätzliche Gemeinsamkeiten der HIT festzustellen, diese aus Sicht des gesamten Prozessablaufs einzuordnen und anhand einer Betrachtung der Hauptpfeiler des Herstellungsprozesses Möglichkeiten der Entwicklung eines ganzheitlichen Fertigungsmanagements mit den für diese Aufgabe geeigneten Prozessbausteinen aufzuzeigen und geeignete Messmittel zur Verfügung zu stellen.



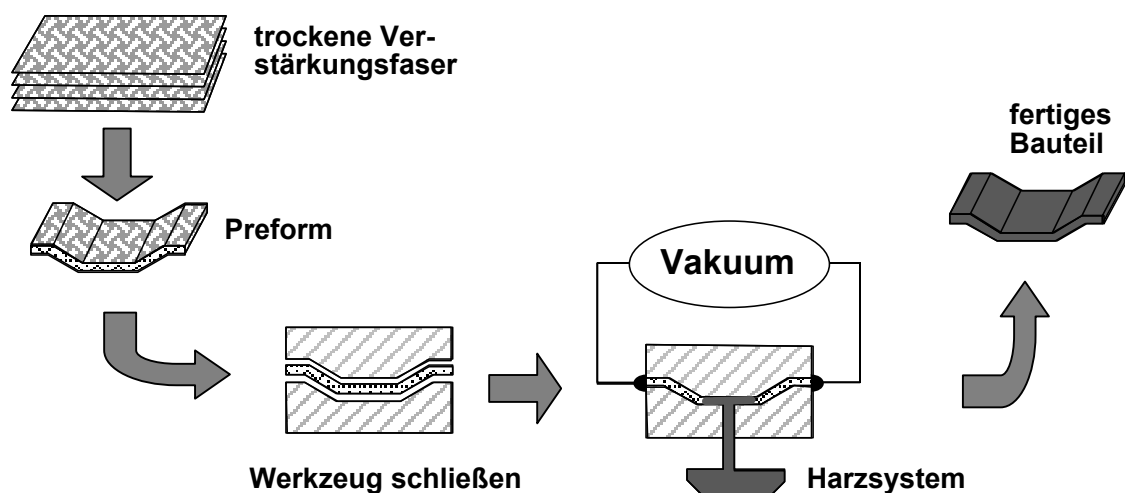
## 2 Harzinjektionstechnik – Verfahrensvarianten

### 2.1 Beschreibung der Verfahrensvarianten

#### 2.1.1 Vakuuminjektionsverfahren

Das Vakuuminjektionsverfahren ist die einfachste Methode, um mit einer Injektionstechnik endlosfaserverstärkte Bauteile herzustellen. Neben dem (meist einseitigen) Werkzeug werden lediglich eine Vakuumpumpe und ein Harzvorratsbehälter benötigt, wodurch die Investitionskosten niedrig gehalten werden [82].

Zu Beginn des Fertigungsprozesses wird, wie bei allen Harzinjektionsverfahren, eine Faserverstärkung in die Kavität eingelegt. Anschließend wird das Werkzeug geschlossen (durch eine Vakuumfolie oder auch eine 2. Werkzeughälfte) und mit Vakuum beaufschlagt. Durch den Unterdruck innerhalb der Kavität wird zum einen das Werkzeug zugehalten und die Verstärkungsstruktur kompaktiert, zum anderen die Matrix nach Öffnen der Injektionsleitung durch das Fasermaterial gesaugt und die Struktur getränkt [83]. Um die Kavität vollständig füllen zu können, muss mindestens ein Vakuumanschluss am Fließwegende sitzen. Zur Injektion bieten sich dabei ein Linienanguss oder ein Ringkanal an, durch welchen die Injektionszeiten erheblich verkürzt werden [84]. In Bild 2-1 ist das Vakuuminjektionsverfahren schematisch dargestellt.



**Bild 2-1** Vakuuminjektionsverfahren

Mit dem Vakuuminjektionsverfahren lassen sich luftblasenfreie Bauteile mit hoher Qualität und – bei zweiseitigen Werkzeugen – beidseitig guten Oberflächen herstellen. Da durch das Vakuum nur eine maximale Druckdifferenz von  $\Delta p \leq 1$  bar aufgebracht wer-

den kann, ist der Fließweg und damit die Größe der Bauteile begrenzt. Durch spezielle Injektionsgewebe und dünnflüssige Harze in einem temperierten Werkzeug lassen sich längere Fließwege realisieren oder auch die relativ langen Injektionszeiten verkürzen. Für Bauteile mit komplexer Geometrie oder Verrippungen ist das Vakuuminjektionsverfahren sehr gut geeignet. Bezüglich Inserts bietet das Verfahren gute Voraussetzungen. Die typische Seriengröße liegt bei etwa 2.000 Stück/a.

### 2.1.2 Resin Transfer Moulding (RTM)

Während beim Vakuuminjektionsverfahren das Füllen der Kavität durch das Anlegen eines Vakuums erfolgt, wird bei dem bereits in den 50er Jahren entwickelten *Resin Transfer Moulding* (RTM) das Matrixmaterial mit Druck in die Kavität injiziert.

Nach dem Beschicken (Aufbringen von Trenn- und Gleitmitteln sowie Einlegen der Faserverstärkung in die Kavität) des Werkzeugs wird dieses geschlossen und das Matrixmaterial – aus Harz, Härter und Katalysator – in die Kavität injiziert (Druck < 7 bar), wo es die Verstärkungsstruktur imprägniert und unter Temperatureinwirkung aushärtet (Bild 2-2). Zur Erhöhung der spezifischen Biege- und Beulsteifigkeit können zusätzlich beispielsweise Schaumstoff- oder Balsaholzkern verwendet werden [85]. Nach der Entformung des Bauteils muss das Werkzeug vor dem nächsten Fertigungszyklus von eventuell vorhandenen Harzresten an Anguss und Steiger gesäubert werden.

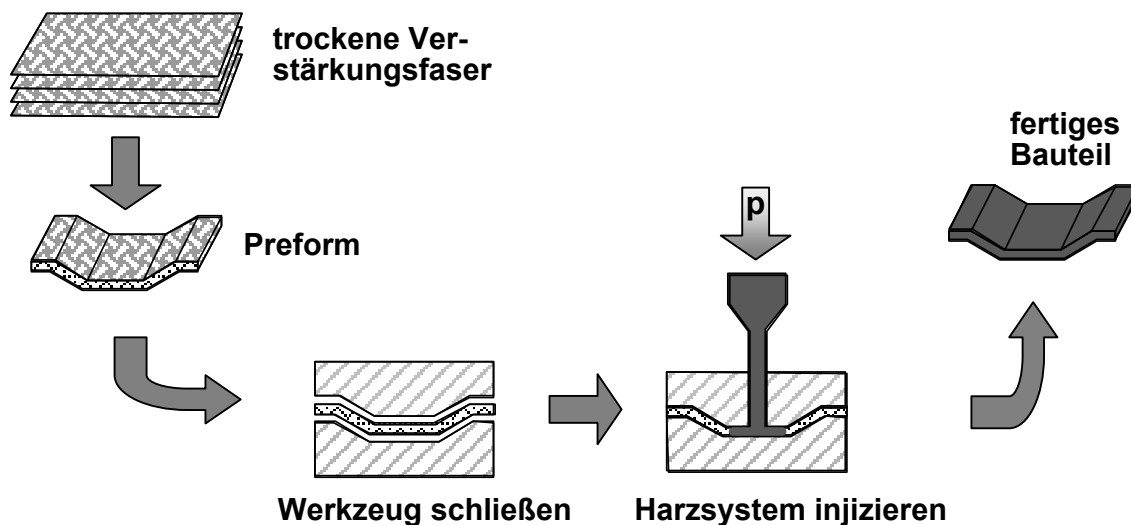


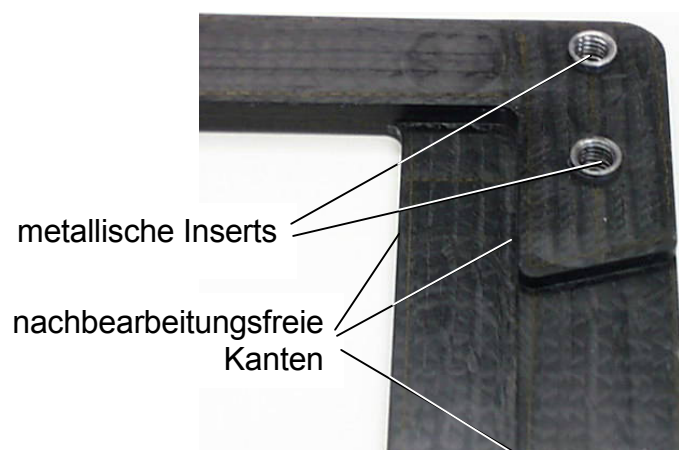
Bild 2-2 Resin Transfer Moulding (RTM)

Im allgemeinen betragen die Zykluszeiten für einen RTM-Prozessdurchlauf etwa 5 bis 25 Minuten. Injektion und Vernetzung beanspruchen dabei den weitaus größten Teil der Zeit. Seriengrößen von bis zu 12.000 Stück/a werden mit einem Werkzeug realisiert. In neueren Produktionsanlagen, in denen eine entsprechende Anzahl an Werkzeugen zusammengefasst ist, lassen sich inzwischen durch Optimierungen des Prozessablaufs Tagesproduktionen von bis zu 1.000 Teilen erreichen.

Durch den Einsatz von vorgeformten Faserverstärkungen (*Preforms*) kann die Beschickungszeit der Kavität wesentlich verkürzt werden. Damit erhöht sich die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens zur Herstellung von Bauteilen mit einer komplexen räumlichen Gestalt [86].

Grundsätzlich lassen sich mit dem RTM-Verfahren beidseitig glatte Oberflächen erreichen. Bei zu lackierenden Oberflächen – beispielsweise Außenhautteile von KFZ – sind die geforderten Qualitäten durch geeignete Harzsysteme und Prozessführung oder den Einsatz von Oberflächenvliesen bzw. Gelcoats zu verwirklichen [87]. Lufteinschlüsse, die zur Porosität des Bauteils führen, lassen sich durch das Spülen der Kavität vor der Injektion mit einem geeigneten Lösungsmittel reduzieren.

Im RTM-Verfahren sind Bauteile mit komplexen Geometrien bei geringem Investitionsaufwand möglich [88]. Das Verfahren gestattet maßgenaue Formteile herzustellen, wodurch der anfallende Randbeschnitt reduziert wird oder ganz entfällt (*Near-Net-Shape-Fertigung*). Auch Inserts lassen sich mit dem Verfahren sehr gut implementieren. Lediglich bei Verrippungen sind Einschränkungen zu beachten. Ein Beispiel für die abfallfreie Fertigung eines komplexen Bauteils zeigt Bild 2-3.

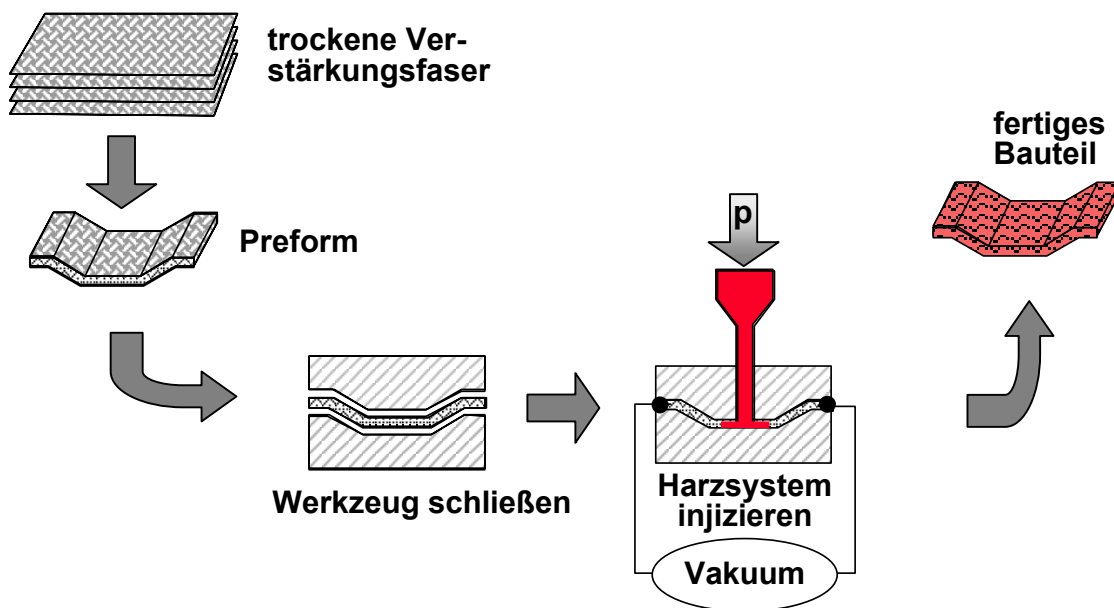


**Bild 2-3** Ausschnitt eines Spannrahmens, hergestellt im RTM-Verfahren

Gezeigt ist ein Ausschnitt eines Spannrahmens für Textilmaschinen. Sowohl die Realisierung von Maßgenauigkeit und nachbearbeitungsfreien, hochwertigen Oberflächen und Kanten als auch die Integration von metallischen Inserts zur Anbindung an bestehende Komponenten der Textilmaschine sind entscheidende Faktoren, die für den Einsatz der RTM-Technik sprechen [89].

### 2.1.3 Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding (VARTM)

Beim *Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding* (VARTM) werden die beiden zuvor beschriebenen Injektionsvarianten, also die Vakuum- und die Druckinjektion, kombiniert [90]. Um einen maximalen Fließfrontfortschritt zu erzielen, wird neben der unter Druck stattfindenden Harzinjektion zusätzlich an den Steigern evakuiert und so die Kavität entsprechend dem Ablauf in Bild 2-4 unter Vakuum gesetzt.



**Bild 2-4** VARTM-Verfahren

Eingesetzt wird diese Variante der Injektion vor allem zur Realisierung von Bauteilen mit einer sehr guten Qualität der Oberfläche (Bild 2-5). Durch die gewählte Kombination von Vakuum und Druck kann vor und während der Injektion der Vorteil des Vakuums zur Erreichung guter Oberflächenqualitäten genutzt werden. Nach dem Füllen der Kavität können durch Schrumpfung des Harzsystems auftretende Ablösungen des Bauteils von der

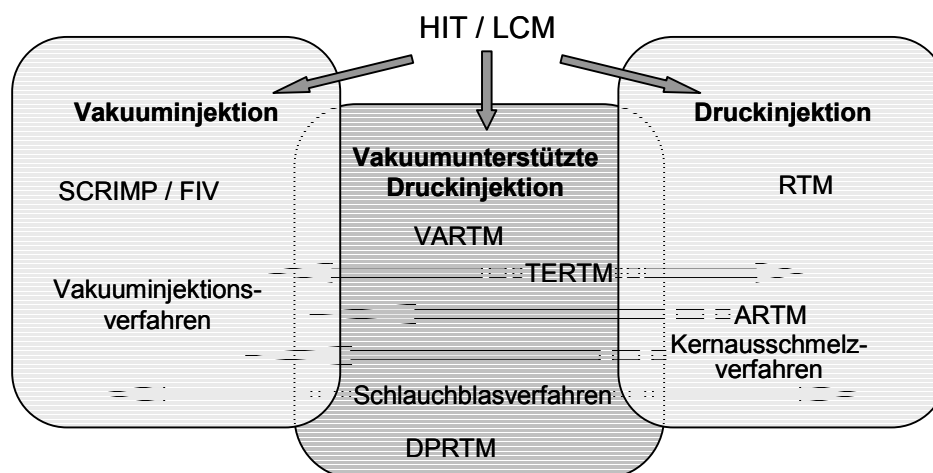
Werkzeugoberfläche durch ein Nachdrücken des Matrixsystems zum Ausgleich des Schrumpfes verhindert werden.



**Bild 2-5** Silikon-VARTM-Mehrfachwerkzeug mit Linienanguss, umlaufendem Steiger und polierten Metalleinsätzen zur Fertigung oberflächenschöner Bauteile

### 2.1.4 Weitere Verfahrensvarianten

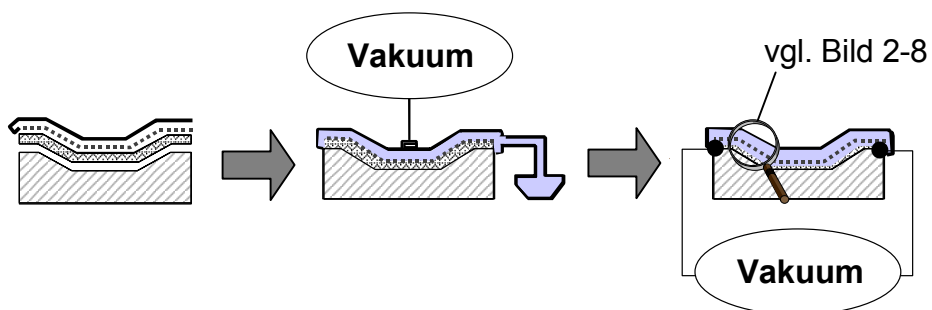
Die beschriebenen Verfahrensvarianten – Vakuum-, Druck- und kombinierte vakuumunterstützte Druckinjektion – stellen die Hauptvertreter der Harzinjektionstechnologie dar. Alle weiteren Verfahrensvarianten lassen sich grundsätzlich in eine der zuvor beschriebenen drei Hauptgruppen einordnen, d. h. sie nutzen zur Infiltration der trockenen Verstärkungsstrukturen einen der beschriebenen physikalischen Effekte. Bild 2-6 gibt eine Übersicht der verschiedenen Varianten, zugeordnet zu entsprechenden Hauptgruppen.



**Bild 2-6** Systematische Übersicht der verschiedenen Verfahrensvarianten

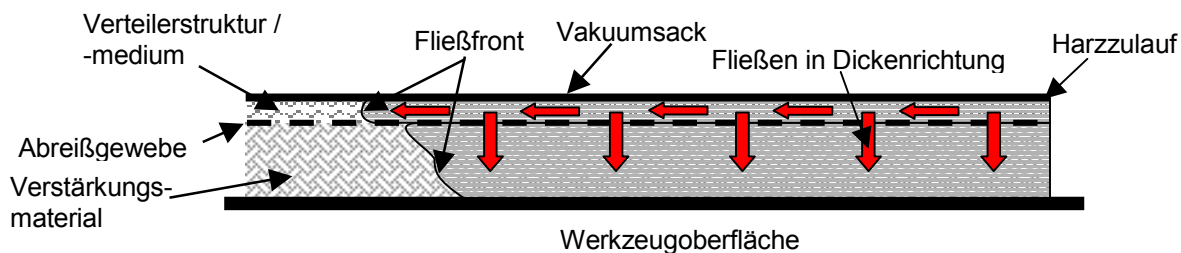
Der *Seemann Composites Resin Infusion Molding Process* (SCRIMP®) ist eine Variante der Vakuuminjektionstechnik [91]. Beim SCRIMP®-Verfahren handelt es sich um eine Fertigungsart, die bei der Firma *Seeman Composites* entwickelt wurde. Inzwischen ist daraus ein Joint Venture verschiedener Unternehmen entstanden, das den Namen SCRIMP®-Systems trägt. Verschiedene Weiterentwicklungen der ursprünglichen Idee des Harztransportes mittels einer hochpermeablen, flächigen Verteilerstruktur haben zur Etablierung des Flächeninjektionsverfahrens (FIV) als weiterer Herstellungsmöglichkeit geführt [92].

Wegen der vergleichsweise niedrigen Investitionskosten eignet sich das Flächeninjektionsverfahren (Bild 2-7) vor allem zur Herstellung von sehr großen, auch dreidimensional komplex geformten Strukturen. Dies wird ermöglicht durch das Einbringen der Matrix über die gesamte Bauteilgröße mit Hilfe einer Verteilerstruktur oder eines Verteilermediums, d. h. eines im Vergleich zur Verstärkungsstruktur leicht zu infiltrierenden Materials, in welchem sich das Harz zunächst sehr schnell über einer vorgegebenen Fläche ausbreiten kann und im Anschluss daran die darunter liegende Verstärkungsstruktur nur in z-Richtung tränkt.



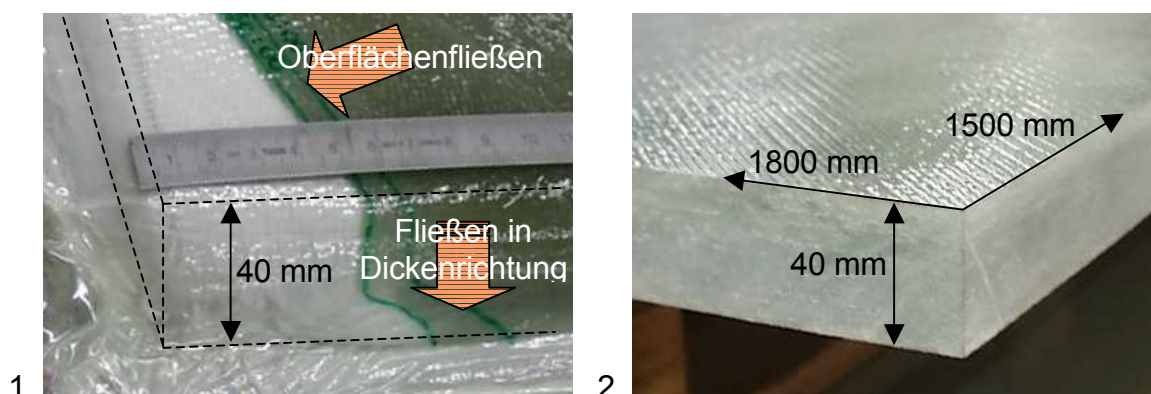
**Bild 2-7** Schematischer Ablauf des Flächeninjektionsverfahrens (FIV)

Eine detaillierte Betrachtung des Fließfrontfortschritts ist in Bild 2-8 an einem einfachen Laminataufbau dargestellt. Die Fließfront eilt in der Verteilerstruktur vor und tränkt den durch ein Abreißgewebe oder eine Lochfolie getrennten, darunter liegenden Lagenaufbau in z-Richtung. So sind die Fließwege in der niedrigpermeablen Verstärkungsstruktur kurz, während der eigentliche Harztransport durch die hochpermeable Verteilerstruktur erfolgt.



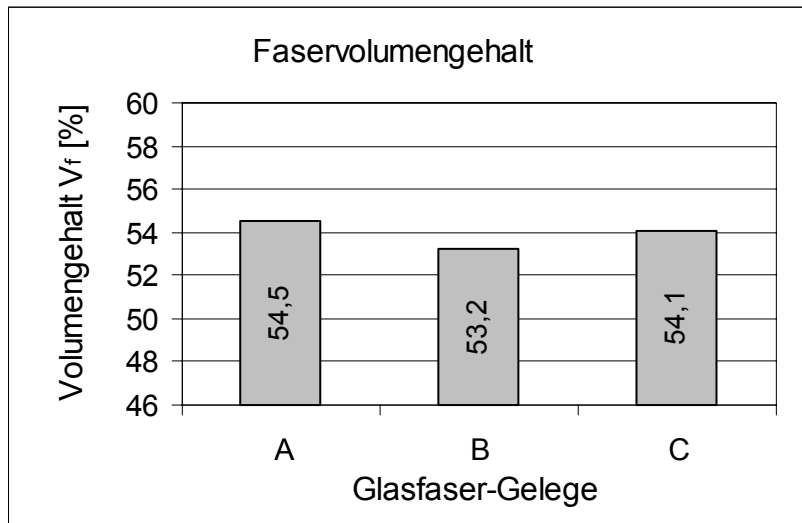
**Bild 2-8** Fließverhalten beim Flächeninjektionsverfahren (FIV)

Mit einem derartigen Aufbau können auch großflächige Strukturen mit Laminatdicken von mehreren Zentimetern realisiert werden (Bild 2-9). Die hergestellte Platte hat eine Dicke von 40 mm, eine Fläche von 1,8 x 1,5 m<sup>2</sup> und wurde über einen Zeitraum von nur ca. 30 min mit insgesamt 60 kg EP-Harz in die insgesamt 100 Lagen Glasfasergewebe bei einem Faservolumengehalt von  $V_f = 52\%$  infiltriert. Eine Einschränkung stellen hier vor allem die exotherme Reaktion des Matrixsystems und der mit der Dicke des Bauteils eintretende Wärmestau dar.



**Bild 2-9** Injektion (1) und bearbeitetes Bauteil (2) mit einer Dicke von 40 mm

Dieser sehr einfache Injektionsprozess, bei welchem die Vakuumkraft sowohl für die Kompaktierung des Lagenaufbaus als auch als treibende Kraft für die Tränkung der Verstärkungsstruktur mit der Matrix genutzt wird, erlaubt dennoch die Herstellung von Bauteilen mit guten Lamineigenschaften [93]. Das Ergebnis einer Untersuchung der Faservolumengehalte verschiedener Glasfasergelege, imprägniert mit einem Standard-VE-Harzsystem zeigt Bild 2-10.



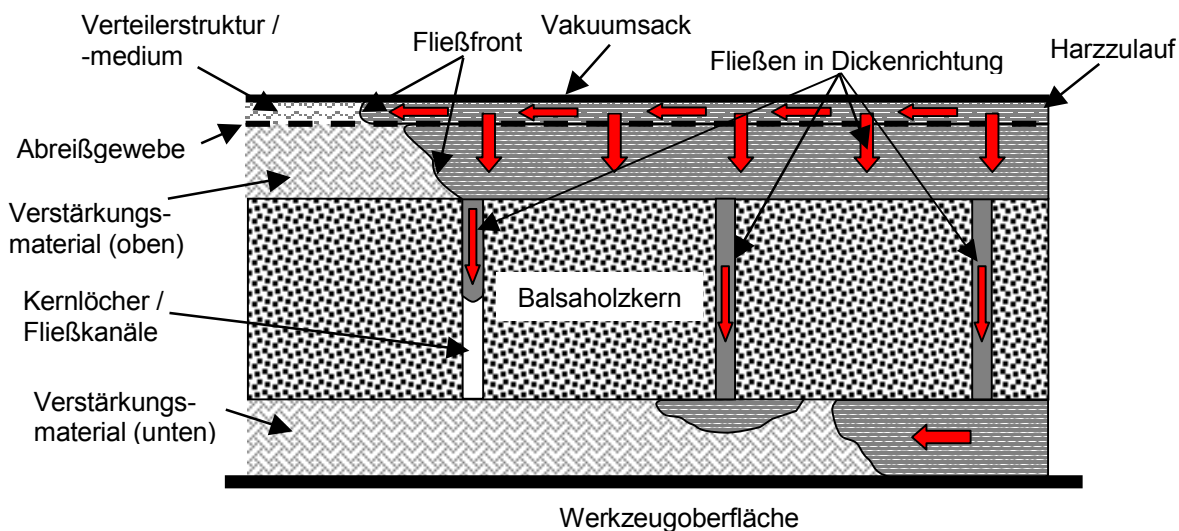
**Bild 2-10** Faservolumengehalt verschiedener Glasfaser-Gelege-Lamine

Im Mittel werden mit den untersuchten tri- und quadraxialen Glasfaser-Gelegen mit Flächengewichten von  $A = 1500 \text{ g/m}^2$ ,  $B = 2400 \text{ g/m}^2$  und  $C = 3000 \text{ g/m}^2$  Faservolumengehalte von  $V_f = 53,8 \%$  erreicht. Mit Materialien geringeren Flächengewichts sind aufgrund der höheren Packungsdichte Faservolumengehalte von bis zu  $58 \%$  realisierbar. Die Porengehalte von Elementen, die mit dem Flächeninjektionsverfahren hergestellt werden liegen dabei unter  $1 \%$ .

Eine Besonderheit stellt die Herstellung von Sandwichstrukturen dar. Hier muss zur Imprägnierung sowohl der oberen als auch der unteren Deckschicht eine Möglichkeit zum Durchfluss des Matrixsystems durch den Sandwichkern geschaffen werden. Dies geschieht, wie in Bild 2-11 dargestellt, beispielsweise durch das Einbringen von Löchern in den Kern, die als Fließkanäle den Harztransport ermöglichen.

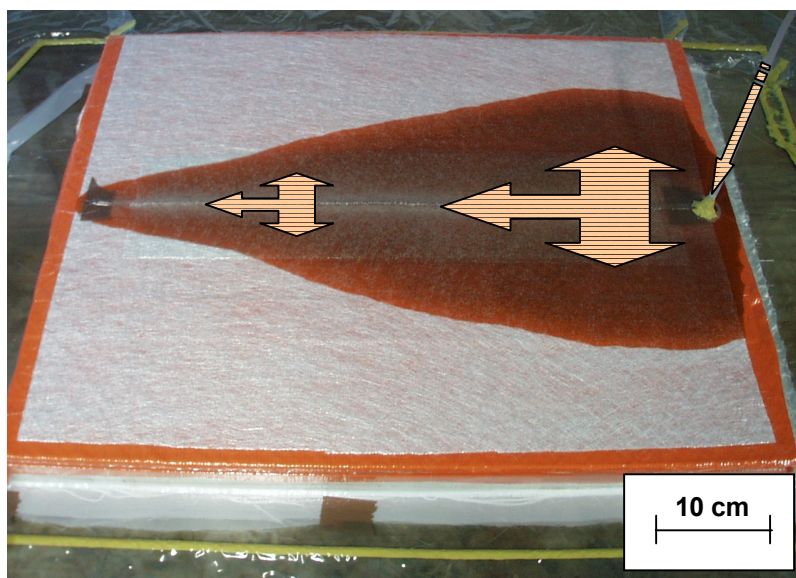
Zusätzlich zu dem in Bild 2-8 beschriebenen Vorgang bei der Herstellung einfacher Schalenstrukturen wird mit diesen Fließkanälen durch die Kernstruktur eine Imprägnierung der unteren Deckschicht sichergestellt. So erfolgt – neben der Tränkung der oberen Verstärkungslage – in Dickenrichtung zusätzlich ein Fließen durch den gesamten Aufbau und eine Tränkung der unteren Struktur über eine Vielzahl von Injektionspunkten.





**Bild 2-11** Fließverhalten beim Flächeninjektionsverfahren mit Sandwichaufbau

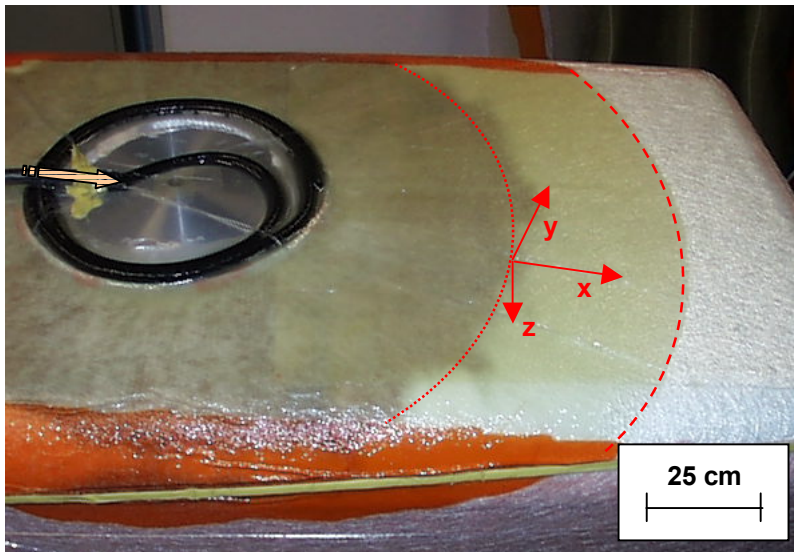
Eine Betrachtung dieser Vorgänge an einer einfachen Sandwichplatte in Bild 2-12 zeigt die rasche Ausbreitung des Harzes durch das Verteilermedium ausgehend von einem mittig angeordneten Linienanguss nach einer Injektionszeit von etwa 2 Minuten. Über die Positionierung des Verteilermediums kann der Fließfrontfortschritt so gesteuert werden, dass das Bauteil gleichmäßig und vollständig gefüllt wird.



**Bild 2-12** Herstellung einer ebenen Sandwichplatte im Flächeninjektionsverfahren

Die Umsetzung dieser Injektionstechnik in komplexen dreidimensionalen Strukturen ist analog möglich. Bild 2-13 zeigt die Herstellung eines Bauteils mit metallischem Insert, Dickensprüngen und einem 3-dimensional gefrästen Sandwichkern. Bei der Injektion dieses Strukturbauteils ist sehr deutlich der primäre Fließfrontfortschritt in der Verteiler-

ebene in x-y-Richtung sowie die sekundär stattfindende Durchtränkung der oberen Deckschicht in Dicken- (z-) Richtung zu erkennen.



**Bild 2-13** Herstellung einer dreidimensionalen Struktur im Flächeninjektionsverfahren

Mit dem Flächeninjektionsverfahren lassen sich große und entsprechend schwere Bauteile (im Bereich von bis zu 15 Tonnen) mit komplexen Geometrien herstellen. So werden beispielsweise komplette Schiffsaufbauten oder Pumpengehäuse für U-Boote gefertigt [94]. Auch Waggonaufbauten werden in diesem Verfahren produziert (vgl. Kap. 1.3). Von Vorteil sind die geringen Investitionskosten für Werkzeuge und Maschinen sowie die hervorragenden mechanischen Eigenschaften der Bauteile. Allerdings lassen sich nur Bauteile mit einer einseitig guten Oberfläche realisieren.

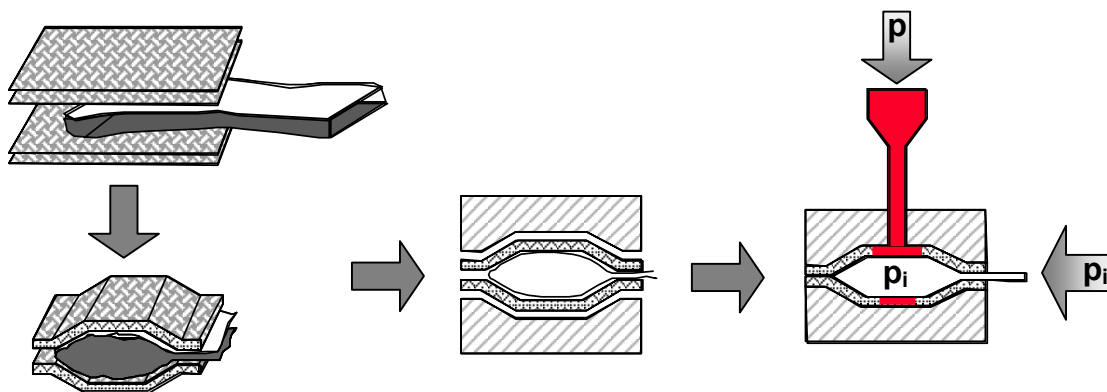
Das ARTM-Verfahren (*Advanced Resin Transfer Moulding*) beschreibt ein kombiniertes RTM- und Pressverfahren. Der Injektionsvorgang gleicht dem des RTM-Verfahrens. Allerdings wird das Werkzeug während der Injektionsphase nicht vollständig geschlossen. Erst mit der Füllung der Kavität wird das Werkzeug mit Hilfe einer geregelten Presse zugefahren [95]. Dies macht eine komplizierte Dichtungstechnik notwendig, die sich beispielsweise mit aufblasbaren und dadurch wegtoleranten Dichtungssystemen realisieren lässt. Aufgrund der aufwändigen Dichtungstechnik sind die Werkzeugkosten hoch. Von Vorteil sind die kurzen Zykluszeiten des ARTM-Verfahrens, da das Matrixmaterial wegen des niedrigen Faservolumengehalts bei nicht vollständig geschlossenem Werkzeug die Kavität schnell füllen kann.

Während der Anfangsphase der Injektion wird durch ein gesteuertes Übermaß der Kavitätshöhe die Durchströmung der Verstärkungsstruktur aufgrund des niedrigeren Faservolumengehalts erleichtert. So kann die Herstellung von FKV-Strukturen bauteilgrößen- oder zeitoptimiert realisiert werden. Zum Zeitpunkt einer ausreichenden Infiltration wird die Kavitätshöhe auf das Endmaß zusammengefahren. Matrixmaterial aus den schon imprägnierten Zonen wird verdrängt und steht der Tränkung noch trockener Bereiche zur Verfügung. Eine exakte Bestimmung des Zeitpunktes zur Verringerung der Kavitätshöhe ist dabei entscheidend, um zum einen den Fließfrontfortschritt nicht zu früh durch das Verringern der Kavitätshöhe zu stoppen und zum anderen keine Überfüllung des Werkzeuges mit der Gefahr des Austretens von überschüssigem Matrixmaterial zu erhalten. Vorteile dieser Fertigungsverfahren sind die Umsetzung hoher Faservolumengehalte bei vergleichsweise langen Fließwegen und kurzen Zykluszeiten. Durch die niedrigeren Fließwiderstände können auch Matrixsysteme mit höherer Viskosität verarbeitet werden. Aufgrund des niedrigen Fließwiderstandes bei der Injektion ist das Verfahren auch für große Bauteile geeignet. Allerdings muss in diesem Fall eine genügend große Presse vorhanden sein, was wiederum mit zusätzlichen Investitionskosten verbunden ist.

Das vom klassischen RTM-Verfahren abgewandelte TERTM-Verfahren (*Thermal Expansion Resin Transfer Moulding*) eignet sich vor allem zur Herstellung von zweischaligen Bauteilen. Als Unterschied zum RTM wird zusätzlich ein PUR- oder PI-Schaumkern mit verarbeitet, welcher als 'aktives Element' in den Prozessablauf integriert wird. Der Fertigungsprozess beginnt mit dem Umwickeln des Schaumkerns mit Verstärkungsmaterial und dem anschließenden Einlegen dieses Paketes in das Werkzeug. Danach erfolgt die Injektion des Matrixmaterials in die Kavität. Dieser Vorgang entspricht dem des RTM-Prozesses, lässt sich generell aber auch mit einem Vakuuminjektionsprozess oder einer kombinierten Variante fertigen. Anschließend wird die komplette Form getempert. Durch die kontrollierte Zufuhr von Wärme erfolgt eine gesteuerte Expansion des Schaumkerns [96]. Die so induzierte Verdrängung des Matrixmaterials führt zu höheren Faservolumengehalten, hat aber während der Injektionsphase zunächst eine schnellere Durchtränkung der Faser erlaubt (ARTM-Effekt). Aufgrund der hohen Investitionskosten – Vorfertigung von Schaumkernen und Einsatz leistungsfähiger Temperieranlagen – ist das Verfahren nur für die Großserienfertigung wirtschaftlich. So werden beispielsweise 50.000 Kanupaddel pro Jahr im TERTM-Verfahren produziert [97].

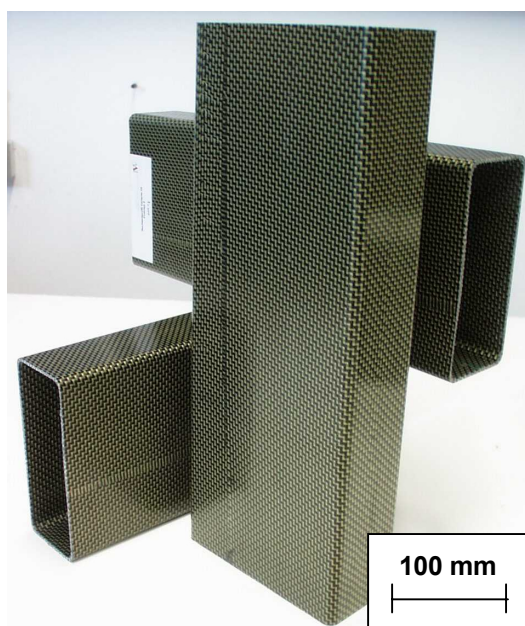
Eine weitere Umsetzung der Idee des ARTM – die geregelte Kontrolle des Faservolumengehaltes während des Injektionsprozesses – aus dem Bereich der vakuumunterstützten Druckinjektionsverfahren ist das DPRTM (*Differential Pressure Resin Transfer Moulding*) oder SLI (*Single Line Injection*). Mit Hilfe eines Autoklaven wird während der Druckinjektion durch ein gesteuertes Vakuum mit einem niedrigen Differenz-Außendruck auf die flexible Werkzeugoberseite und damit bei einem niedrigen Faservolumengehalt die Imprägnierung durchgeführt. Anschließend wird durch eine Drucksteigerung nachgepresst und bei einem hohen Faservolumengehalt ausgehärtet. Der Hauptvorteil dieses Verfahrens liegt in der Möglichkeit der Herstellung qualitativ sehr hochwertiger, komplexer Strukturen. Besonderer Nachteil dieser Version ist der Autoklav, der neben den hohen Investitionskosten vor allem auch wegen der extrem langen Zykluszeiten nur für sehr spezielle Bauteile in Kleinserien (Flugzeugbau) eine wirtschaftlich sinnvolle Fertigung erlaubt.

Beim Schlauchblas-RTM-Verfahren handelt es sich um eine Kombination aus Schlauchblas- (Spritztechnik) und RTM-Verfahren, mit dem sich komplexe Hohlkörperbauteile mittlerer Seriengröße herstellen lassen [98]. Dazu wird ein Vorformling (Preform) hergestellt, bei dem die textile Verstärkungsstruktur um einen flexiblen Blaschlauch gelegt ist. Diese Preform wird in ein geeignetes Werkzeug eingelegt. Nach dem Schließen wird der Blaschlauch mit dem Innendruck ( $p_i$ ) beaufschlagt, so dass sich die Verstärkung gleichmäßig an die Werkzeugwand anlegt [99]. Anschließend wird das Matrixsystem in die durch Blaschlauch und Werkzeugwand entstandene Kavität mit dem Injektionsdruck  $p < p_i$  injiziert (Bild 2-14).



**Bild 2-14** Schlauchblas-RTM-Verfahren

Während der Injektionsphase muss sichergestellt werden, dass der Druck  $p_i$  im Blastschlauch immer größer ist als der Injektionsdruck  $p$ . Während der Aushärtephase wird ein hoher Überdruck im Blastschlauch gehalten, oder dieser sogar noch gesteigert, wodurch die exakte Abformung der Werkzeugoberfläche gewährleistet wird und eine hohe Oberflächenqualität auf der Außenseite des Formteils entsteht [100]. Durch den Blastschlauch auf der Innenseite des Formteils entsteht auch dort eine Oberfläche mit guter Qualität. In Bild 2-15 sind im Schlauchblas-RTM-Verfahren hergestellte Profile für eine Anwendung im KFZ-Bereich dargestellt.



**Bild 2-15** Im Schlauchblas-RTM-Verfahren hergestellte Profile für eine KFZ-Struktur

Eine weitere Möglichkeit zur Herstellung von Hohlkörpern ist das Kernausschmelzverfahren. Hier wird anstatt eines durch Innendruck formgebenden Schlauchs ein fester Kern in einem einfachen Werkzeug hergestellt. Als Material wird beispielsweise ein bei niedrigen Temperaturen ( $< 80^{\circ}\text{C}$ ) schmelzendes Metall verwendet [101]. Anschließend werden alle Deckschichten und lokale Verstärkungen um den Kern gelegt. Dieses Preformpaket wird in das Formwerkzeug eingelegt. Die Injektion erfolgt analog zum RTM-Verfahren. Nach der Aushärtephase wird die Temperatur noch im Werkzeug oder auch am schon entformten Bauteil kurzzeitig erhöht, um den Kern über eine kleine Öffnung herauszuschmelzen. Vorteile bietet diese Variante der HIT für geometrisch sehr komplexe Bauteile. So wird beispielsweise der Heckspoiler für ein Sondermodell des Porsche 911 in diesem Verfahren gefertigt.


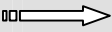




## 2.2 Harzinjektionstechniken – Überblick

Die folgende Tabelle 2-1 (Teil 1 und 2) fasst einige Aussagen aus den Beschreibungen der verschiedenen vorgestellten Verfahrensvarianten zusammen und stellt diese übersichtlich dar.

**Tabelle 2-1.1** Übersicht der Verfahrensvarianten der Harzinjektionstechnik (HIT)

	VI	RTM	Schlauchblas-RTM	TERTM
<b>Faservolumengehalt</b>	40 - 50%	40%, max 60%	bis 60%	höherer Faservolumengehalt als RTM, 65%
<b>Oberflächen</b>	sehr gut	gut - sehr gut; befriedigend (für zu lackierende Oberflächen)	gut	gut
<b>Lufteinschlüsse, Delamination</b>	luftblasenfrei	möglich	Kompression in Radien problematisch	möglich, durch Kernaushdehnung aber gering
<b>Bauteilgröße</b>	begrenzt, Fließwege max. 1 m, durch Modifizierung > 2 m	5 m <sup>2</sup>	← anlagentechnische Einschränkungen	
<b>komplexe Geometrien</b>	gut	gut - sehr gut	gut	gut
<b>Inserts</b>	sehr gut	sehr gut	sehr gut	sehr gut
<b>Rippen</b>	gut	befriedigend, (3° Entformungsschrägen)	←	
<b>Radien</b>	wie RTM	R > 3 mm bei vorgeformten Faserstrukturen R > 5 mm bei Matten und Geweben	Problem: Schlauch muß auch in Ecken kommen, R <sub>min</sub> = 10 mm	
<b>max. Dicke</b>				← bis 10 mm sinnvoll,
<b>Formeinschränkungen</b>	← allgemein schwierig sind Hinterschnitte (Werkzeugkosten), zu			
<b>Seriengröße pro Jahr</b>	über 2.000	ca. 50.000	ca. 10.000	ca. 50.000
<b>Zykluszeit</b>	5 - 60 min	5 - 25 min	20 - 60 min	6 min (mit speziellen EP-Harzen)
<b>Invest.-aufwand</b>	sehr gering	gering	mittel	mittel
<b>Vorteile / Nachteile</b>	geringe Kosten	Endmaßfertigung (20% weniger Abfall)	Verfahrenstechnik optimieren, konst. Wanddickenverteilung in stark gekrümmten Bereichen, Querschnittsänderungen garantieren	Kosten für Vorfertigung von Schaumkernen, leistungsfähige Temperieranlagen notwendig, evtl. Ofen zum aufheizen

**Tabelle 2-1.2** Übersicht der Verfahrensvarianten der Harzinjektionstechnik (HIT)

ARTM	Kernausschmelzverfahren	DPRTM / SLI	FIV	
niedriger Faservolumengehalt, 40%	40 - 60%	bis 65%	40 - 50%	<b>Faservolumengehalt</b>
mittel, da hohe Fließgeschwindigkeit	gut - sehr gut, befriedigend (für zu lackierende Oberflächen)	gut - sehr gut	sehr gut (einseitig)	<b>Oberflächen</b>
möglich, da hohe Fließgeschwindigkeit, schnelle Tränkung	Lufteinschlüsse beim Aufeinandertreffen der Fließfronten möglich	luftblasenfrei	luftblasenfrei	<b>Lufteinschlüsse, Delamination</b>
	aufgrund der Fertigungskomplexität begrenzt	durch Autoklav beschränkt	sehr groß (15t)	<b>Bauteilgröße</b>
eingeschränkt (Schließvorgang)	gut	gut	gut – sehr gut	<b>komplexe Geometrien</b>
eingeschränkt.	sehr gut	sehr gut	sehr gut	<b>Inserts</b>
stark vereinfacht wird die Herstellung von verrippten Bauteilen durch den Einsatz von Vorformlingen				<b>Rippen</b>
	 wie RTM 			<b>Radien</b>
> 10 mm möglich				<b>max. Dicke</b>
vermeiden sind extrem kleine Radien sowie extreme Dickensprünge				<b>Formeinschränkungen</b>
geschätzt bis 100.000	ca. 50.000	2.000 - 5.000	ca. 1.000	<b>Seriengröße pro Jahr</b>
niedrig, < 5 min	5 - 45 min	30 - 180 min (Autoklav)		<b>Zykluszeit</b>
relativ hoch	mittel	hoch	gering	<b>Invest.-aufwand</b>
aufwändiges Dichtungsprinzip des Werkzeugs	kein Konturbeschnitt nötig	Autoklav stellt Grenzen an Bauteilgröße	geringer Prozessaufwand, manuelle Bearbeitung	<b>Vorteile / Nachteile</b>



## 2.3 Ganzheitliche Betrachtung des HIT-Fertigungsprozesses

Die Vorteile der beschriebenen Verfahrensvarianten der Harzinjektionstechnik lassen sich wie folgt zusammenfassen [102]:

- Herstellung komplexer und großflächiger Bauteile
- Schalen-, Sandwich- und Hohlkörperbauweise
- definierte Faserablage durch Preforms (lokale Verstärkung, *Near-Net-Shape*)
- hohe Faservolumenanteile ( $V_f$  bis ca. 65 %)
- höchste Bauteilqualität (geringe Porosität < 1 %)
- Verwendung von Inserts
- niedrige Investitionskosten (sowohl in Werkzeugen als auch Maschinen)
- weitestgehend automatisierbar
- wirtschaftliche Verfahren für kleine und mittlere Serien, großserientauglich
- geringes gesundheitliches Gefährdungspotenzial (geschlossenes System).

Die Bausteine aller Verfahrensvarianten sind dabei die gleichen:

- Matrix (Harzsystem)
- Faser (Verstärkungsstruktur / Preform)
- Werkzeug (Angussystem, Oberfläche, Temperierung)
- Injektion (Kontrolle des Fließfrontfortschritts bzw. der Imprägnierung der Fasern)
- Aushärtung und Entformung

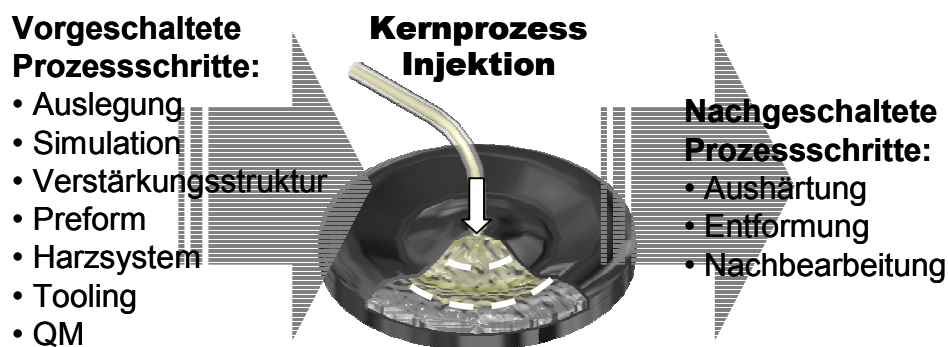
Mit der technologischen Entwicklung der gesamten Fertigungsfamilie der Harzinjektionsverfahren hin zu größeren Stückzahlen und der Etablierung des Verfahrens auch als großserientaugliche Alternative zu anderen Techniken, müssen die oben genannten Prozessschritte und Prozessparameter in ihrer Gesamtheit betrachtet, aufeinander abgestimmt und optimiert werden. Im Sinne einer umfassenden Kontrolle des Fertigungsprozesses bei allen Verfahrensvarianten der Harzinjektionstechnologie ist diese ganzheitliche Betrachtung des Herstellungszyklus wichtig [103]. Nur eine Betrachtung aller miteinander verflochtenen Faktoren – vom Werkzeug, der Verstärkungsstruktur (Preform) und dem Matrixsystem über das Fertigungsverfahren bis zum fertigen Bauteil – führt zu dem Ergebnis eines ganzheitlichen Verständnisses der Injektionstechnologie, damit einer möglichst vollständigen Umsetzung der Potenziale und so zur Beherrschung



eines optimalen Prozessablaufs. Eine Schlüsselposition nimmt dabei die Injektion als Kern der gesamten Herstellungskette ein.

## 2.4 Der Kernprozess

In Wechselwirkung mit allen anderen Prozessschritten, die mitverantwortlich für den Ablauf der Fertigung sind, werden bei der Injektion des Matrixsystems in die geschlossene Form die Einzelkomponenten des späteren Bauteils zusammengeführt (Bild 2-16) [104]. Dieser Prozessschritt nimmt damit eine Schlüsselfunktion als Kern der Prozesskette aller Harzinjektionstechniken ein [105].



**Bild 2-16** Kernprozess mit vor- und nachgeschalteten Arbeitsschritten

So bedingen Matrix und Verstärkungsstruktur einander und beeinflussen nachhaltig auch den Injektionsprozess. Dieser wiederum hat sowohl als Prozessschritt mit den dort bestehenden Prozessparametern als auch aufgrund der Zusammenführung der einzelnen Elemente einen Einfluss auf die geforderten mechanischen Eigenschaften des fertigen Bauteils [106]. Weiterhin sind Faservolumengehalt, Faserausrichtung und Verstärkungsstrukturen von gleicher Relevanz wie die Werkzeuggeometrie und die Eigenschaften des zu injizierenden Harzsystems. Zusätzlich spielen Parameter wie Injektionsdruck, die Temperaturführung von Werkzeug und Harzsystem oder auch die Art, Anzahl und Verteilung der Injektionspunkte und deren Zu- oder Abschaltung (Injektionsstrategie) eine entscheidende Rolle [107].

Die Überwachung des Fließfrontfortschritts während der Injektion in geschlossenen Formen ist vor diesem Hintergrund aus mehreren Gründen von Interesse [108]. Zunächst ist für die Simulation die Bestimmung von Permeabilitätswerten als Ergebnis der

Beobachtung des Fließfrontfortschrittes von Flüssigkeiten in Verstärkungsstrukturen, die durch Versuche an entsprechenden Lagenaufbauten vorgenommen werden, von besonderem Interesse. Zusätzlich erhält die Simulation über die *online* Messwerte ein Feedback. Darüber hinaus ist ein grundsätzliches Verständnis der auftretenden Fließmechanismen wichtigste Grundlage für das Nachvollziehen der Füllvorgänge im Werkzeug [109]. Dies beinhaltet insbesondere die Kontrolle und Sicherstellung der Imprägnierung unterschiedlicher Verstärkungsstrukturen entsprechend den geforderten mechanischen und konstruktiven Eigenschaften des Bauteils. So dient die Prozesskontrolle der Optimierung der Zykluszeiten [110]. Im weiteren ermöglicht die Feststellung der Fließwege eine Aussage über die bestehenden Faservolumengehalte, eventuelle Faserverschiebungen oder auch mögliche Lufteinschlüsse oder Porenbildungen und ist somit wichtiges Mittel der Qualitätssicherung [111]. Eine besondere Bedeutung kommt den gewonnenen Daten als Basis für die Prozessregelung und -steuerung zu [112]; dabei kann *online* die Injektion mit bestehenden Daten der Simulation oder vorangegangenen Injektionen verglichen werden und aktiv, z.B. über diverse Injektionspunkte oder kontrollierte Kavitätshöhen (ARTM), in den Prozess eingegriffen werden.

Die Schwierigkeit, den Fließfrontfortschritt in Abhängigkeit von Verstärkungsstruktur, Injektionstechnik, Bauteilgeometrie, Viskositäts- und Härtingsverlauf der eingesetzten Matrixsysteme sowie aller weiteren beschriebenen, den Prozess beeinflussenden Faktoren im geschlossenen Werkzeug zu beobachten, ist allen vorgestellten Verfahrensvarianten der Harzinjektionstechnik gleich.

Hier können detaillierte Informationen und Daten des Kernprozesses zu einer möglichen Verkürzung der Prozessentwicklungszeiten und/oder des Herstellungsprozesses selbst führen sowie durch eine dann gezielte Veränderung der Steuerungs- und Regeldaten die Reduzierung des Fertigungsausschusses ermöglichen [113].

### 3 Bestimmung der Fließfront in geschlossenen Formen

#### 3.1 Ausgangssituation

Mit der Feststellung, dass die Potenziale der Harzinjektionstechnologien auch zukünftig nur dann vorteilhaft in einer industriellen Produktion umgesetzt werden können, wenn der gesamte Prozessablauf messtechnisch vollständig erfasst ist, und dabei dem Injektionsprozess als Kern der gesamten Fertigung eine Schlüsselrolle zukommt, wird deutlich, wie wichtig eine online Fließkontrolle mit einer kontinuierlichen Beschreibung der Füllvorgänge ist und welche Entwicklungsmöglichkeiten die detaillierte Beschreibung dieses Prozessschrittes im geschlossenen Werkzeug erschließt.

Die Untersuchung bzw. die Kenntnis der aktuellen Position der Fließfront, also das Fortschreiten der Imprägnierung der trockenen Verstärkungsstruktur im geschlossenen Werkzeug während der Injektion, macht eine

- online Fertigungskontrolle, -dokumentation, -steuerung bzw. -regelung (Zykluszeiten)
- online Qualitätskontrolle (Porenbildung, Faserverschiebung, Faservolumengehalt)
- Permeationsmessung
- Simulationsdatengewinnung (online Abgleich von Füllbildvorhersage und tatsächlichem Injektionsverlauf)

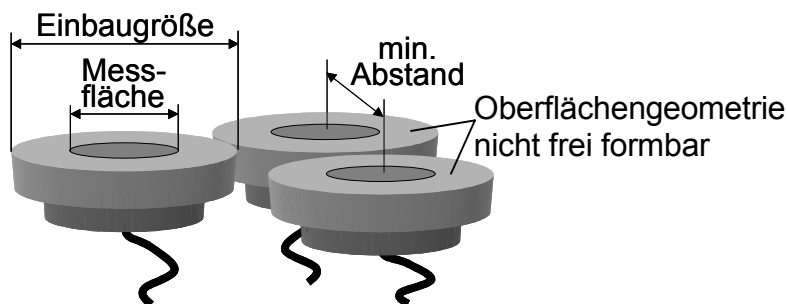
erst möglich. Die Schlüsselstellung, die einer online Fließkontrolle der Harzinjektionstechniken zukommt, spiegelt sich in den vielfältigen Ansätzen zur Lösung dieses Problems wider [114]. Nachfolgend sollen die wichtigsten bisher entwickelten Messmethoden zur Erfassung in geschlossenen Werkzeugen vorgestellt und die Notwendigkeit der Entwicklung eines den industriellen und verfahrenstechnischen Anforderungen gerecht werdenden Messsystems aufgezeigt werden.

## 3.2 Beschreibung bestehender Messsysteme

### 3.2.1 Druck-, Temperatur- und Dielektrizitätssensorik

Die Umsetzung der Messaufgabe 'Bestimmung der Fließfront in geschlossenen Werkzeugen zur kontinuierlichen Darstellung des Imprägnierungsvorganges' ist grundsätzlich mit bestehenden Systemen wie Druck- [115] und Temperatursensoren [116] oder mit Sensoren zur Messung des dielektrischen Feldes [117, 118, 119] möglich. Diese Sensoren sind Stand der Technik und können mit verhältnismäßig geringem Aufwand im Werkzeug integriert werden. Von Vorteil ist dabei, dass die Sensoren als werkzeugseitig integrierte Elemente keinen Einfluss auf den Prozess selbst ausüben. Weiterhin ist durch die feste Montage im Werkzeug kein besonderer Arbeitsaufwand zur Platzierung der Sensorik von Zyklus zu Zyklus – wie beispielsweise bei den später beschriebenen Messwertaufnehmern, die mit der Verstärkungsstruktur eingelegt werden – notwendig. Problem dieser Druck-, Temperatur- und Dielektrizitätssensoren oder Sensoranordnungen ist die Singularität der Informationsgewinnung. Mit jedem Sensor kann an der entsprechenden Position im Werkzeug nur einmal ein Signal mit der für die Bestimmung der Fließfront entscheidenden Information 'Harz angekommen' dargestellt werden. Mit '0 – Verstärkungsstruktur trocken' bzw. '1 – Verstärkungsstruktur imprägniert' steht damit nur ein Minimum an Informationen an jeder Sensorposition zur Verfügung.

Eine weitere Einschränkung erfährt die Durchführung von Messungen mit Sensoren dieser Art durch die geometrischen Abmessungen und die baulich vorgegebenen Mindestabstände der Sensoren. Da die Oberflächengeometrien der Sensoren nicht frei wählbar sind, müssen zudem deren Positionen im Werkzeug in Abhängigkeit der Einbauabmessungen in ausreichendem Abstand von Kanten, Rippen oder sonstigen für die Messung eigentlich interessanten Zonen eingefügt werden. Damit ist der Nutzen dieser Systeme stark eingeschränkt. Bild 3-1 zeigt die Grenzen des messtechnischen Einsatzes der bestehenden Messsysteme aufgrund der geometrischen Restriktionen.



**Bild 3-1** Geometrische Restriktionen bestehender Sensorsysteme

Eine zukünftige Verbesserung durch Miniaturisierung der Sensoreinheiten ist zwar abzusehen, es bleibt aber auch weiterhin mit den bestehenden physikalischen Wirkprinzipien der Sensoren schwierig, diese jeder gewünschten Geometrie im Werkzeug anzupassen, um so größtmögliche Freiheit bei der Positionierung der Sensoren zu erzielen.

Die Informationsgewinnung mit einer begrenzten Anzahl an Sensoren und den mit diesen Sensoren zu erfassenden Beobachtungsdaten der Fließfront ('0' und '1') lässt so eine nur sehr eingeschränkte Darstellung des Ausbreitungsverhaltens vor allem komplexer Fließvorgänge der Matrix im geschlossenen Werkzeug zu.

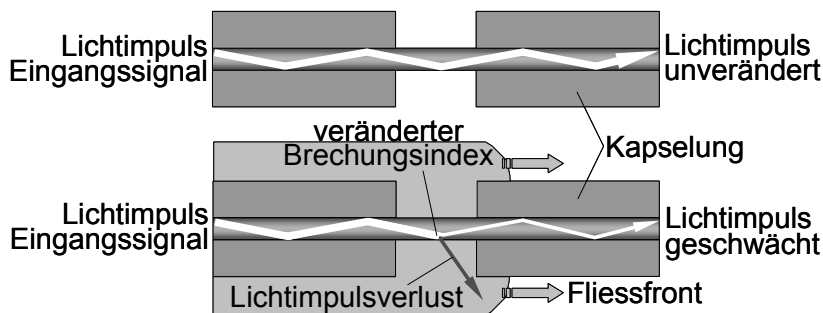
Mit dem Einsatz von Sensorpunkten ist grundsätzlich nicht zu jedem Zeitpunkt  $t$  innerhalb eines Zeitfensters ein Signal verfügbar. Vielmehr steht nur genau zu dem diskreten Zeitpunkt, an dem die Fließfront den entsprechenden Sensor überstreicht, eine Signaländerung und damit eine (verschmierte) Informationsgewinnung zur Verfügung. Da zu praktisch keinem Zeitpunkt die im Werkzeug verteilten Sensoren gleichzeitig ein Signal zur momentanen Position der Ausbreitung der Harzfront liefern, muss der Imprägnierverlauf zwischen den einzelnen Sensoren durch Iteration bestimmt werden. So stehen die Daten zur Position  $P_x$  der Fließfront zwischen zwei Sensorpunkten  $P_1 < P_x < P_2$  erst dann zur Verfügung, wenn Punkt  $P_2$  erreicht wird und dem Zwischenraum mittels Iteration zu jedem Zeitpunkt  $t_x$  ein Wert der Position der Fließfront zugeordnet werden kann. Damit ist eine Echtzeitdarstellung unmöglich.

Die Beschreibung der Lage der Fließfront zu tatsächlich jedem Zeitpunkt ist nur möglich, wenn kontinuierlich eine Information der Sensorik auch bei komplexen Fließvorgängen zur Verfügung gestellt wird.

### 3.2.2 Lichtwellenleiter und Netzstrukturen

Einen neuen Weg gehen Entwicklungen, die beispielsweise Lichtwellenleiter nutzen, mit deren Hilfe ein netzartiger Aufbau mit vielfachen Messpunkten definiert werden kann. Der Einsatz dieser Sensoren erlaubt im Gegensatz zu den zuvor beschriebenen Typen eine sehr viel feinere Auflösung der Ausbreitung eines Harzsystems. Der Aufbau soll am Lichtwellenleiter und am SMARTweave<sup>®</sup>-Prinzip erläutert werden. Bei beiden Systemen werden die Sensoren in der Verstärkungsstruktur integriert und mit dieser in das Werkzeug eingelegt.

Der Lichtwellensensor ist entsprechend Bild 3-2 aufgebaut.



**Bild 3-2** Überwachung des Fließfrontfortschritts mittels eingebetteter Lichtwellenleiter

Ein gekapselter Lichtwellenleiter wird von einem Lichtimpuls durchlaufen. Da der Lichtwellenleiter in diskreten Abständen von der Kapselung befreit ist, ändert sich nach dem Überstreichen dieser Stellen mit Harz der Brechungsindex  $n$  der Grenzflächen nachhaltig [120]. Mit der Änderung des Brechungsindex an der Stelle  $x$  ändert sich auch das weitergeleitete Messsignal. Diese Änderungen beschreiben mit jeder weiteren entkapselten Stelle die Benetzung des Lichtwellenleiters und damit den Fließfrontfortschritt und die Imprägnierung der Verstärkungsstruktur [121]. Bei sehr geringen Abständen der Messstellen zueinander ist so ein feines Messraster zu erzeugen, welches eine detaillierte Betrachtung des Fließfrontfortschrittes erlaubt.

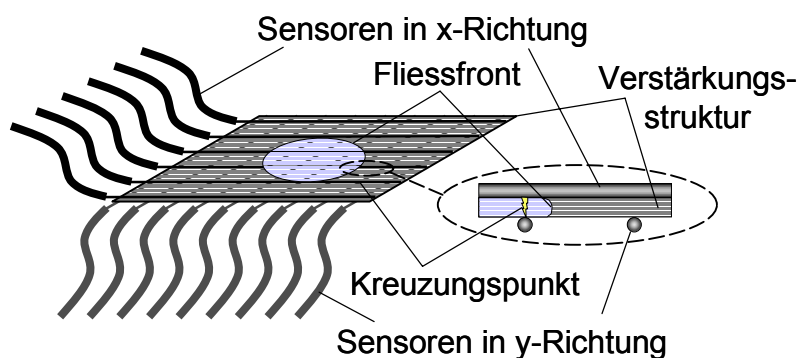
Mit der faseroptischen Messmethode kann zusätzlich die Aushärtung des Harzes, basierend auf der Änderung dessen optischer Eigenschaften, dokumentiert werden [122]. Der Brechungsindex  $n$ , die Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c$  und die Wellenlänge  $\lambda$  des Lichts im Harz erfahren eine Änderung. Aufgrund des elektromagnetischen

Wellencharakters des Lichts sind auch die Dielektrizitätszahl und die Ausbreitungsgeschwindigkeit bzw. Wellenlänge nach

$$\varepsilon = \left( \frac{c_0}{c} \right)^2 = \left( \frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^2 \quad (3-1)$$

zusammenhängend ( $\varepsilon$  Dielektrizitätskonstante,  $c_0$ ,  $\lambda_0$  im Vakuum) [123]. Mit einer geeigneten Auswertung – das Messsignal des Lichts wird, je nach Messverfahren, in einem Spektrometer oder einem Fotodetektor analysiert – ist anhand der eingebetteten Lichtwellenleiter zusätzlich eine Bestimmung der Aushärtereaktion des Harzsystems möglich.

Eine weitere Option zur Bestimmung der Fließfront im geschlossenen Werkzeug ist die Nutzung des SMARTweave<sup>®</sup>-Systems [124]. Die Erfassung der Daten im Werkzeug erfolgt nach einem Aufbau entsprechend Bild 3-3.



**Bild 3-3** Überwachung der Harzausbreitung mittels eingebetteter SMARTweave<sup>®</sup>-Struktur

Mit der Verstärkungsstruktur wird ein elektrisch leitfähiges Netz in das Werkzeug eingelegt. Dieses Netz ist in x- und y-Richtung jeweils durch eine nicht leitende Verstärkungslage getrennt. Das so aufgebaute Netz liefert an jedem Kreuzungspunkt eines Leiters in x-Richtung mit einem Leiter in y-Richtung dann ein Signal bzw. eine Signaländerung, wenn die dazwischen liegende Verstärkungsstruktur mit Harz getränkt wird und das elektrische Feld so eine Änderung erfährt. Entsprechend der Feinheit der aufgebauten Sensor-Matrix kann damit von Knotenpunkt zu Knotenpunkt eine Darstellung der Ausbreitung des Harzsystems erfolgen.

Ein Problem dieser Verfahren mit in der Verstärkungsstruktur integrierten Sensoren stellt genau diese Integration selbst dar. Beispielsweise führt die Kompaktierung der Verstärkungsstruktur, das Verschieben von Faserbündeln und damit auch des in dieser Struktur eingebundenen Sensors zu Ungenauigkeiten bezüglich der absoluten geometrischen Koordinaten des Ortes der Signalgewinnung. Die notwendigen Zwischenlagen (z.B. eine nicht leitfähige Verstärkungslage) schränken die Einsatzmöglichkeiten weiter ein. Durch diese Zwischenlagen ist auch die Anzahl  $n$  der zu realisierenden Messebenen abhängig von der Anzahl der zur Verfügung stehenden Verstärkungslagen ( $n+1$ ).

Weitere Schwierigkeiten stellen neben der Informationsgewinnung gerade in den kritischen Werkzeugbereichen vor allem die zwar wesentlich gesteigerte aber letztlich weiterhin endliche Anzahl an Informationspunkten dar, welche wiederum zu diskreten Zeitschritten mittels Iteration in Beziehung zueinander gebracht werden müssen, um ein zusammenhängendes Bild der Fließfront zu erhalten. Weiterhin kann das Herausführen der einzelnen Anschlüsse aus dem geschlossenen Werkzeug über die Dichtungsflächen oder über spezielle Durchführungen den Kernprozess beeinflussen.

Der Verbleib der Sensoren im fertigen Bauteil, wo diese beim späteren Einsatz unter den gegebenen mechanischen Belastungen stören oder sogar zum Versagen des Bauteils führen können, ist ein weiterer kritischer Punkt.

Der Einsatz dieser Gruppe von in der Verstärkungsstruktur integrierten Sensoren erlaubt aber im Gegensatz zu anderen Sensorsystemen über ein gezieltes Aufbauen des Messgitters durch die verschiedenen Lagen beispielsweise sehr dicker Bauteile eine räumliche Darstellung des Strömungsbildes im Werkzeug.

### **3.2.3 Piezoelektrische Sensoren**

Mit der Entwicklung piezoelektrischer Sensoren steht in Zukunft auch vor dem Hintergrund einer weiteren Miniaturisierung der Piezoelemente ein sehr flexibles und leistungsstarkes Messsystem zu Verfügung. Die Möglichkeiten der Formgebung und geometrischen Anpassung an bauteil- und werkzeugspezifische Anforderungen sind hier besondere Vorteile. Diese Sensorsysteme müssen aber gerade an die im Fertigungsprozess der Harzinjektionstechnik auftretenden hohen mechanischen Belastun-



gen (Injektions- und Kompaktierungsdruck, Werkzeugbeschickung und Entformung, Reinigung und Oberflächenveredelung) angepasst werden. Verschiedene Arbeiten beschäftigen sich mit der Entwicklungen zur Integration dieser Sensortechnik im Werkzeug und damit zum Einsatz in einer industriellen Fertigung [125].

### 3.3 Defizite der bestehenden Messsysteme

Die bestehenden und vorgestellten Lösungsansätze – mit herkömmlichen Druck- oder Temperatursensoren, einem piezoelektrischen Messaufbau oder auch mit dem Aufbau eines Sensornetzes in der Verstärkungsstruktur – erfüllen nur teilweise und ungenügend die Anforderungen zur lückenlosen Dokumentation des Kernprozesses der Harzinjektionstechnik.

Unwägbarkeiten bei der Feststellung der tatsächlichen Fließfrontposition mit in der Verstärkungsstruktur integrierten Messaufbauten oder die Ungenauigkeit bei der Bestimmung der Fließfrontposition aus Iterationsschritten von Messpunkt zu Messpunkt mit einer nur sehr eingeschränkten Anzahl von tatsächlichen Informations- und Datenpunkten sind nur einige der beschriebenen Defizite. Was fehlt, ist ein System, welches

- werkzeugseitig fest integriert ist,
- eine dem Fertigungsprozess angemessene Robustheit aufweist (Injektions- und Kompaktierungsdruck, Werkzeugbeschickung und Entformung, Reinigung und Oberflächenveredelung),
- keinen Einfluss auf den Prozess und die Zykluszeiten (Belegung, Montage,...) selbst hat und dabei
- eine kontinuierliche online Darstellung des Füllvorganges während der Injektion ermöglicht und
- preiswert und geometrisch gut integrierbar ist.

## **4 Kontinuierliche online Messung des Ausbreitungsverhaltens in geschlossenen Werkzeugen**

### **4.1 Kapazitives Messprinzip**

Die definierte Messaufgabe kann von einem Sensorsystem gelöst werden, welches eine kontinuierliche Messung des Ausbreitungsverhaltens bei einer möglichst großen Gestaltungsfreiheit der Messflächen selbst erlaubt. So kann zu jedem beliebigem Zeitpunkt die Position und Geschwindigkeit der Matrixausbreitung bestimmt werden. Dies minimiert die Anzahl der Sensoren und erlaubt eine maximale Auflösung der Informationen zur Position der Fließfront im geschlossenen Werkzeug.

Dabei soll die Belastbarkeit des Sensors den Gegebenheiten bei der Harzinjektion im Werkzeug angepasst sein. Hier treten Drücke bis zu 6 bar, in Sonderfällen bis 30 bar auf. Die Temperaturen bei der Verarbeitung von Standardharzsystemen liegen in Bereichen von ca. 20 °C (RT – Kalthärtende Harzsysteme) bis ca. 100 °C (Warmhärtende Harzsysteme). Heißhärtende Systeme benötigen Temperaturen von über 100 °C während der Vernetzung. Spezielle Matrixsysteme, vor allem für Anwendungen in der Luftfahrt, müssen teilweise bei Temperaturen von bis zu 180 °C und mehr aushärten.

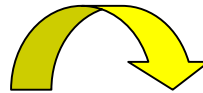
Zusätzliche Kräfte wirken auf die Sensoroberflächen bei der Kompaktierung der Verstärkungsstruktur auf teilweise über 60 % Faser-Volumengehalt. Daneben sind auch die mechanischen Belastungen beim Belegen und Entformen des Werkzeugs, bei der Reinigung oder auch bei einer Oberflächenveredelung zu beachten. Wichtig aus verarbeitungstechnischer Sicht ist vor allem eine Realisierung eines im Werkzeug integrierten, fest installierten Einbaus in Analogie zu bestehenden Sensorsystemen. Lösungen wie die Positionierung von Sensorkabeln in der Verstärkungsstruktur oder auf der Werkzeugoberfläche scheiden daher auch wegen der Problematik des Anschlusses dieser Sensoren (Zykluszeiten, Handhabbarkeit) schon im Vorfeld aus.

Zusammenfassend sind die Anforderungen an ein Messsystem und die daraus abzuleitenden Ansätze zur Umsetzung wie in Tabelle 4-1 zu definieren.

**Tabelle 4-1** Anforderungen und daraus abzuleitende Umsetzung für ein kontinuierlich arbeitendes Sensorsystem in der Harzinjektionstechnik

Anforderungen

- Echtzeitmessung der Fließfrontausbreitung
- hohe Faservolumenanteile
- hohe Injektionsdrücke und Temperaturen
- Werkzeugintegration

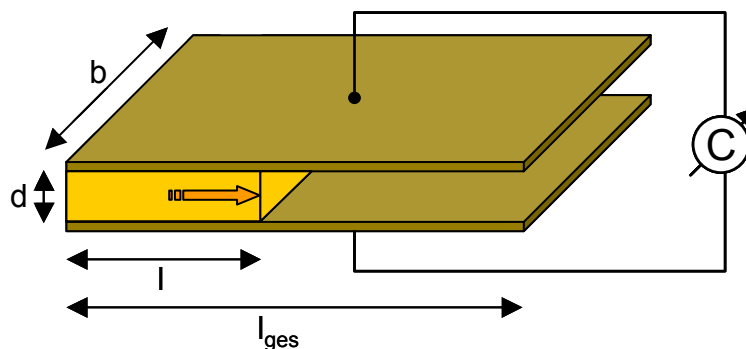


Umsetzung

- kontinuierlich messende Sensorik mit online Auswertung
- robuste Sensoroberfläche
- temperatur- und druckunempfindliches Design
- im Werkzeug fest integrierter Sensoraufbau

Ein diesen Anforderungen entsprechendes Mess- und Dokumentationssystem kann dem gesamten Fertigungsprozess entscheidende Impulse zu einer optimalen Umsetzung und Ausnutzung der Potenziale der Harzinjektionstechnik geben. Ziel ist es, ein System zur Verfügung zu stellen, das mit einer frei gestaltbaren Sensorgeometrie die Möglichkeit bietet, kontinuierlich und online die von der Matrix überstrichenen Teile der Sensoroberfläche messtechnisch zu erfassen.

Ein Messverfahren, welches diese Anforderungen erfüllen kann, ist die kapazitive Messung der Ausbreitung von Stoffen zwischen zwei Kondensatorplatten. Das zugrundeliegende physikalische Modell ist in Bild 4-1 dargestellt:



**Bild 4-1** Ausbreitung im Kondensator mit

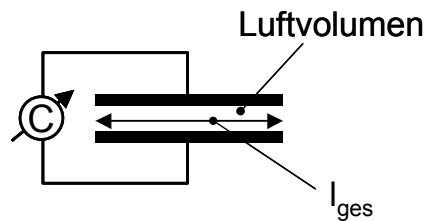
- C = Kapazität des Kondensators [F]
- b = Breite des Kondensators [m]
- $l_{ges}$  = Länge des Kondensators [m]
- d = Abstand der Kondensatorplatten [m]
- l = Ausbreitungslänge [m]
- $\epsilon_{Fl}$  = Dielektrizitätskonstante der Flüssigkeit [1]
- $\epsilon_0$  = elektrische Feldkonstante =  $8,859 \cdot 10^{-12}$  [F/m]

Auf Basis der Bestimmung der Gesamtkapazität  $C$  eines sich füllenden Kondensators

$$C = \epsilon_0 (b / d) \{ (l_{\text{ges}} - l) + (\epsilon_{\text{Fl}} l) \} \quad (4-1)$$

kann speziell für die Anforderungen zur kontinuierlichen online Messung des Kernprozesses der Harzinjektionstechnik ein Plattenkondensator entwickelt werden.

Das dem physikalischen Prinzip einer kapazitiven Messung zugrunde liegende Ersatzschaltbild ist in Bild 4-2 dargestellt.

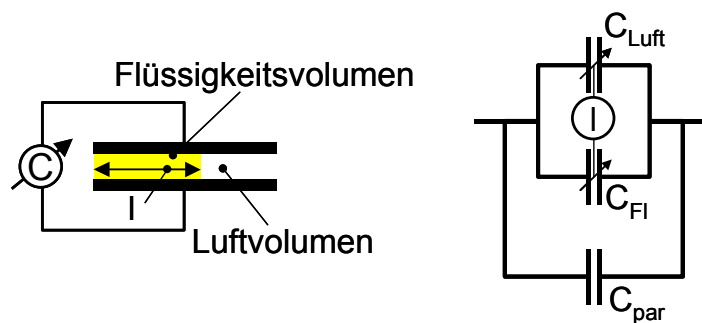


**Bild 4-2** Leerkondensator – Grundkapazität mit

$$C_{\text{Luft}} = \epsilon_0 A / d = \epsilon_0 b l_{\text{ges}} / d \quad (4-2)$$

$$C_{\text{ges}} = C_{\text{Luft}} \quad (4-3)$$

In Bild 4-3 ist beschrieben, wie zunächst im Fall einer reinen Füllstandsmessung, also einem Fließfrontfortschritt im leeren Kondensator, eine Änderung der Kapazität von den sich vergrößernden bzw. verkleinernden Volumina und damit – bei konstantem Abstand der Kondensatorplatten zueinander – nur von den von Harz und Luft überstrichenen Oberflächen abhängt.



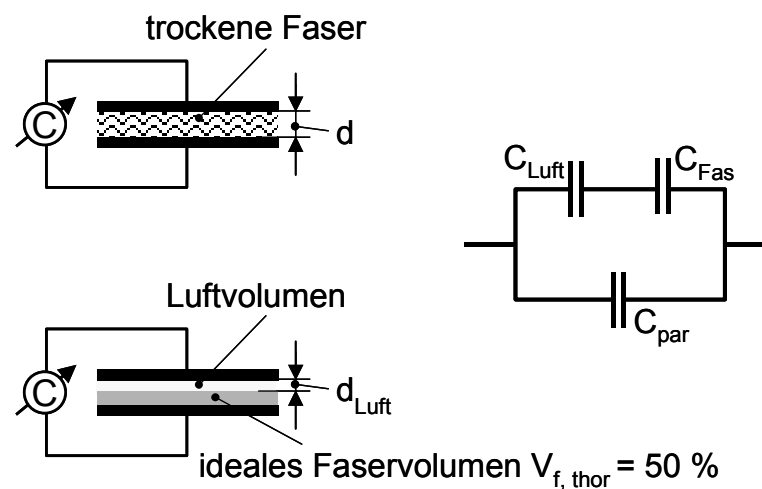
**Bild 4-3** Füllvorgang mit Flüssigkeit im Kondensator mit

$$C_{\text{Luft}} = \epsilon_0 (l_{\text{ges}} - l) b / d \quad (4-4)$$

$$C_{\text{Fl}} = \epsilon_0 \epsilon_{\text{Fl}} l b / d \quad (4-5)$$

$$C_{\text{ges}} = (C_{\text{Luft}} + C_{\text{Fl}}) + C_{\text{par}} \quad (4-6)$$

Im zweiten Schritt wird die trockene Verstärkungsstruktur im Kondensator integriert. Aus dem Faservolumengehalt  $V_f$  wird das absolute Faservolumen  $V_{f, \text{theor}}$  einer Struktur abhängig von der Art der verwendeten Faser, deren Dichte  $\rho_f$  sowie der Anzahl  $n$  und dem Flächengewicht  $\xi$  der Verstärkungslagen errechnet. Im Modell nimmt dieser Festkörper (hier  $V_{f, \text{theor}} = 50 \%$ ) entsprechend die Hälfte des Kondensatorvolumens ein. Das hieraus folgende Ersatzschaltbild und die zugehörigen Formeln sind in Bild 4-4 zusammengefasst.



**Bild 4-4** Verstärkungsstruktur im Kondensator mit

$$C_{\text{Luft}} = \epsilon_0 A / d_{\text{Luft}} \quad (4-7)$$

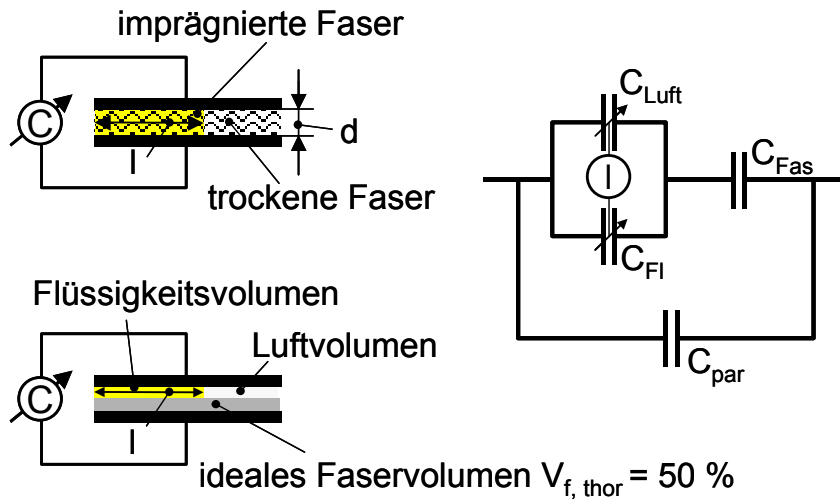
$$C_{\text{Fas}} = \epsilon_0 \epsilon_{\text{Fas}} A / d_{\text{Fas}} \quad (4-8)$$

$$d_{\text{Fas, theor}} = n \xi / \rho_f \quad (4-9)$$

$$d_{\text{Luft}} = d - d_{\text{Fas, theor}} \quad (4-10)$$

$$C_{\text{ges}} = (1/C_{\text{Luft}} + 1/C_{\text{Fas}})^{-1} + C_{\text{par}} \quad (4-11)$$

Mit der Kombination der beiden Einzelphänomene 'Füllvorgang mit Flüssigkeit im Kondensator' (Bild 4-3) sowie 'Verstärkungsstruktur im Kondensator' (Bild 4-4) ist der Kernprozess der Harzinjektionstechnik, also die Injektion in eine im Werkzeug positionierte Faserstruktur, vollständig dargestellt. Das entsprechende Ersatzschaltbild wird analog den vorhergehenden Darstellungen in Bild 4-5 zusammengesetzt.



**Bild 4-5** Durchströmung der Verstärkungsstruktur im Kondensator mit

$$C_{Luft} = \epsilon_0 (l_{ges} - l) b / d_{Luft} \quad (4-12)$$

$$C_{Fl} = \epsilon_0 \epsilon_{Fl} l b / d_{Luft} \quad (4-13)$$

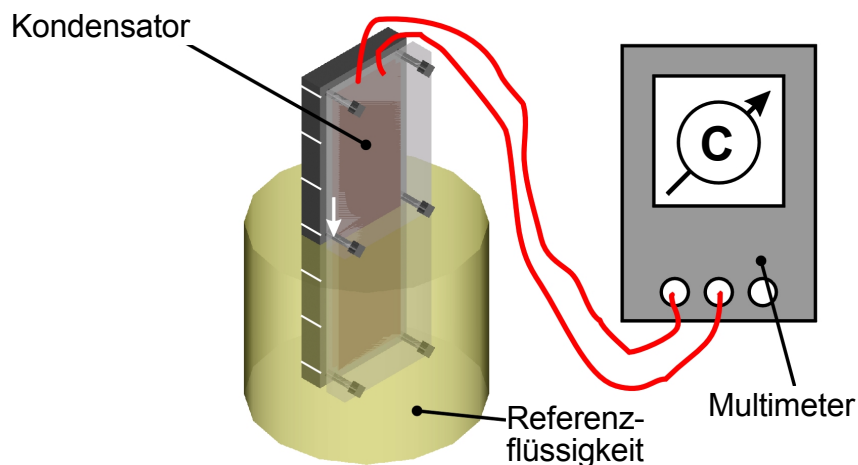
$$C_{Fas} = \epsilon_0 \epsilon_{Fas} A / d_{Fas} \quad (4-14)$$

$$C_{ges} = (1/(C_{Luft} + C_{Fl}) + 1/C_{Fas})^{-1} + C_{par} \quad (4-15)$$

Aufgrund der verschiedenen Dielektrizitätskonstanten von Luft und Flüssigkeit wird die Ausbreitung der Flüssigkeit in der Verstärkungsstruktur zwischen den Kondensatorflächen, also die mit dem Volumenzuwachs des Harzes einhergehende Änderung des dielektrischen Feldes im Kondensator, bestimmt. Da über eine Fläche und nicht über einzelne Punkte gemessen wird, steht zu jedem beliebigen Zeitpunkt der entsprechende Ausbreitungsmesswert zur Verfügung.

## 4.2 Verifikation des Kondensatormessprinzips

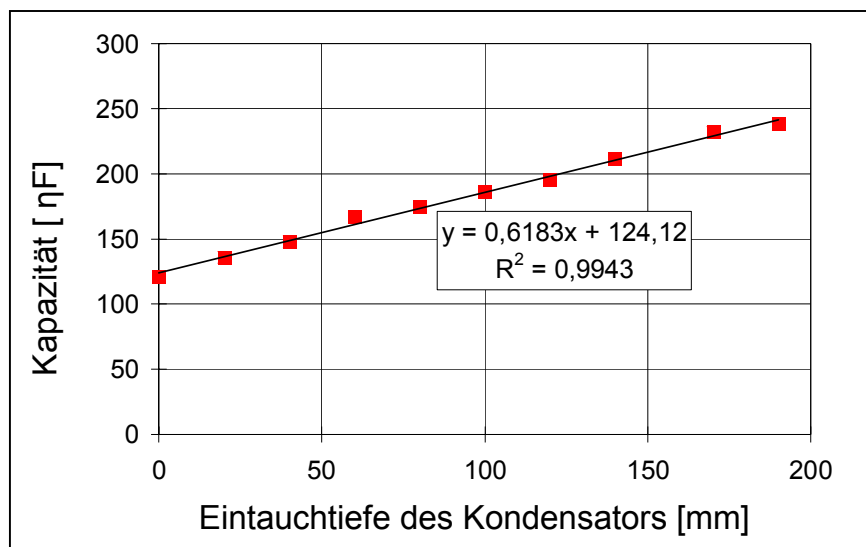
Zur Verifizierung des Messprinzips wurde ein Versuchskondensator mit Fasern gefüllt und stufenweise in eine Referenzflüssigkeit analog zu Bild 4-6 abgesenkt.



**Bild 4-6** Versuchskondensator

Mit dem stufenweisen Eintauchen des Versuchskondensators in das Referenzmedium konnte der Nachweis erbracht werden, dass das Sensorsignal, also die Änderung der Kapazität aufgrund der sich mit Referenzflüssigkeit füllenden Kondensatorfläche, in Korrelation zu der entsprechenden Eintauchtiefe steht.

Exemplarisch sind in Bild 4-7 die Messwerte einer Versuchsreihe gezeigt. Die Kapazität des Kondensators [ $\eta\text{F}$ ] ist über der Eintauchtiefe [mm] aufgetragen.



**Bild 4-7** Kapazität in Abhängigkeit der Eintauchtiefe im Referenzmedium mit Glasfaserverstärkung (Wirrfasermatte  $V_f = 45\%$ )

Betrachtet man Formel 4-15 zur Beschreibung der Kapazität des Gesamtsystems

$$C_{ges} = \frac{1}{\frac{1}{C_{Luft} + C_{Fl}} + \frac{1}{C_{Fas}}} + C_{par} \quad (4-15)$$

in der Form

$$C_{ges} = \frac{1}{\frac{1}{\frac{\epsilon_0(l_{ges} - l)b}{d_{Luft}} + \frac{\epsilon_0\epsilon_{Fl}lb}{d_{Luft}}} + \frac{1}{\frac{\epsilon_0\epsilon_{Fasern}A}{d_{Fasern}}}} + C_{par} \quad (4-16)$$

bleibt nur die Größe  $l$ , also die von dem Medium überstrichene Länge des Kondensators als veränderlicher Wert. Alle anderen Elemente sind konstant und haben auf die Änderung des Kondensatorsignals keinen Einfluss. Es zeigt sich die direkt proportionale Abhängigkeit der Gesamtkapazität  $C_{ges}$  zur von Harz bzw. Ersatzflüssigkeit überstrichenen Länge  $l$  im Kondensator:

$$C_{ges} = \frac{1}{\frac{1}{(l_{ges} - l) + l}} = (l_{ges} - l) + l \Rightarrow C_{ges} = f(l) \quad (4-17)$$

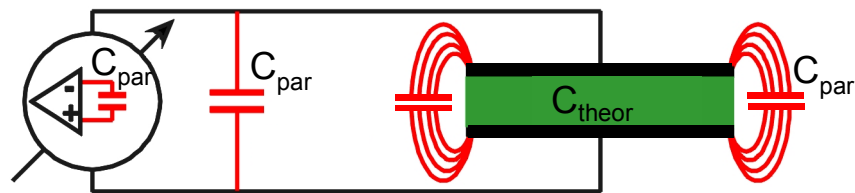
Die lineare Abhängigkeit von Messergebnis (Kapazität  $C_{ges}$  des Kondensators in  $\eta F$ ) über der von Flüssigkeit überstrichenen Länge  $l$  (Eintauchtiefe in mm) des oben dargestellten Versuchs wird beschrieben durch die Gleichung

$$y = 0,6183x + 124,12 \quad (4-18)$$

mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,9943 der Trendlinie.

Beachtet werden muss, dass es im Messaufbau zu Abweichungen der gemessenen von den theoretisch berechneten Werten kommen kann. Dieser Unterschied des Messwertes  $C_{mess}$  ist auf die parasitären Kapazitäten  $C_{par}$  zurückzuführen. Diese treten, wie in Bild 4-8 veranschaulicht, als Leitungskapazitäten der Zuleitungen, Kapazitäten im Messgerät sowie als Streufelder an den Kondensatorrändern auf.





**Bild 4-8** Parasitäre Kapazitäten

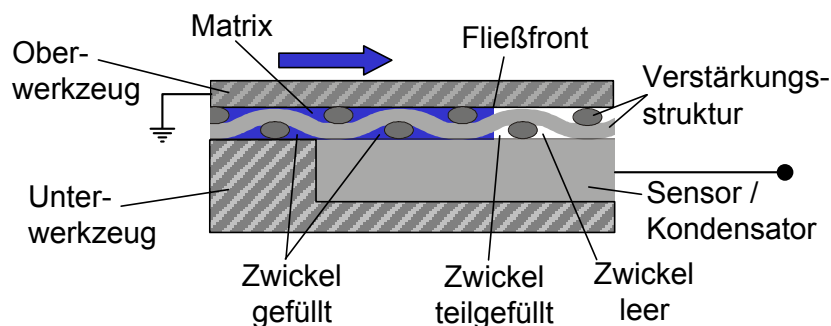
Anhand von Leerversuchen kann dieser Unterschied bestimmt werden. Es gilt:

$$C_{\text{mess}} = C_{\text{theor}} + C_{\text{par}} \quad (4-19)$$

Diese Abweichung von theoretischem und gemessenem Wert wird in der Praxis bei der Kalibrierung der Sensorik mit berücksichtigt und hat damit auf spätere Messergebnisse keinen Einfluss.

### 4.3 Kapazitive Bestimmung des Ausbreitungsverhaltens in elektrisch leitenden Verstärkungsstrukturen

Die Problemstellung und Verifizierung der Meßmethode ist in den zuvor dargestellten Beispielen zunächst an nicht leitenden Verstärkungsmaterialien (GF, AF, NF, etc.) erläutert worden. Die Messung der Ausbreitung eines Matrixsystems entspricht hier dem klassischen Aufbau eines Kondensators mit zwei Kondensatorplatten und dem zu messenden Injektionsvorgang zwischen diesen beiden Platten (Bild 4-9).



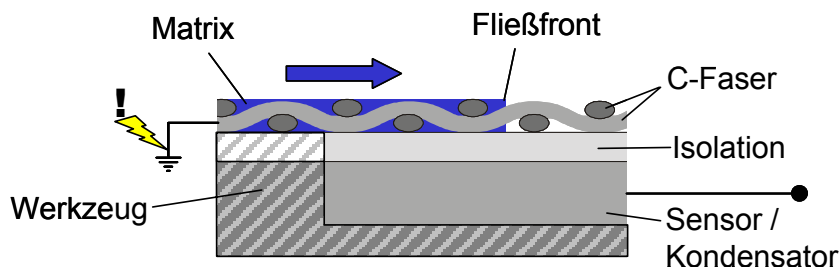
**Bild 4-9** Ausbreitung der Matrix in einer nicht leitenden Verstärkungsstruktur

Leitende Fasermaterialien wie beispielsweise C-Fasern bereiten einer kapazitive Messung Probleme. Abgesehen von einem Kurzschluss ist bei der Verwendung von Koh-

lenstofffasern auch wegen der Bildung eines Faradayschen Käfigs innerhalb des Kondensators die Messung der Matrixausbreitung grundsätzlich nicht möglich.

Die Detailbetrachtung der Injektion eines Verstärkungsmaterials in einem idealisierten Modell bietet einen Lösungsansatz. Aufgrund der Struktur der Verstärkung (Gewebe, Gelege, etc.) erfolgt deren Tränkung durch ein fortlaufendes Füllen einzelner kleiner Hohlräume oder Zwickel direkt an der Formoberfläche (vgl. Bild 4-9).

Das neu entwickelte Auswertungssystem zur Untersuchung des Ausbreitungsverhaltens von Flüssigkeiten in leitenden Verstärkungsstrukturen wie beispielsweise C-Fasern bedient sich dieses Effektes. Der Messaufbau wird in Bild 4-10 skizziert.



**Bild 4-10** Messprinzip mit leitenden Verstärkungsstrukturen (z. B. C-Fasern)

Der neue Ansatz sieht vor, die Verstärkungsstruktur selbst elektrisch zu laden und so als 'zweite Kondensatorplatte' zu nutzen. Dieses Verfahren ist nur realisierbar wegen der elektrischen Leitfähigkeit und der beschriebenen Eigenheit dieser Verstärkungsstrukturen, aufgrund der Zusammensetzung aus einzelnen Faserbündeln an der Werkzeugoberfläche die in Bild 4-9 beschriebenen Zwickel auszubilden, die sich im Verlauf der Injektion sukzessive füllen. So entsteht eine Aneinanderreihung kleinster Kondensatoreinheiten, deren Befüllung messbar ist und somit eine Beobachtung des Füllprozesses auch bei Verwendung elektrisch leitender Strukturen im Werkzeug erlaubt [126]. Den elektrisch leitfähigen Verstärkungsstrukturen kommt so alleine aufgrund dieser ursprünglich als Problem definierten Eigenschaft die messtechnische Lösung zu [127].

#### **4.4 Sensoraufbau und Sensorgeometrie**

Der Sensor ist ein in Größe und Gestalt frei wählbares elektrisch leitendes Formteil in einer entsprechend der Kavität gestalteten Formtasche im Werkzeug. Bedingung zum Einsatz als Sensor ist neben der elektrischen Leitfähigkeit dieses Formteils dessen elektrische Oberflächenisolation, da sonst – wie zuvor beschrieben – bei der Bestimmung des Ausbreitungsverhaltens in leitenden Verstärkungsstrukturen ein Kurzschluss erzeugt wird. Um die Sensorflächen elektrisch zu isolieren besteht die Möglichkeit, entweder die gesamte Formoberfläche oder nur die eigentlichen Messflächen zu isolieren.

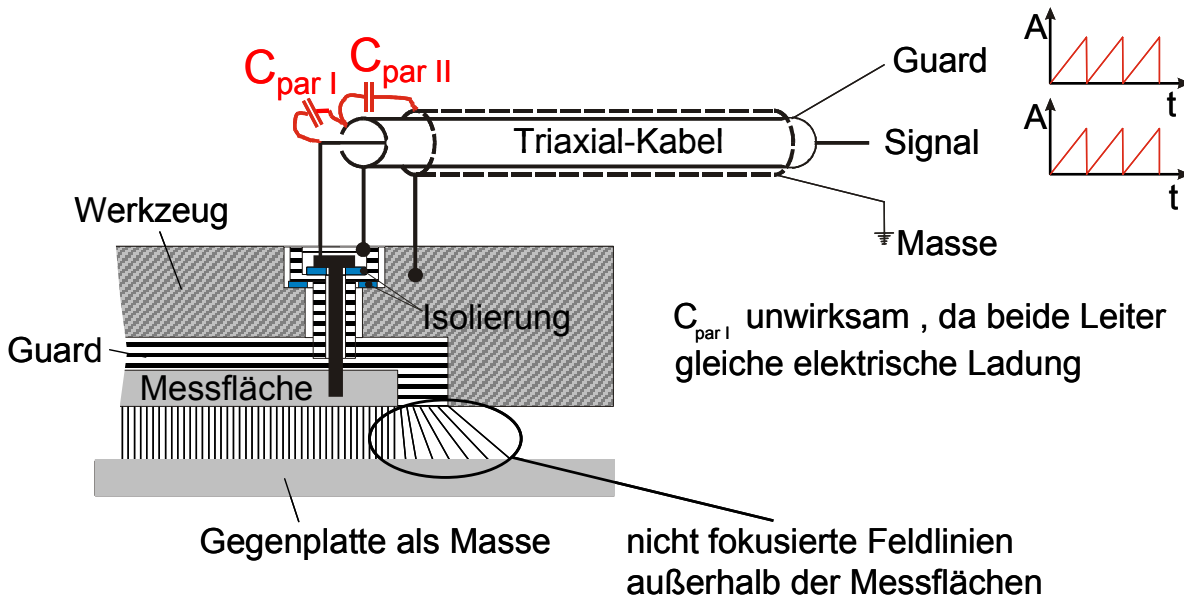
Da zu einer umfassenden Dokumentation der Injektionsvorgänge auch Druck- und Temperatursensoren in die Werkzeugoberfläche eingelassen werden sollen, und diese Sensoren nicht elektrisch isoliert sind, scheidet ein Konzept zur Isolation der gesamten Formoberfläche aus.

Es sollen die Sensoroberflächen selbst elektrisch isolierend gestaltet werden. Idealerweise wird ein Werkstoff mit 'werkstoffeigenen' Isolationseigenschaften gewählt, da sich so jedes Bauteil individuell oberflächenisolieren lässt, alle Elemente des Sensors aus dem gleichen Material gefertigt werden und temperaturbedingte Spannungen im Sensoraufbau aufgrund unterschiedlicher Wärmeausdehnungskoeffizienten vermieden werden.

Als Werkstoff steht Aluminium zu Verfügung. Als wichtigste physikalische Eigenschaft für den Einsatz als Sensor ist es elektrisch leitfähig und in verschiedenen Legierungen mit den mechanischen Kennwerten verfügbar, die an ein Werkzeug zur Druckinjektion gestellt sind. Darüber hinaus lässt sich Al als Besonderheit und herausragende Eigenschaft für die hier gestellte Aufgabe durch eine Eloxierung an seiner Oberfläche mit einer hochwertigen, elektrisch isolierenden Schicht versehen.

Durch die Eloxierung wird das Aluminium zusätzlich zur elektrischen Isolation in seiner Oberfläche vergütet, da die Härte der Eloxalschicht ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) bis zu 1600 HV beträgt [128]. Damit steht mit der Eloxalschicht zusätzlich zu den geforderten Randbedingungen für den Aufbau der Sensorik eine Oberflächenveredelung zur Verfügung, die einer Aluminiumform eine höhere Standzeit verleiht.

Für die Sensorik wird ein Aufbau entsprechend Bild 4-11 erarbeitet.



**Bild 4-11** Aufbau der Sensorik mit Guardflächen und doppelter Abschirmung

Um die parasitären Kapazitätsverluste möglichst gering zu halten, werden sämtliche Messflächen und Messleitungen bis zur Elektronik doppelt geschirmt. Diese doppelte Schirmung besteht aus einer Masseschirmung sowie der Guardschirmung, ein alle Bauteile, die das eigentliche Messsignal führen, zusätzlich umgebendes Element. Die Guardschirmung ist eine Abschirmung gegen parasitäre Kapazitäten, die dadurch wirksam ist, dass auf den umhüllenden Leiter das gleiche Signal wie auf die Messleitung gegeben wird. Durch diese gleichzeitige und gleichgroße Aufladung von Mess- und Guardpotenzial ist die Kapazität zwischen diesen beiden Leitern gleich Null. Parasitäre Kapazitäten treten in diesem Fall nur zwischen Masse und Umgebung sowie Masse und Guard auf und werden damit nicht mitgemessen. Diese doppelte Schirmung ist von der Messfläche bis zur ersten Stufe der Messelektronik durchgängig.

Ein zusätzlich positiver Effekt der Guardabschirmung um die Messflächen ist die Fokussierung der elektrischen Feldlinien der Sensoren durch das elektrische Feld der Guards. Das elektrische Feld der Messflächen wird so annähernd parallel fokussiert und weitet sich nicht aus, was eine genauere Messung erlaubt. Zusätzlich schützt die Masseummantelung das Messsignal vor elektromagnetischen Einstreuungen.

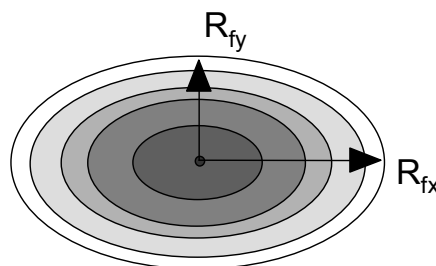
Die Erfassung der Prozessdaten der HIT mit der beschriebenen Kondensator-Messmethode hat also verschiedene Vorteile. Neben der Möglichkeit, mit dieser Sensortechnik kontinuierlich für jeden Zeitschritt die Imprägnierung der Verstärkungsstrukturo-

ren vergleichbar eines Sichtfensters im Werkzeug dokumentieren zu können, ist die letztlich nur von den maschinentechnischen Limitierungen eingeschränkte Gestaltungsfreiheit der geometrischen Form der Sensorflächen von besonderer Bedeutung. Die Sensorgeometrie kann in praktisch jeder gewünschten Form in die Oberfläche eines Werkzeugs eingelassen werden und ist so für unterschiedlichste Anwendungen des Qualitätsmanagements und der Prozesskontrolle geeignet. Es lassen sich kritische Eckbereiche, Zonen mit Insertaufnahmen oder auch die Injektions- oder Steigerelemente samt den diese umgebenden Werkzeugteilen als Sensoren zur detaillierten Beschreibung der Vorgänge im geschlossenen Werkzeug realisieren.

## 5 Permeabilitätsmessung – Aufbau eines Permeameters

### 5.1 Permeabilität der Verstärkung – Fließgesetz nach D’Arcy

Kernprozess bei der Herstellung faserverstärkter Kunststoffe ist der Injektions- und Imprägnierungsvorgang, der grundsätzlich als Durchströmen eines porösen Mediums mit einer Flüssigkeit beschrieben werden kann [129]. Prozessbestimmender Parameter der Harzinjektionstechnik, welcher dieses Durchströmen bzw. die Durchlässigkeit der Verstärkungsstruktur gegenüber der Durchdringung durch die Matrix [130] beschreibt, ist die Permeabilität, die neben der Viskosität der Matrix der entscheidende Stoffwert zur Betrachtung von Füllvorgängen ist [131]. Maß für die Permeabilität ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Fließfront eines Fluids in einem zu durchtränkenden Medium. Bild 5-1 zeigt schematisch das Ausbreitungsverhalten einer Matrix bei einem zentralen Punktanguss in einer anisotropen Struktur. Die Anisotropie wird beschrieben durch den unterschiedlichen radialen Abstand der Fließfronten zum Ursprung in den x,y-Hauptachsen ( $R_{fx} \neq R_{fy}$ ).



**Bild 5-1** 2D-Fließverhalten

Die Modellierung dieses zweidimensionalen Strömungsverhaltens geht prinzipiell auf die von Henry D’Arcy 1856 empirisch aufgestellte Bewegungsgleichung [132] für eindimensionales gesättigtes Fließen eines homogenen Fluids (Wasser) innerhalb eines homogenen, isotropen, porösen Mediums (Sand) zurück.

$$Q = vA(1 - \varphi) = -\frac{KA \Delta p}{\eta x_f} \quad \text{mit} \quad (5-1)$$

Q	= Volumenstrom [m <sup>3</sup> /s]
v	= Fließgeschwindigkeit [m/s]
A	= Querschnittsfläche der Kavität [m <sup>2</sup> ]
φ	= Faservolumengehalt [1]
K	= Permeabilität [m <sup>2</sup> ]
η	= Viskosität [Pa s]
Δp	= Differenzdruck [Pa]
x <sub>f</sub>	= Fließweg [m]

Für die Bestimmung der Permeabilitäten  $K_1$  und  $K_2$  der beiden Hauptachsen eines zweidimensionalen Strömungsverhaltens auf Basis des Gesetzes von D'Arcy finden zwei Rechenverfahren Anwendung – eines für elliptische und eines für kreisförmige Strömungsverläufe. Die Beschreibung der Berechnungsverfahren orientiert sich an [133, 134].

Bei einer ellipsenförmigen Strömungsfront werden zur Berechnung der Permeabilitäten Differentialgleichungen (5-2) und (5-3) verwendet, die den zeitlichen Strömungsverlauf der Flüssigkeitsfront beschreiben.

$$\frac{d\xi_{f1}}{dt} = \frac{K_1(p_o - p_r)}{\varepsilon\eta R_o^2} \left( \frac{\alpha}{1 - \alpha} \right) \frac{1}{(\xi_{f1} - \xi_o)(\cosh^2 \xi_{f1})} \quad (5-2)$$

$$\frac{d\xi_{f2}}{dt} = \frac{K_1(p_o - p_r)}{\varepsilon\eta R_o^2} \left( \frac{\alpha}{1 - \alpha} \right) \frac{1}{(\xi_{f2} - \xi_o)(\cosh^2 \xi_{f2} - 1)} \quad (5-3)$$

Dabei ist  $R_o$  der Angussradius und  $\alpha$  das Verhältnis der beiden Hauptpermeabilitäten  $K_1$  und  $K_2$  der beiden Hauptachsen.

$$\alpha = \frac{K_2}{K_1} \quad (5-4)$$

$\xi_{f1,2}$  sind transformierte, elliptische Halbmesser, die sich aus den radialen Ellipsenhalbmessern errechnen.

$$\xi_{f1} = \sinh^{-1} \left[ \frac{R_{f1}}{R_o} \left( \frac{1}{\alpha} - 1 \right)^{-\frac{1}{2}} \right] \quad (5-5)$$

$$\xi_{f2} = \cosh^{-1} \left[ \frac{R_{f2}}{R_o} (1 - \alpha)^{-\frac{1}{2}} \right] \quad (5-6)$$

$\xi_o$  ist das elliptische Äquivalent zum Einlasslochradius.

$$\xi_o = \ln \left[ \frac{1 + \alpha^{\frac{1}{2}}}{(1 - \alpha)^{\frac{1}{2}}} \right] \quad (5-7)$$

Mit der Lösung der Differentialgleichungen (5-8) und (5-9) kann auf die Annäherung von Geschwindigkeiten mit Differenzenquotienten verzichtet werden [135]. Dies ermöglicht eine genauere Berechnung.

$$F(\xi_{f1}) = (\xi_{f1} - \xi_o) \left( \frac{\sinh(2\xi_{f1})}{4} + \frac{\xi_{f1}}{2} \right) + \frac{1}{8} (\cosh(2\xi_o) - \cosh(2\xi_{f1})) + \frac{\xi_o^2 - \xi_{f1}^2}{4} = \frac{K_1(p_o - p_r)}{\varepsilon\eta R_o^2} \left( \frac{\alpha}{1 - \alpha} \right) \cdot t \quad (5-8)$$

$$F(\xi_{f2}) = (\xi_{f2} - \xi_o) \left( \frac{\sinh(2\xi_{f2})}{4} + \frac{\xi_{f2}}{2} \right) + \left( \xi_{f2}\xi_o - \left( \frac{\xi_{f2}^2 + \xi_o^2}{2} \right) \right) + \frac{1}{8} (\cosh(2\xi_o) - \cosh(2\xi_{f2})) + \frac{\xi_o^2 - \xi_{f2}^2}{4} = \frac{K_1(p_o - p_r)}{\varepsilon\eta R_o^2} \left( \frac{\alpha}{1 - \alpha} \right) \cdot t \quad (5-9)$$

Nach Auftragen von  $F(\xi_1)$  und  $F(\xi_2)$  über der Zeit  $t$  liefert der Regressionsprozess zwei Ausgleichsgeraden. Beim wahren  $\alpha$  ist der Abstand zwischen diesen zwei parallelen Linien am geringsten. Über die Steigung  $S_E$  dieser beiden Geraden und die Gleichungen (5-4) und (5-10) werden die Werte für die Permeabilität  $K_1$  und  $K_2$  der beiden Hauptachsen mit

$$S_E = \frac{K_1(p_o - p_r)}{\varepsilon\eta R_o^2} \left( \frac{\alpha}{1 - \alpha} \right) \quad (5-10)$$

berechnet.



Bildet sich ein (nahezu) kreisförmiger Strömungsverlauf aus, kann das oben beschriebene Berechnungsverfahren für eine elliptische Ausbreitung nicht angewendet werden, weil mit  $\alpha$  einige Nenner der benutzten Terme gegen Null streben würden. Die Lage der Fließfront lässt sich bei kreisförmigem Strömungsverlauf durch die Gleichung (5-11) beschreiben [136].

$$\frac{d(R_w^2)}{dt} = \frac{2K(p_0 - p_r)}{(1 - \varphi)\eta} \cdot \frac{1}{\ln\left(\frac{R_w}{R_0}\right)} = S_K \frac{1}{\ln\left(\frac{R_w}{R_0}\right)} \quad (5-11)$$

Unter der Annahme, dass zum Zeitpunkt  $t = t_0 = 0$  auch  $r = R_0$  gilt, lautet die Lösung der Differentialgleichung (5-12) [137].

$$R_w^2 \ln\left(\frac{R_w^2}{R_0^2} - 1\right) + R_0^2 = \frac{4K(p_0 - p_r)}{(1 - \varphi)\eta} \cdot t \quad (5-12)$$

Wird  $R_w^2 \ln\left(\frac{R_w^2}{R_0^2} - 1\right) + R_0^2$  über  $t$  aufgetragen, lässt sich die Steigung  $S_K''$  dieser Geraden berechnen. Damit folgt für die Permeabilität

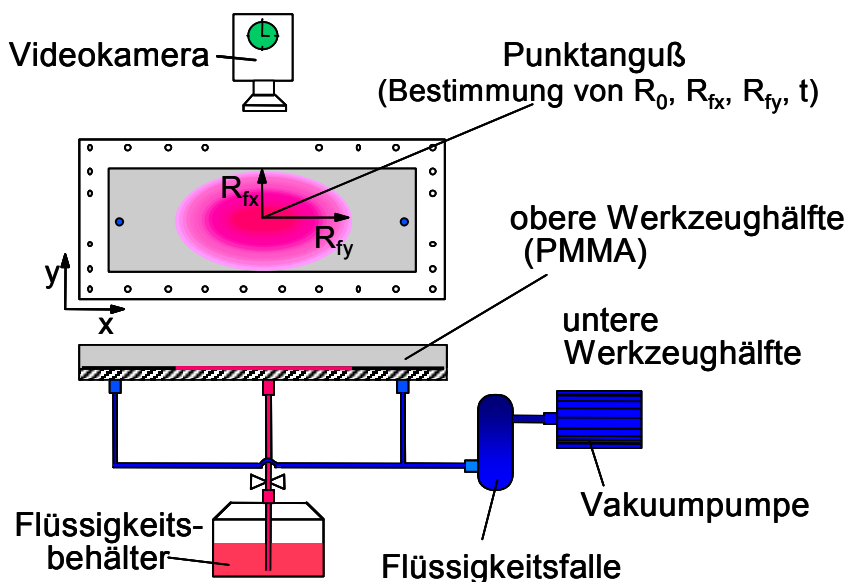
$$K = \frac{S(1 - \varphi)\eta}{4(p_0 - p_r)} \quad (5-13)$$

Auf der Basis dieser Berechnungen kann für jedes elliptische bzw. kreisförmige Ausbreitungsverhalten eine Berechnung der entsprechenden Permeabilitäten in den beiden Hauptrichtungen erfolgen.

Als Eingabewerte zur Berechnung der Permeabilität werden die Positionen und Verhältnisse der Fließfront in den Hauptachsen ( $R_{fx}$ ,  $R_{fy}$ ) zum Zeitpunkt  $t$  auf Grundlage des verstärkungsmaterialspezifischen Ausbreitungsverhaltens benötigt. Anhand dieser Werte können die entsprechenden Permeabilitäten der Hauptachsen – die Werte  $K_1$  und  $K_2$  – aus den beiden gegebenen Gleichungen bestimmt werden. Kern der Permeabilitätsmessung ist es also, das Ausbreitungsverhalten von Flüssigkeiten – auf der Basis der Eingabewerte  $R_{fx}$  und  $R_{fy}$  – in Abhängigkeit der Verstärkungsstruktur zu bestimmen und zur Verfügung zu stellen.

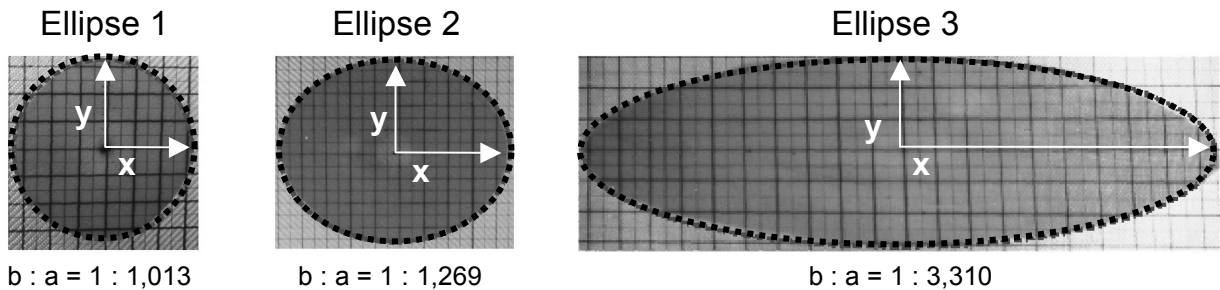
## 5.2 Bestehende Versuchsaufbauten zur Permeationsmessung

Für die Bestimmung und Dokumentation des Ausbreitungsverhaltens von Flüssigkeiten in einer Verstärkungsstruktur zur Generierung von Eingabewerten für die Berechnung der Permeabilität ist eine kontinuierliche Erfassung des Fließfrontfortschritts im geschlossenen Werkzeug von besonderem Vorteil. So können die Fließeffekte möglichst detailliert dokumentiert und ausgewertet werden. Da geeignete Sensoren zu kontinuierlichen Bestimmung des Füllbildes in geschlossenen Formen bislang nicht zur Verfügung standen, bedienen sich bisher angewendete Verfahren vornehmlich einer transparenten Werkzeughälfte und der Auswertung der durch diese Anordnung möglichen optischen und damit kontinuierlichen Erfassung des Füllvorgangs im geschlossenen Werkzeug entsprechend einem Aufbau wie in Bild 5-2 dargestellt [138, 139, 140, 141].



**Bild 5-2** 2D-Permeabilitätsmessung mittels Bilderfassung

Die transparente obere Werkzeughälfte wird mit einer Videokamera beobachtet. Der zentrale Punktanguss und die sich daraus ergebende ellipsoide Ausbreitung der Matrix, exemplarisch in Bild 5-3 für drei Materialien mit unterschiedlichen anisotropen Verstärkungsaufbauten dargestellt, erlaubt durch Bestimmung der Halbachsen  $a$  und  $b$  mit jedem Versuch gleichzeitig eine Beschreibung der Permeabilität in beiden Hauptrichtungen  $x$  und  $y$  eines zu charakterisierenden Materials [142].



**Bild 5-3** Typisches Ausbreitungsverhalten der Matrix bei zentralem Punktanguss

Die Daten zur Ausbreitung der Fließfront werden anschließend ausgewertet, und die Permeabilität der Verstärkungsstrukturen kann berechnet werden.

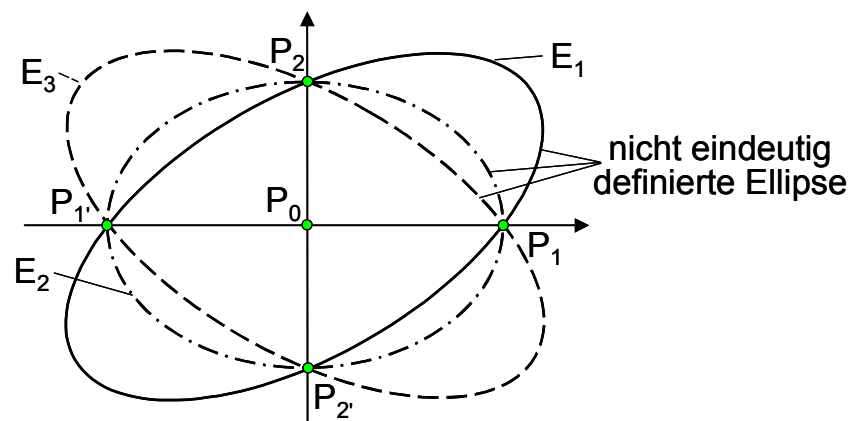
Die Dokumentation dieser Versuche – von der Erfassung der Daten aus der Videoaufzeichnung bis zur Bestimmung der Permeabilität mit dem Übertragen der Fließfrontinformationen in ein rechnerbasiertes Auswertungsprogramm – ist aufwändig und hat gerade wegen des notwendigen transparenten Oberwerkzeugs und der damit eingeschränkten Auswahl an Werkstoffen (z. B. PMMA) verschiedene weitere Nachteile. So können keine hohen Faservolumenanteile, Injektionsdrücke und Temperaturen zur detaillierten Untersuchung einzelner Phänomene, die während des Injektionsprozesses auftreten können, realisiert werden [143].

Mit der Umsetzung der beschriebenen kapazitiven Sensorik in einem Werkzeug zur Bestimmung der Tränkungsverläufe in Verstärkungsstrukturen können die bestehenden Nachteile existierender Versuchsaufbauten ausgeräumt und ein Messsystem zur Verfügung gestellt werden, welches effizient und systematisch eine Charakterisierung des Ausbreitungsverhaltens von Fluiden in textilen Verstärkungsstrukturen ermöglicht.

Dieses System steht damit zunächst dem Fertigungsablauf als Dokumentations- und Kontrollinstrument zur Verfügung und bietet speziell für die umfassende Untersuchung und Bestimmung der Permeabilitäten textiler Verstärkungsstrukturen, beispielsweise als Funktion des Faservolumenanteiles  $V_f$ , neue Möglichkeiten. Damit werden sowohl der Simulation der Prozessabläufe als auch dem Fertigungsprozess selbst wichtige Informationen zur Prozesskontrolle und -steuerung zur Verfügung gestellt.

### 5.3 Beschreibung des ellipsoiden Ausbreitungsverhaltens

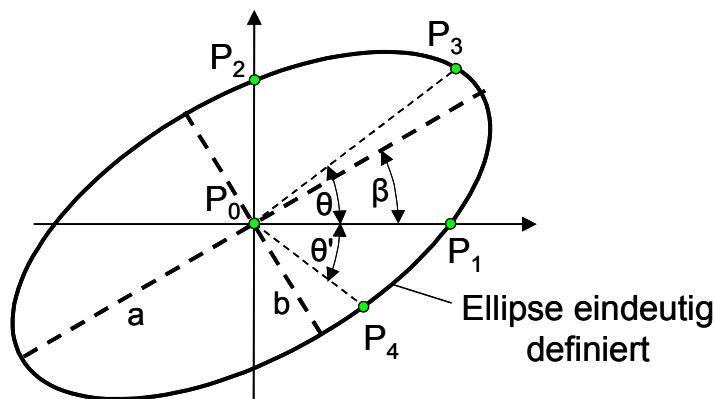
Zur Bestimmung der Ausbreitungsellipse eines Matrixsystems in einem geschlossenen Werkzeug ist die eindeutige Beschreibung der Lage dieser Ellipse entscheidend. Da auf ein transparentes Oberwerkzeug verzichtet wird, stellt das kapazitive Sensorsystem die einzige verwertbare Information zur Verfügung. Mit den – im Vergleich zu einem transparenten Werkzeug – reduzierten Datenmengen muss die Anzahl der einzusetzenden Sensorflächen so gewählt werden, dass zusätzlich zu der kontinuierlichen Ortsbestimmung der Fließfront über der Länge des Sensors auch die Lage der Ausbreitungsellipse des Matrixsystems eindeutig bestimmt werden kann. Wie die Darstellung in Bild 5-4 zeigt, kann eine Ellipse, z. B. für den Fall, dass eine Drehung um den Injektionspunkt als Ursprung auftritt, mit nur vier Umfangspunkten – also vier Messflächen – nicht eindeutig beschrieben werden.



**Bild 5-4** Nicht eindeutig definierte Ellipse auf Basis von vier Umfangspunkten  $P_1$ ,  $P_{1'}$ ,  $P_2$  und  $P_{2'}$

Wie skizziert ist es möglich, mehrere Ellipsen ( $E_1$ ,  $E_2$  und  $E_3$ ) darzustellen, die alle durch die gegebenen 4 Umfangspunkte ( $P_1$ ,  $P_{1'}$ ,  $P_2$  und  $P_{2'}$ ) beschrieben werden.

Zur eindeutigen Bestimmung der Lage der Ausbreitungsellipse sind für Kurven 2. Ordnung (Ellipse, Hyperbel) insgesamt 5 Messpunkte in der Ebene notwendig [144]. Bei der vorliegenden Nullpunktsymmetrie (zum Injektionspunkt) genügen vier Punkte, wenn diese nicht nullpunktsymmetrisch zueinander sind (Bild 5-5).

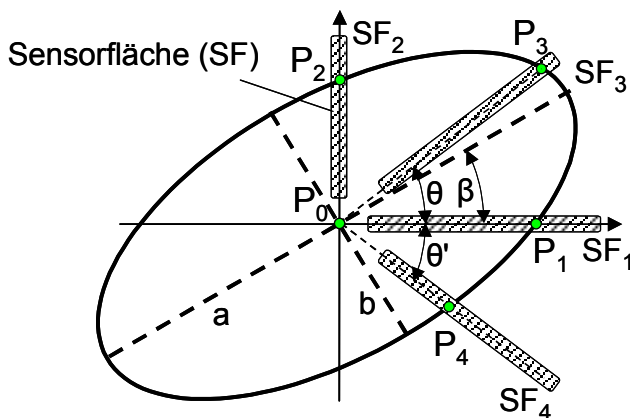


**Bild 5-5** Eindeutige Bestimmung der Ausbreitungsellipse mit

- $P_n$  = Messpunkte
- $\theta, \theta'$  = Winkel der Messpunkte  $P_3$  und  $P_4$ , symmetrisch zur x-Achse
- $a, b$  = Halbachsen der Ellipse
- $\beta$  = Drehwinkel der Ellipse

Um also eine beliebige nullpunktsymmetrische Ellipse eindeutig beschreiben zu können, sind vier nicht nullpunktsymmetrische Messpunkte als Umfangspunkte der Ellipse notwendig [145].

Daraus folgt, dass mit der Positionierung von vier Sensorflächen (SF) in einer nicht nullpunktsymmetrischen Anordnung im Werkzeug und damit der Bestimmung von 4 Umfangspunkten  $P_1, P_2, P_3$  und  $P_4$  jede Ellipse, die sich vom Punktanguss aus ursprungssymmetrisch ausbreitet, eindeutig beschrieben werden kann. Eine Anordnung der Sensorflächen zur Erfassung der notwendigen vier Messpunkte zur eindeutigen Beschreibung der Ausbreitungsellipse ist in Bild 5-6 gezeigt.



**Bild 5-6** Positionierung der Sensorflächen (SF) im Werkzeug zur eindeutigen Bestimmung der Ausbreitungsellipse

Grundlage dieser Beschreibung der Lage und Form einer Ellipse ist die Ellipsengleichung

$$a x^2 + b y^2 + 2 c xy + g = 0. \quad (5-14)$$

Mit den vier Unbekannten  $a$ ,  $b$ ,  $c$  und  $g$  und den 4 Messpunkten  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  und  $P_4$  kann ein Gleichungssystem mit 4 Gleichungen aufgestellt werden:

$$(I) \quad a P_1^2 \quad \quad \quad + g = 0 \quad (5-15)$$

$$(II) \quad \quad \quad b P_2^2 \quad \quad \quad + g = 0 \quad (5-16)$$

$$(III) \quad a (P_3 \cos \theta)^2 + b (P_3 \sin \theta)^2 + 2c (P_3^2 \sin \theta \cos \theta) + g = 0 \quad (5-17)$$

$$(IV) \quad a (P_4 \cos \theta)^2 + b (P_4 \sin \theta)^2 - 2c (P_4^2 \sin \theta \cos \theta) + g = 0 \quad (5-18)$$

Die Lösung dieses Gleichungssystems führt zur Beschreibung der Ausbreitungsellipse entsprechend der Ellipsengleichung (5-14). Dazu werden zwei Fälle unterschieden.

Der *1. Fall* behandelt die Berechnung der Ellipsengleichung für den Sonderfall, dass  $|P_3| = |P_4|$  ist. Mit  $|P_3| = |P_4|$  wird eine Ellipse definiert, deren Drehwinkel um den Ursprung  $0^\circ$  beträgt. Aufgrund der fehlenden Drehung kommen die Hauptachsen der ursprungssymmetrischen Ausbreitungsellipse auf dem Koordinatensystem selbst und damit auf den in den  $x$ - und  $y$ -Achsen definierten Sensorflächen  $SF_1$  und  $SF_2$  mit den Messpunkten  $P_1$  und  $P_2$  zu liegen. Für die Beschreibung der Ellipse bedeutet dies, dass die zu jedem Zeitpunkt  $t_n$  bestimmten Messwerte  $P_{1n}$  und  $P_{2n}$  den Halbachsen der Ausbreitungsellipse entsprechen und folglich direkt als Eingabewerte für die lange und kurze Halbachse der Permeabilitätsberechnung zur Verfügung stehen.

Soll zusätzlich eine Beschreibung der Ellipse entsprechend Gleichung (5-14) erfolgen, muss beachtet werden, dass wegen  $|P_3| = |P_4|$  das gemischte Glied  $2c(P_x^2 \cdot \sin \theta \cos \theta) = 2cxy = 0$  wird. Damit ist das Gleichungssystem (5-15) bis (5-18) so nicht lösbar. Dennoch kann anhand der Punkte  $P_1$  und  $P_2$  das Halbachsenverhältnis durch Gleichsetzen von Gleichung (I) und (II) berechnet werden:

$$(I) = (II) \quad a \cdot P_1^2 = b \cdot P_2^2 \quad (5-19)$$

$$\Rightarrow \quad \frac{a}{b} = \frac{P_1^2}{P_2^2} \quad (5-20)$$

Wird  $a \stackrel{!}{=} 1$  gewählt, erhält man  $b$  und damit das Verhältnis  $\frac{a}{b}$  der Hauptachsen. Mit Einsetzen von  $a$  und  $b$  in Gleichung (III) wird der Skalierungsfaktor  $g$  bestimmt:

$$a, b \text{ in (III)} \quad (P_3 \cdot \cos \theta)^2 + \frac{P_1^2}{P_2^2} (P_3 \cdot \sin \theta)^2 = -g \quad (5-21)$$

Damit ist eine ursprungssymmetrische, nicht gedrehte Ellipse mit  $c = 0$  wegen  $|P_3| = |P_4|$  und der Berechnung von  $a$ ,  $b$  und  $g$  auf Basis der Gleichung (5-14) eindeutig beschrieben.

Der 2. Fall mit  $|P_3| \neq |P_4|$  beschreibt eine Ellipse, deren Hauptachsen nicht in Richtung der Koordinatenachsen liegen, da im Unterschied zum 1. Fall die gemischten Glieder dazu führen, dass in Gleichung (5-14)  $c \neq 0$  ist. Das Gleichungssystem (I) – (IV) ist also eindeutig bestimmt und lösbar. Die Berechnung der Unbekannten  $a$ ,  $b$ ,  $c$  und  $g$  führt auch für diesen Fall zu einer Beschreibung der Ellipse nach Gleichung (5-14) der Form  $ax^2 + by^2 + 2cxy + g = 0$ . Über eine Hauptachsentransformation für Kurven 2. Ordnung wird aus der gegebenen Gleichung (5-14) die Drehung sowie die Länge der beiden Halbachsen bestimmt [146]:

Die Ellipsengleichung schreibt sich in Matrixschreibweise, wenn  $\vec{x} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$ ,  $\vec{x}^T = (x, y)$

und  $M = \begin{pmatrix} a & c \\ c & b \end{pmatrix}$  die zugehörige symmetrische Matrix ist,

$$ax^2 + by^2 + 2cxy + g = (x, y) \begin{pmatrix} a & c \\ c & b \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + g = \vec{x}^T M \vec{x} + g = 0. \quad (5-22)$$

Sind  $\lambda_1, \lambda_2$  die (reellen!) Eigenwerte der symmetrischen Matrix  $M$  und ist

$$A = (\vec{a}_1, \vec{a}_2) = \begin{pmatrix} \cos \beta & -\sin \beta \\ \sin \beta & \cos \beta \end{pmatrix} \quad (5-23)$$

eine kartesische Basis aus Eigenvektoren von  $M$  mit  $\det A = 1$ , also eine Drehmatrix, dann ist

$$A^{-1}MA = A^T MA = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{pmatrix} \quad (5-24)$$

eine Diagonalmatrix.

Setzt man  $\bar{x} = A\bar{u}$ , dann ist  $\bar{x}^T = (A\bar{u})^T = \bar{u}^T A^T$  und es gilt:

$$\begin{aligned} ax^2 + by^2 + 2cxy + g &= \bar{x}^T M\bar{x} + g = \bar{u}^T (A^T MA) \bar{u} + g \\ &= \bar{u}^T \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{pmatrix} \bar{u} + g = \lambda_1 u^2 + \lambda_2 v^2 + g = 0 \end{aligned} \quad (5-25)$$

Bezüglich der Basis  $A$  – also im  $u, v$ -System – zeigen die Achsen der Ellipse jetzt in die Richtung der Koordinatenachsen (keine gemischten Glieder).

$A$  ist die Drehmatrix (kartesische Basis,  $\det A = 1$ ), also  $A = \begin{pmatrix} \cos \beta & -\sin \beta \\ \sin \beta & \cos \beta \end{pmatrix}$  und geht

aus der Basis  $E$  durch die Drehung um den Winkel  $\beta$  hervor, den man aus den abgelesenen Werten  $\cos \beta$  und  $\sin \beta$  bestimmt. Damit ist die Drehung auch der Ellipse bestimmt. Im (um den Winkel  $\beta$  gedrehten)  $u, v$ -System berechnen sich aus

$$\lambda_1 u^2 + \lambda_2 v^2 + g = 0 \quad \text{oder} \quad u^2 \frac{\lambda_1}{-g} + v^2 \frac{\lambda_2}{-g} = 1 \quad (5-26)$$

die Halbachsen der um den gleichen Winkel  $\beta$  gedrehten Ellipse damit zu

$$a = \sqrt{\frac{\lambda_1}{|g|}} \quad \text{und} \quad b = \sqrt{\frac{\lambda_2}{|g|}}. \quad (5-27)$$

Mit der Bestimmung von  $a, b$  und  $\beta$  ist damit auch für den 2. Fall einer ursprungssymmetrischen Drehung die Ausbreitungsellipse als Grundlage für die Bestimmung der Permeabilität  $K_1$  und  $K_2$  in den Hauptachsenrichtungen eindeutig definiert.

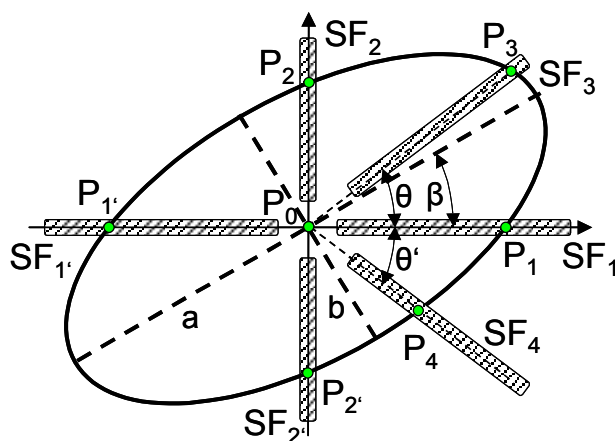
Damit stehen zur Beschreibung beliebiger Ausbreitungsellipsen mit Größe und Winkel der Ellipsenhauptachsen die Eingabewerte zur Verfügung, die auf Basis der Gleichung von D'Arcy zur Bestimmung der Permeabilitäten  $K_1$  und  $K_2$  in den beiden Hauptrichtungen eines zweidimensionalen Ausbreitungsverhaltens notwendig sind:



Liegt keine Drehung der Ellipse vor ( $|P_3| = |P_4|$ ), ist also das gemischte Glied  $2c (P_x^2 \sin \theta \cos \theta) = 2c xy = 0$ , kann mit 3 Punkten und 3 Gleichungen die Ellipsengleichung gelöst werden. Die Messdaten bzw. Sensorinformationen von  $SF_1$  und  $SF_2$  können direkt zur Bestimmung der Permeabilität genutzt werden.

Ist wegen  $|P_3| \neq |P_4|$  die Ausbreitungsellipse gedreht, führt die Lösung des Gleichungssystems (5-15) bis (5-18) zu einer Beschreibung der Form  $ax^2 + by^2 + 2cxy + g = 0$ . Anhand dieser Darstellung können entsprechend der beschriebenen Hauptachsentransformation die für eine Bestimmung der Permeabilität notwendigen Informationen – die Länge der Halbachsen  $a$  und  $b$  sowie der Drehwinkel  $\beta$  – bestimmt werden.

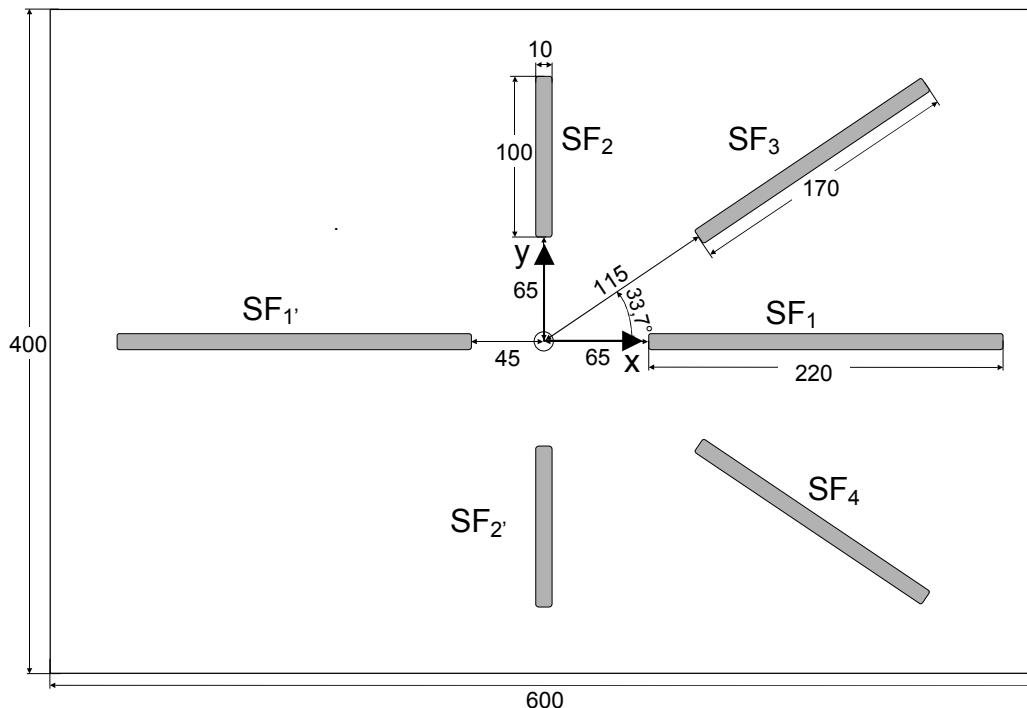
Für das Permeameter werden insgesamt sechs Sensorflächen (SF) entsprechend Bild 5-7 in die Form eingelassen. Vier Sensoren liegen jeweils paarweise ursprungssymmetrisch auf den Formhauptachsen in  $x$ - ( $SF_1$  und  $SF_{1'}$ ) und  $y$ -Richtung ( $SF_2$  und  $SF_{2'}$ ). Zur oben beschriebenen eindeutigen Bestimmung der Lage (mögliche Drehung) und Größe der Ausbreitungsellipse sind zwei Sensoren ( $SF_3$  und  $SF_4$ ) in einer Werkzeughälfte auf den Diagonalen im Winkel  $\theta$  und  $\theta'$  zur  $x$ -Achse positioniert.



**Bild 5-7** Verteilung der Sensorflächen (SF) im Permeameter

Mit den Messwerten der diagonalen Sensorstreifen wird die Drehung der Ellipse bestimmt. Sind die Werte gleich, liegt keine Drehung vor, da dann die Ellipsenhauptachsen mit den Formhauptachsen zusammenfallen. Die Ellipse ist in diesem Fall sowohl nullpunkt- als auch formhauptachsensymmetrisch. Weichen die beiden Messwerte voneinander ab, liegt eine Drehung der Ellipse vor.

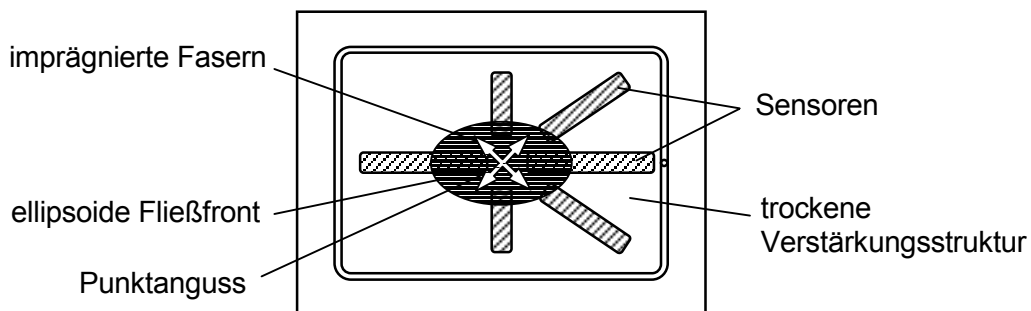
Die geometrischen Abmessungen der im Werkzeug integrierten Sensorflächen sind in Bild 5-8 im Detail für das aufgebaute Permeameter dargestellt.



**Bild 5-8** Geometrische Abmessungen von Permeameter (Kavität) und Sensorflächen

Da die Geometrie der entwickelten Sensoren praktisch frei wählbar ist und keinen Einschränkungen unterliegt, werden zur Umsetzung des Messaufbaus für eine Beschreibung und Dokumentation der Imprägnierungsvorgänge über einen langen Fließweg (Fließfrontkontrolle) Sensorstreifen mit einem möglichst großen Länge-zu-Breite-Verhältnis eingesetzt. Damit erfolgt die Aufzeichnung der Benetzung über einer langen, aber schmalen Sensorfläche. Wichtig ist für alle Sensoren eine optimale Einpassung in die Werkzeugkavität, um Beeinflussungen des Fließverhaltens zu vermeiden.

Der Injektionsvorgang – die Imprägnierung der trockenen Verstärkungsstruktur im geschlossenen Werkzeug – erfolgt analog zu der schematischen Darstellung in Bild 5-9.

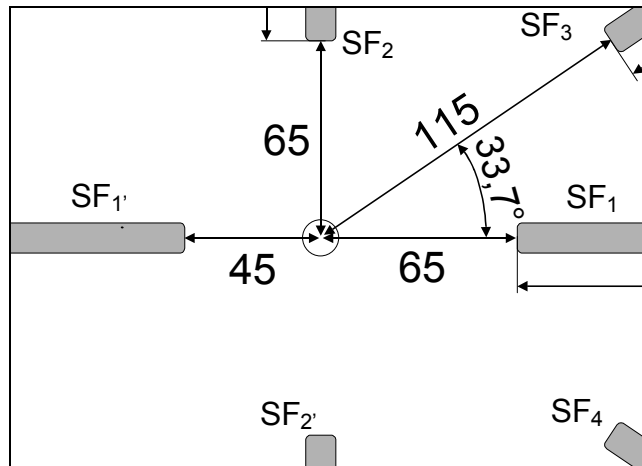


**Bild 5-9** Schematische Darstellung einer Injektion

Vom zentralen Punktanguss breitet sich die Fließfront des Matrixsystems aus und tränkt dabei die trockene Verstärkungsstruktur. Die Verstärkungsstruktur selbst beeinflusst aufgrund der Art, Menge und Struktur des gewählten Materials das Ausbreitungsverhalten nachhaltig. Dieses wird von der Sensorik erfasst und mittels der angeschlossenen Elektronik dokumentiert. Mit der vollständigen Beschreibung der Ausbreitungsellipse stehen damit alle Eingabewerte zur Berechnung der Permeabilität der Verstärkungsstruktur zur Verfügung. Die Umsetzung der Sensorinformationen in eine für die Bestimmung der Permeabilität geeignete Form wird nachfolgend beschrieben.

## 5.4 Online Kalibrierung der Sensoren

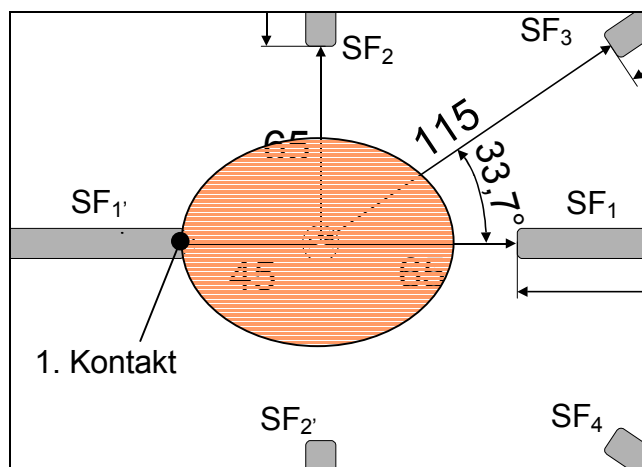
Die notwendigen Schritte vom Sensorsignal bis zur Beschreibung einer Fließfront der Ausbreitungsellipse und damit der Umsetzung der Messdaten zu einer kontinuierlichen online Darstellung des Ausbreitungsverhaltens im geschlossenen Werkzeug erfordert zunächst eine online Kalibrierung, beispielsweise anhand eines definierten Fließwegs und der dazu korrelierenden Änderung des Sensorsignals. Um in Abhängigkeit des mit jedem Versuch variierenden Dielektrizitätswertes von Flüssigkeit  $\epsilon_{F1}$  und Fasermaterial  $\epsilon_{Fas}$  schon zu Versuchsbeginn und damit während des gesamten weiteren Injektionsvorganges ein zu einem definierten Fließweg korrelierendes Messsignal zu erhalten, sind die beiden Kondensatorflächen  $SF_{1'}$  und  $SF_1$  wie in Bild 5-10 gezeigt um 20 mm zueinander versetzt angeordnet (vgl. dazu auch Bild 5-8).



**Bild 5-10** Versatz der Messflächen

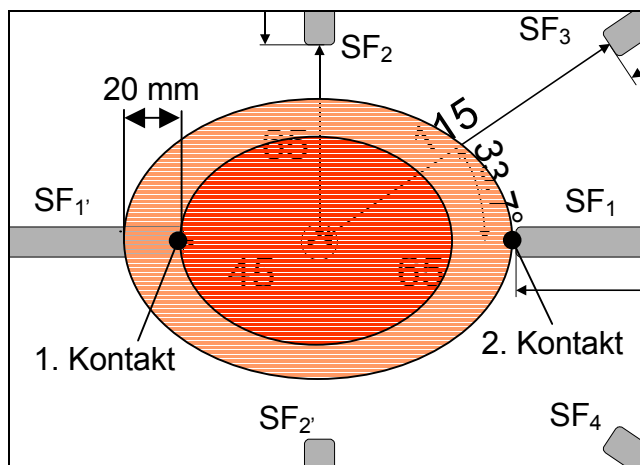
Durch den Versatz sind zwei Punkte während der Anfangsphase der Injektion definiert:

Der Zeitpunkt  $t_1$  (1. Kontakt) nach 45 mm Fließweg, zu dem die Fließfront die näher zum Injektionspunkt liegende Messfläche  $SF_1'$  erreicht und ein erstes Ansteigen des Messsignals registriert werden kann (Bild 5-11).



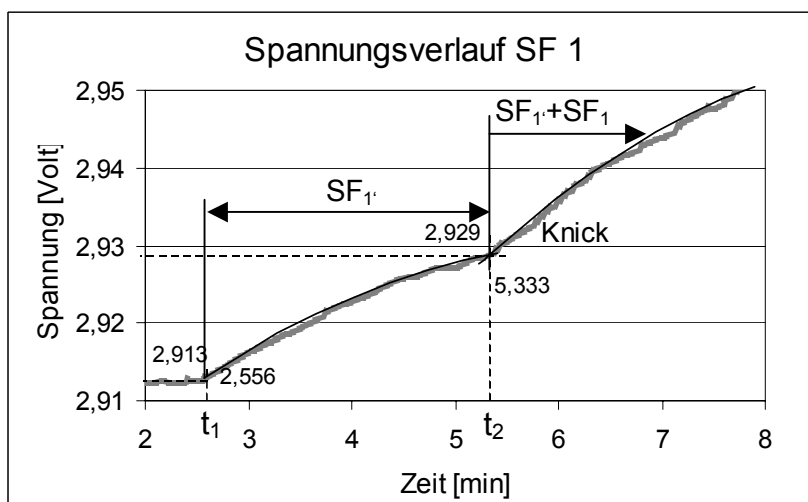
**Bild 5-11** Versatz der Messflächen – 1. Kontakt zum Zeitpunkt  $t_1$

Der Zeitpunkt  $t_2$  (2. Kontakt), zu dem die Fließfront die vom Injektionspunkt 65 mm versetzte Messfläche  $SF_1$  erreicht und – bei gleichförmiger Ausbreitung – die näher zum Injektionspunkt liegende Messfläche  $SF_1'$  um exakt 20 mm überstrichen hat (Bild 5-12).



**Bild 5-12** Versatz der Messflächen – 2. Kontakt zum Zeitpunkt  $t_2$

Da die beiden Sensorflächen zur Auswertung miteinander verschaltet sind, erhält man bei einer Injektion im geschlossenen Werkzeug das Signal für  $SF_{1'} + SF_1$  als gemeinsames Messergebnis entsprechend Bild 5-13.



**Bild 5-13** Online Kalibrierung – Signal der versetzten Messflächen

Mit dem ersten Anstieg des Messsignals nach  $t_1 = 2,913$  min wird das Ankommen der Fließfront an der Sensorfläche  $SF_{1'}$ , also der mit 45 mm näher zum Injektionspunkt liegenden Sensorfläche beschrieben.

Der 2. Knick des Messsignals nach  $t_2 = 5,333$  min beschreibt den Beginn der Überstreichung der Sensorfläche  $SF_1$  mit Fluid, die von der Fließfront nach 65 mm erreicht wird.

Unter der Voraussetzung, dass die Ausbreitung des Mediums in den jeweiligen Hauptachsen symmetrisch erfolgt, ist durch die Fixpunkte bei 45 mm und 65 mm Ausbrei-

tungsradius mit dem Quotienten aus überstrichener Länge des Sensors  $SF_1' = 20$  mm und der dieser überstrichenen Sensorlänge entsprechenden Änderung des Sensorsignals eine Kalibrierung gegeben, auf Basis derer der Füllprozess beschrieben werden kann. Die Daten der online Kalibrierung des hier gewählten Beispiels sind in Tabelle 5-1 zusammengefasst.

**Tabelle 5-1** Daten zur Bestimmung der dielektrischen Feldänderung im Kondensator

Zeitpunkt	Fließweg [mm]	Sensorüberdeckung $SF_1'$ [mm]	Spannung [V]	Zeit [min]
$t_1$	45	0	2,913	2,556
$t_2$	65	20	2,929	5,333

Mit einer Überdeckung des Sensors von 20 mm tritt eine Spannungsänderung von 0,016 Volt auf. Damit entspricht eine Änderung von 0,0008 Volt im Messsignal des langen Sensors  $SF_1$  genau dem Fortschreiten der Fließfront um 1 mm. Dieser Wert kann nun zur Umrechnung des Messsignals [V] in die überstrichene Länge [mm] der Sensorfläche  $SF_1$  genutzt werden.

Zur Verifizierung dieser Kalibrierungsmethode werden die Ergebnisse von insgesamt 3 möglichen Vorgehensweisen der Kalibrierung und anschließenden Bestimmung der Ausbreitung des Harzsystems in einem Aufbau mit CF-Gelege bei einem Faservolumengehalt von  $V_f = 52$  % untersucht.

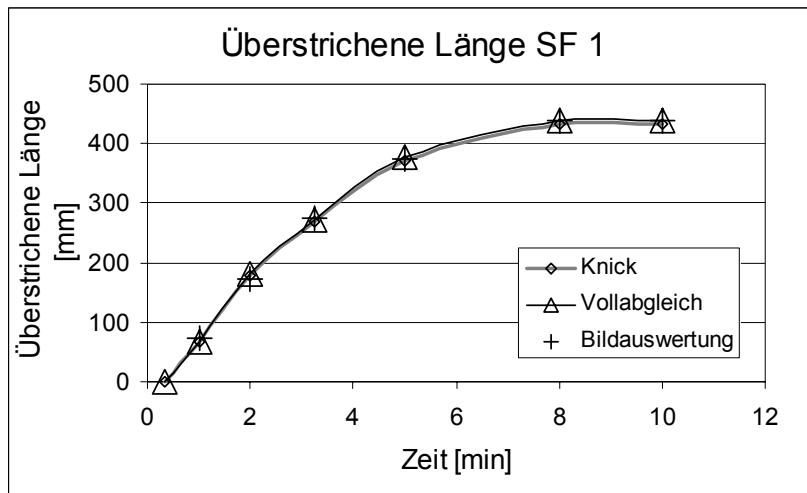
Zur Evaluierung der Datengewinnung mit dem kapazitiven Messsystem wird der Versuch visuell verfolgt ('Bildauswertung'). Dazu wird die Werkzeuggegenform durch eine transparente Vakuumfolie ersetzt. Auf die Werkzeuggegenform kann bei der Verwendung von C-Fasern wie in Kapitel 4.3 beschrieben verzichtet werden, ohne die Wirkungsweise des kapazitiven Messsystems zu beeinträchtigen, da der elektrische Anschluss über die Verstärkungsstruktur selbst und nicht über die Werkzeugform erfolgt. So ist gleichzeitig eine Beobachtung des Ausbreitungsverhaltens der Fließfront zum einen visuell durch den Vakuumaufbau (mit der verwendeten transparenten Folie) und zum anderen anhand der aufgezeichneten Datensätze der Messwerte mit der Sensorik möglich. Verglichen werden die Momentaufnahmen der Bildbeobachtung zu verschiedenen Zeitpunkten sowohl mit den auf Basis der Umsetzung des Messsignals (Knick)

der Sensorflächen  $SF_{1'}$  und  $SF_1$  gewonnenen Informationen, als auch mit der Messkurve auf Basis der Rückrechnung nach dem vollständigen Überstreichen der Sensorflächen.

Die drei Methoden zur Ermittlung der tatsächlich überstrichenen Länge der Sensorflächen (Kalibrierung) im einzelnen:

- Bilderfassung und -auswertung der Fließfront durch die transparente Vakuumfolie anhand der aufgenommenen Bilder während der Injektion.
- Auswertung der Informationen der versetzten Sensorflächen  $SF_{1'}$  und  $SF_1$  (Definition des Knicks und Bestimmung der Signaländerung in Abhängigkeit des fixierten Fließweges von 20 mm).
- Feststellung des Zeitpunktes, zu dem das Sensorsignal unverändert bleibt als Beleg dafür, dass die Fließfront den Sensor vollständig überstrichen hat. Anhand dieses Fixpunktes und der zuvor stattgefundenen Signaländerung kann eine Beziehung zu der bekannten Länge der Sensorflächen hergestellt werden. Diese Methode hat den Nachteil, erst nach Abschluss der Injektion eine Information zum Füllvorgang zu liefern und dient daher ausschließlich der Evaluierung der Messmethode oder der Nachbereitung einer durchgeführten Injektion. Von Vorteil ist die größere Genauigkeit, da über die Gesamtlänge des Sensors integriert wird.

Bild 5-14 fasst die Ergebnisse der Bestimmung der Fließfrontposition mit den drei Messmethoden zusammen.

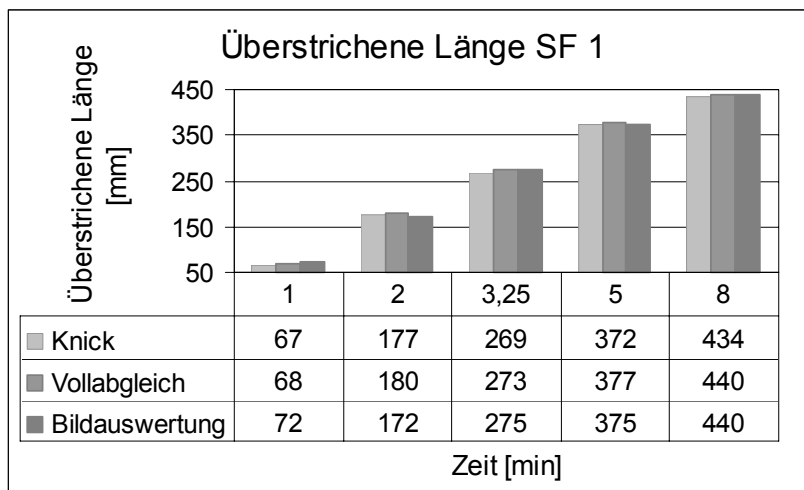


**Bild 5-14** Beschreibung der Fließfrontposition anhand der *online* Bestimmung auf Basis der Identifikation des Knicks der Sensorflächen SF<sub>1'</sub> und SF<sub>1</sub> ('Knick'), der Rückrechnung nach vollständiger Benetzung der Sensorlänge ('Vollabgleich') und anhand der 'Bildauswertung'

Es wird gezeigt, dass die Fließfrontpositionen sowohl bei einer Bestimmung anhand der Auswertung des Knicks als auch des Vollabgleichs mit den tatsächlichen Fließfrontpositionen aus der Bildauswertung keine signifikanten Abweichungen zeigen und damit ein weiterer Nachweis für die Eignung und Genauigkeit des kapazitiven Messsystems gegeben ist.

Der Vergleich der auf Basis der komplett benetzten Sensorflächen – also nach Beendigung des Versuchs – rückgerechneten Messkurve und der online über den Knick der zusammenschalteten und versetzten Sensorflächen bestimmten Fließwege mit der Bildauswertung zeigt nur unwesentliche Unterschiede, die in nachfolgender Darstellung 5-15 tabellarisch und graphisch aufbereitet sind.

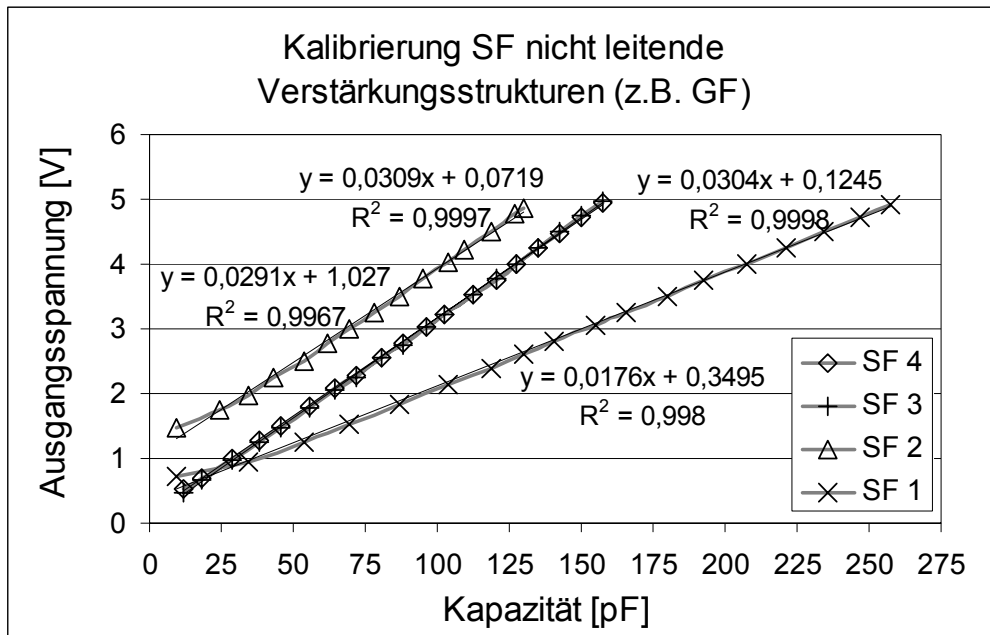




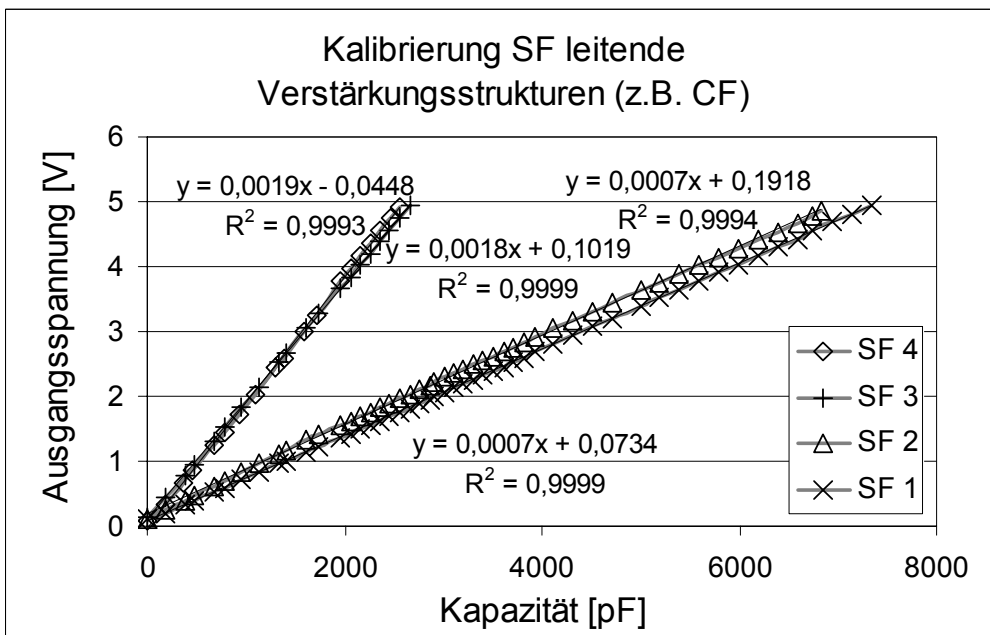
**Bild 5-15** Tabellarischer und graphischer Vergleich der Fließwegbestimmung

Die Ergebnisse zeigen, dass die Nutzung der online Kalibrierung eine geeignete Methode zur Darstellung der Fließvorgänge schon während der Injektion im Werkzeug ist. Es wird aber auch deutlich, dass eine Nachbereitung der Beschreibung des Füllvorgangs auf Basis der Kalibrierung des Vollabgleichs eine genauere Darstellung zulässt und zur präziseren Auflösung des Füllbildes durchaus sinnvoll ist.

Mit den in den Bildern 5-16 und 5-17 beschriebenen Kennlinien der einzelnen Sensorflächen für Messungen an leitenden und nicht leitenden Strukturen und der dadurch definierten Beziehung der verschiedenen Sensoren zueinander ist auf Grundlage der mit SF<sub>1</sub> gewonnenen Basiskalibrierung eine Umrechnung der gegebenen Sensorsignale jedes Sensors in dessen tatsächlich überstrichene Sensorlänge möglich. Ab dem Zeitpunkt der Imprägnierung des Bereichs der versetzten Messflächen kann anhand dieser online Kalibrierung die überstrichene Fläche aller Sensoren und damit das Fließverhalten im geschlossenen Werkzeug insgesamt beschrieben werden.



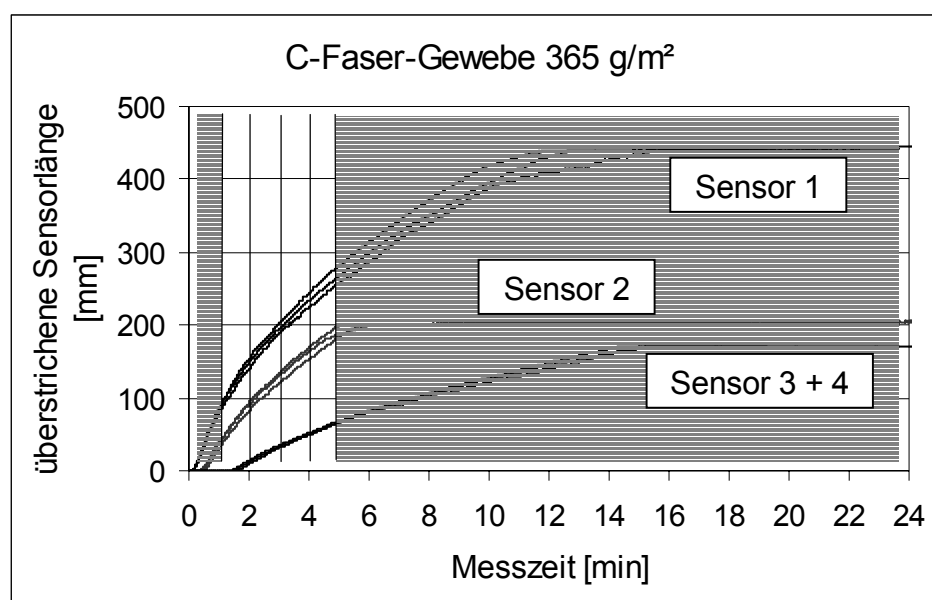
**Bild 5-16** Kennlinien der Sensorflächen für nicht leitende Verstärkungsstrukturen (z.B. Glasfaser, Aramidfaser, ...)



**Bild 5-17** Kennlinien der Sensorflächen für leitende Verstärkungsstrukturen (z.B. Kohlenstofffaser, ...)

## 5.5 Kontinuierliche Messung des Ausbreitungsverhaltens

Auf der Basis der online Basiskalibrierung des Sensorpaares  $SF_{1'}$  +  $SF_1$  und der anschließenden Übertragung dieser Informationen mittels des Vergleichs der Kalibrierungskurven auf die restlichen Sensoren ist eine Bestimmung der tatsächlich überstrichenen Flächen aller Sensoren im geschlossenen Werkzeug möglich. Dies erlaubt eine online Darstellung des Injektionsvorganges entsprechend Bild 5-18. Gezeigt ist eine Versuchsreihe mit drei Wiederholungen zur Imprägnierung von 5 Lagen eines  $365 \text{ g/m}^2$  CF-Gewebes (Atlas 1/4-Bindung) mit einem Standard EP-Harzsystem. Bei einer Kavitätshöhe von  $2,2 \text{ mm}$  wird ein Faservolumengehalt von  $V_f = 46,6 \%$  erreicht.



**Bild 5-18** Füllvorgang für CF-Gewebe Atlas 1/4 ( $365 \text{ g/m}^2$ ) mit Standard EP-Harz

Die bei konstanter Vakuumkraft durchgeführten Versuche zeigen mit fortschreitender Ausbreitung der Ellipse eine Verlangsamung der Fließgeschwindigkeit, beschrieben durch das abflachen der Messkurven. Dies, da mit dem größer werdenden Abstand der Fließfront zum Injektionspunkt bei konstantem Differenzdruck der Druckgradient über der Fließweglänge abnimmt.

Da das neu entwickelte Sensorsystem eine Betrachtung von Messwerten kontinuierlich zu jedem Zeitpunkt erlaubt, ist innerhalb des Aufzeichnungsbereichs der Sensoren 1 bis 4 eine detaillierte Bestimmung der Fließfront möglich. Die Graphen beschreiben während der gesamten Meßzeit kontinuierlich und in Echtzeit die fortschreitende Überdeckung der Sensorflächen durch das Fluid. Beispielsweise für die markierten

Zeitschritte 1, 2, 3, 4 und 5 Minuten sind in Tabelle 5-2 die Messwerte zusammengefasst.

**Tabelle 5-2** Zusammenfassung der Ergebnisse für CF-Gewebe Atlas 1/4 (365 g/m<sup>2</sup>), Standard EP-Harz, überstrichene Sensorlänge [mm]

Zeitpunkt [min]	Versuch N°	Überstrichene Länge [mm] an			
		Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4
1,0	1	83,0	28,4	-	-
	2	83,9	37,3	-	-
	3	76,9	39,1	-	-
2,0	1	152,3	81,5	8,6	8,7
	2	148,1	92,6	10,8	10,9
	3	139,5	90,4	11,7	11,5
3,0	1	201,9	120,6	31,2	30,2
	2	193,7	133,8	34,3	32,0
	3	188,4	130,6	33,4	33,4
4,0	1	243,2	151,9	49,0	47,5
	2	233,3	168,6	49,6	48,9
	3	223,7	163,0	50,1	50,0
5,0	1	274,5	177,4	63,4	63,1
	2	267,1	198,9	67,6	67,1
	3	258,1	187,6	65,8	65,9

Zur Umsetzung dieses Meßergebnisses (überstrichene Länge jeder Sensorfläche in mm) müssen zwei Faktoren berücksichtigt werden. Aufgrund der unterschiedlichen Abstände der einzelnen Sensorflächen zum Injektionspunkt müssen zum einen genau diese Abstände den jeweiligen Messignalen hinzugefügt werden, zum anderen ist bei den Sensoren 1 ( $SF_{1'} + SF_1$ ) und 2 ( $SF_{2'} + SF_2$ ) zu beachten, dass deren jeweils paarweise in den Hauptachsen angeordnete Sensorflächen auch gemeinsam verschaltet sind. Deshalb sind hier die halben Meßwerte dem Abstand der Sensorfläche zum Mittelpunkt hinzuzufügen. Nach Auswertung der Daten (Überstrichene Länge des Sensors + Abstand des Sensors vom Injektionspunkt) erhält man die in Tabelle 5-3 zusammengefassten Ergebnisse, die den tatsächlichen Ort der Fließfront an den 4 (+2) Umfangspunkten  $P_1 (+ P_{1'})$ ,  $P_2 (+ P_{2'})$ ,  $P_3$  und  $P_4$  (vgl. Bild 5-5) auf den entsprechenden Sensorflächen  $SF_{1+1'}$ ,  $SF_{2+2'}$ ,  $SF_3$  und  $SF_4$  mit dem Injektionspunkt  $P_0$  als Ursprung beschreiben und entsprechend Kap. 5.3 eine eindeutige Bestimmung der Ausbreitungsellipse ermöglichen.

**Tabelle 5-3** Zusammenfassung der Ergebnisse für CF-Gewebe Atlas 1/4 (365 g/m<sup>2</sup>), Standard EP-Harz, tatsächliche Fließfrontposition [mm] ab Ursprung

Zeitpunkt [min]	Versuch N°	Fließfront [mm] ab Injektionspunkt an			
		P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>
1,0	1	96	79	-	-
	2	97	84	-	-
	3	93	85	-	-
2,0	1	131	106	124	124
	2	129	111	126	126
	3	125	110	127	127
3,0	1	156	125	146	145
	2	152	132	149	147
	3	149	130	148	148
4,0	1	177	141	164	163
	2	172	149	165	164
	3	167	146	165	165
5,0	1	192	154	178	178
	2	189	164	183	182
	3	184	159	181	181

Die Ergebnisse der Fließfrontbestimmung bestätigen die Reproduzierbarkeit des Messaufbaus und der -methode. Zudem zeigen die im Betrag gleichen Messwerte der Sensoren 3 und 4, dass keine Drehung der Ausbreitungsellipse um den Ursprung vorliegt.

Mit der Bestimmung der in 5.2 aufgezeigten Mindestanzahl an Informationspunkten – 4 Umfangspunkte P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, P<sub>3</sub> und P<sub>4</sub> zusätzlich zu dem mit P<sub>0</sub> definierten Ursprung – ist die Ausbreitungsellipse zu jedem Zeitpunkt t<sub>n</sub> eindeutig definiert.

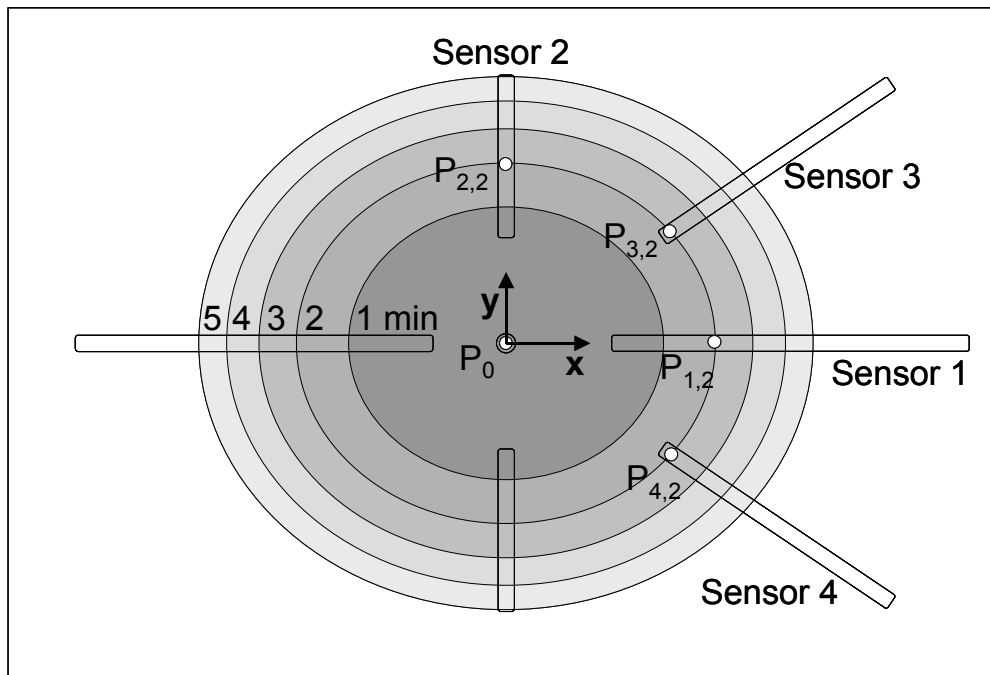
Analog zu den in 5.2 beschriebenen Berechnungsschritten lautet die Ellipsengleichung für die Ausbreitungsellipse beispielsweise im 2. Versuch zum Zeitpunkt 2 min (in Tabelle 5-3 hervorgehoben) mit

$$P_1 = 0,129; P_2 = 0,111; P_3 = 0,126 \text{ und gewählt } a = 1$$

$$x^2 + 1,35 y^2 - 0,01759 = 0. \quad (5-28)$$

Mit dem Übertrag der in Tabelle 5-3 berechneten Werte von Zeitschritt zu Zeitschritt ist eine Visualisierung des Fließfrontverlaufs der Matrix auf Basis der Messergebnisse möglich. Anhand der Versuchsreihe 2 sind die Ausbreitungsellipsen zu den Zeitschritten

$t = 1, 2, 3, 4$  und  $5$  Minuten (exemplarisch sind die Umfangspunkte  $P_{1,2}$ ,  $P_{2,2}$ ,  $P_{3,2}$  und  $P_{4,2}$  zum Zeitpunkt  $t = 2$  min dargestellt) in Bild 5-19 beschrieben.



**Bild 5-19** Visualisierung des Füllvorgangs für CF-Gewebe  $365 \text{ g/m}^2$ , Standard EP-Harz

Mit der Visualisierung des Füllvorgangs und der eindeutigen Bestimmung der Ausbreitungsellipse bei einem zentralen Punktanguss im geschlossenen Werkzeug sind die Voraussetzungen für eine Messung der Permeabilität von Verstärkungsstrukturen gegeben. Die Durchführung der Versuche zur Bestimmung der Permeabilität folgt dabei den beschriebenen Beispielen zur kontinuierlichen Messung des Ausbreitungsverhaltens (Kapitel 5.4) und der Visualisierung (Kapitel 5.5).

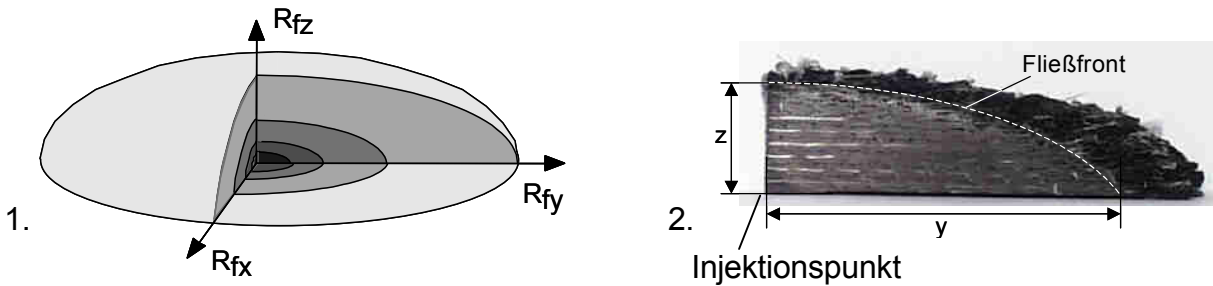
## 5.6 Bestimmung der Permeabilität

Für die Permeabilitätsmessungen wird analog dem oben beschriebenen Ablauf bei konstanter Vakuumkraft von einem zentralen Punktanguss aus die trockene Verstärkungsstruktur imprägniert und dieser Tränkungsverlauf dokumentiert. Da es sich um einen Materialwert der Verstärkungsstruktur handelt, müssen Einflüsse wie beispielsweise sich ändernde Viskositäten der zu injizierenden Matrix oder die Dicke des Lagenaufbaus am Injektionspunkt möglichst ausgeschlossen werden. Daraus ergeben sich zum bisherigen Aufbau zwei Änderungen:

Erstens erfolgte die Verifizierung der Brauchbarkeit des entwickelten Messsystems unter fertigungstechnischen Bedingungen. Die in den Kap. 5.2 bis 5.4 beschriebenen Versuche wurden mit für die Harzinjektionstechnik typischen duroplastischen Matrixsystemen (z.B. EP-, UP- oder VE-Harzsysteme) durchgeführt.

Mit der Reaktionskinetik ändern sich aber bei Versuchen mit längeren Injektionszeiten im Verlauf der Imprägnierung der Verstärkungsstruktur die Viskositäten entsprechend der beginnenden Gelierung und anschließenden Aushärtung dieser Matrixsysteme. Zur Bestimmung der Permeabilität als Charakteristikum der Verstärkungsstruktur werden die Versuche deshalb mit einem viskositätskonstanten Referenzmedium wie beispielsweise einem Öl durchgeführt. So wird ausgeschlossen, dass während der Versuchsdauer und der Imprägnierung der Verstärkungsstruktur aufgrund der Reaktionskinetik und der damit verbundenen Viskositätsänderung beispielsweise eines EP-Harzsystems eine Verfälschung der Messergebnisse durch nicht von der Verstärkungsstruktur selbst ausgehende Einflüsse erfolgt [147]. Die Verwendung eines Referenzmediums hat darüber hinaus den weiteren Vorteil, dass keine Aushärtung des Harzsystems abgewartet werden muss und die Versuchsdurchführung mit dem Füllen der Form – dem für die Permeabilitätsmessung interessanten Teil – beendet werden kann.

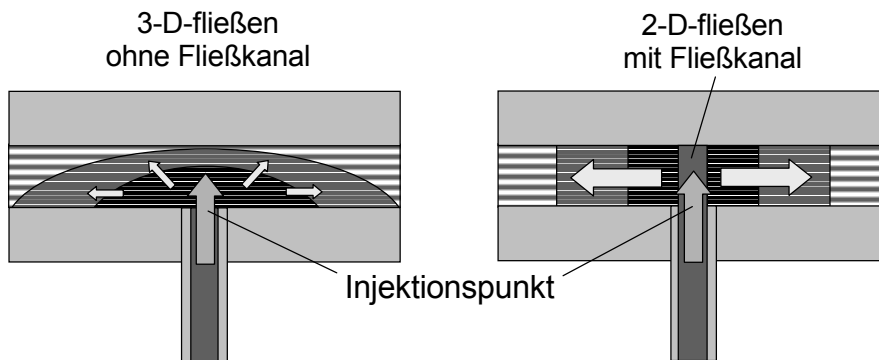
Zweitens muss zur Untersuchung der 2-D-Permeabilität der flächigen Verstärkungsstrukturen während der gesamten Messung ein 2-dimensionales Strömungsverhalten dargestellt werden. Es soll sicher gestellt sein, dass mit Beginn der Injektion auch am Injektionspunkt selbst ein 2-dimensionales, und nicht ein die Messergebnisse beeinflussendes 3-dimensionales Strömungsbild auftritt [148], wie es in Bild 5-20.1 skizziert und in 5-20.2 an einem Schliffbild eines aufgeschnittenen Injektionsversuchs schematisch dargestellt ist.



**Bild 5-20** 3-dimensionales Strömungsbild

- 1 – schematische Darstellung
- 2 – Schliff am Schnitt durch einen 3-dimensionalen Tränkungsverlauf

Ein 2-dimensionales Strömungsverhalten mit Beginn der Injektion wird durch Einbringen eines definierten Fließkanals, der durch die gesamte Dicke der Verstärkungsstruktur am Injektionspunkt geführt wird, erreicht. Damit wird das Injektionsmedium ohne Fließwiderstand durch die gesamte Dicke der Struktur transportiert und ein ausschließlich 2-dimensionales Tränkungsverhalten in der x-y-Ebene ist von Beginn der Injektion an sichergestellt. Bild 5-21 verdeutlicht das Füllbild am Injektionspunkt zunächst ohne Fließkanal (mit dem Ergebnis eines 3D-Füllbildes) und dann mit einem in die Verstärkungsstruktur eingebrachten Fließkanal, der eine ausschließlich 2-dimensionale Ausbreitung der Fließfront ermöglicht.



**Bild 5-21** Einstellung eines 2-dimensionalen Strömungsbildes

- 1 – 3D-fließen ohne Fließkanal
- 2 – 2D-fließen mit Fließkanal

Auf Basis dieser Änderungen wird zur vollständigen Charakterisierung einer Verstärkungsstruktur die Permeabilität als Funktion des Faservolumengehaltes  $V_f$  dargestellt.



Nach Gleichung

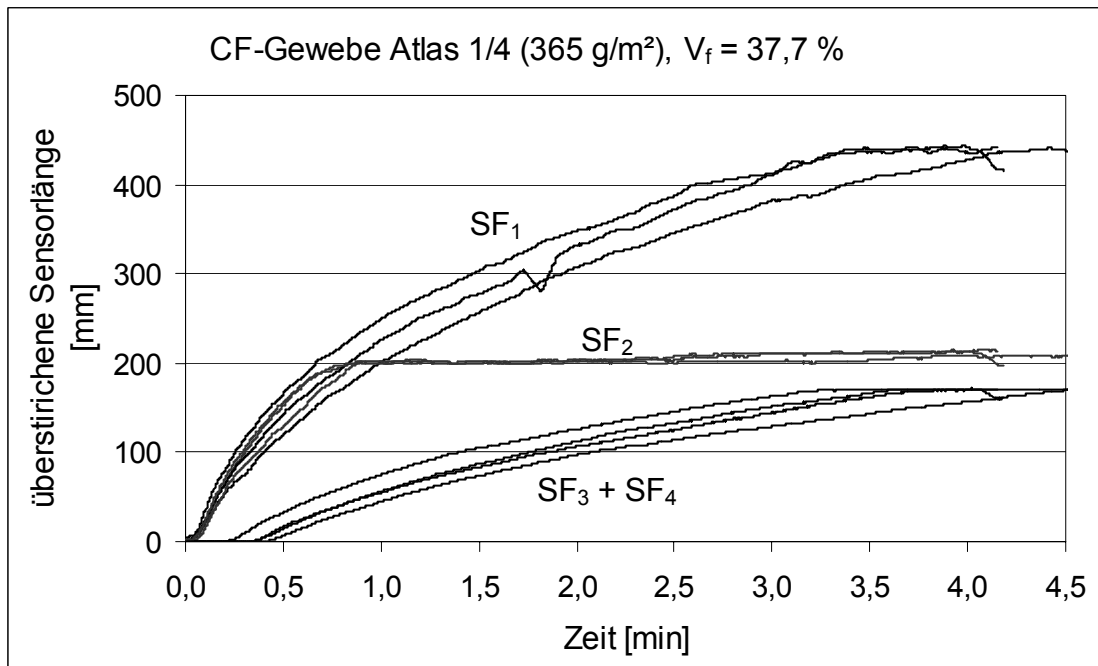
$$V_f = \frac{n \cdot \xi}{1000 \cdot \rho_f \cdot d} \quad (5-29)$$

kann eine Einstellung des gewünschten Faservolumengehaltes  $V_f$  bei gegebenen Materialdaten der Verstärkungsstruktur – Flächengewicht  $\xi$  [ $\text{g}/\text{m}^2$ ] und Dichte  $\rho_f$  [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] – über die Lagenanzahl  $n$  und/oder über die Kavitätshöhe  $d$  erfolgen. Gewählt wird für die hier vorgestellten Untersuchungen eine Änderung der Lagenzahl  $n$  bei konstanter Kavitätshöhe  $d = 2,2$  mm. Für ein  $365 \text{ g}/\text{m}^2$  CF-Gewebe ( $\rho_f = 1,78 \text{ kg}/\text{m}^3$ ) mit einer Atlas 1/4-Bindung ergeben sich damit bei 4, 5 bzw. 6 Lagen in einer Kavität mit 2,2 mm Höhe die Faservolumengehalte entsprechend Tabelle 5-4.

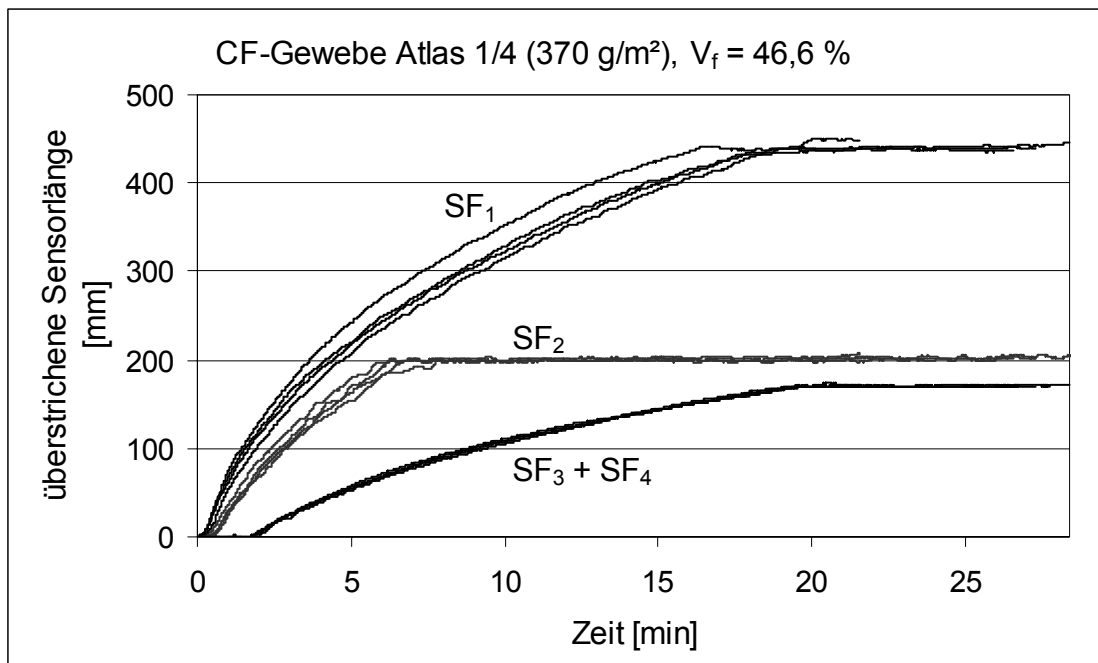
**Tabelle 5-4** Faservolumengehalt  $V_f$  in Abhängigkeit der Lagenzahl  $n$

Material	Lagenzahl $n$ [1]	Flächengewicht $\xi$ [ $\text{g}/\text{m}^2$ ]	Dichte $\rho_f$ [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	Kavitätshöhe $d$ [mm]	$V_f$ [%]
CF-Gewebe	4	365	1,78	2,2	37,3
	5	365	1,78	2,2	46,6
	6	365	1,78	2,2	55,9

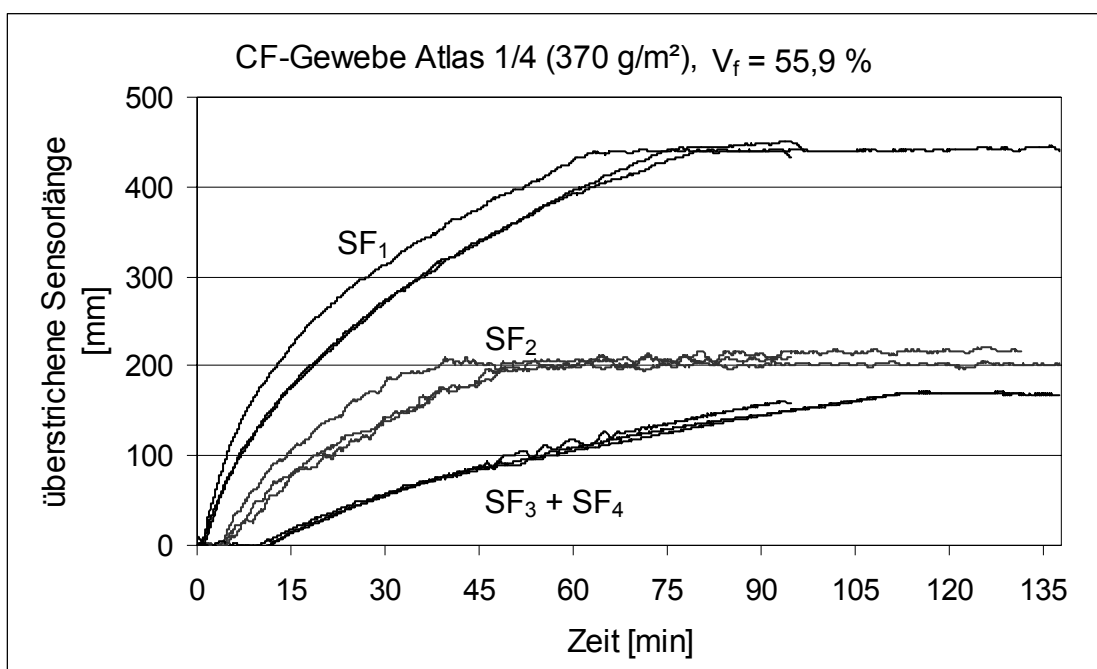
Die Dokumentation der Tränkungsverläufe des  $365 \text{ g}/\text{m}^2$  CF-Gewebes mit einer Atlas 1/4-Bindung bei den berechneten Faservolumengehalten  $V_f = 37,3 \%$ ,  $46,6 \%$  und  $55,9 \%$  zeigen die Bilder 5-22 bis 5-24.



**Bild 5-22** Tränkungsverlauf CF-Gewebe Atlas 1/4 (370 g/m<sup>2</sup>), V<sub>f</sub> = 37,7 %, Medium Öl



**Bild 5-23** Tränkungsverlauf CF-Gewebe Atlas 1/4 (365 g/m<sup>2</sup>), V<sub>f</sub> = 46,6 %, Medium Öl



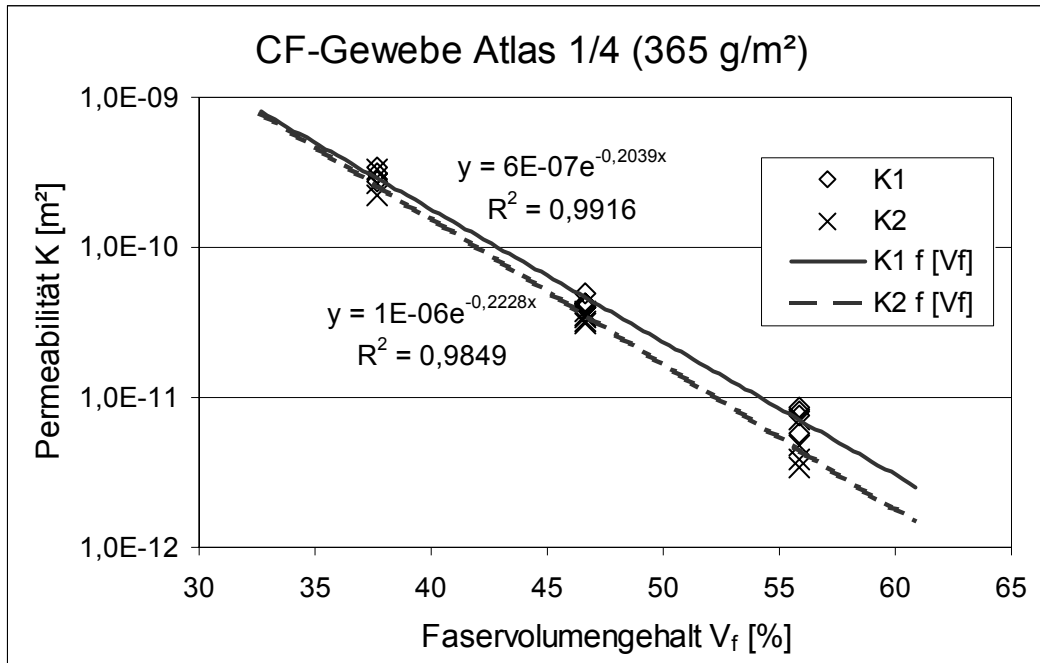
**Bild 5-24** Tränkungsverlauf CF-Gewebe Atlas 1/4 (365 g/m<sup>2</sup>), V<sub>f</sub> = 55,9 %, Medium Öl

Mit der Untersuchung einer Verstärkungsstruktur bei unterschiedlichen Faservolumengehalten entsprechend den Bildern 5-20 bis 5-22 erfolgt eine vollständige Charakterisierung des Materials. Tabelle 5-5 zeigt die berechneten Permeabilitäten K<sub>1</sub> und K<sub>2</sub>.

**Tabelle 5-5** Permeabilitäten K<sub>1</sub> und K<sub>2</sub> bei unterschiedlichem Faservolumengehalt V<sub>f</sub>

V <sub>f</sub> [%]	Versuch	K <sub>1</sub>	$\bar{K}_1$	K <sub>2</sub>	$\bar{K}_2$
37,7	1	3,415E-10	3,104E-10	3,299E-10	2,729E-10
	2	3,135E-10		2,684E-10	
	3	2,762E-10		2,204E-10	
46,6	1	4,287E-11	4,296E-11	3,744E-11	3,389E-11
	2	4,106E-11		3,495E-11	
	3	4,001E-11		3,407E-11	
	4	4,199E-11		3,075E-11	
	5	4,891E-11		3,228E-11	
55,9	1	8,489E-12	7,486E-12	3,916E-12	4,806E-12
	2	7,487E-12		3,371E-12	
	3	5,783E-12		4,850E-12	
	4	8,185E-12		7,087E-12	

Die Grafik in Bild 5-25 fasst die Ergebnisse der Permeabilitätsmessungen an einem CF-Gewebe Atlas 1/4 (365 g/m<sup>2</sup>) zusammen.



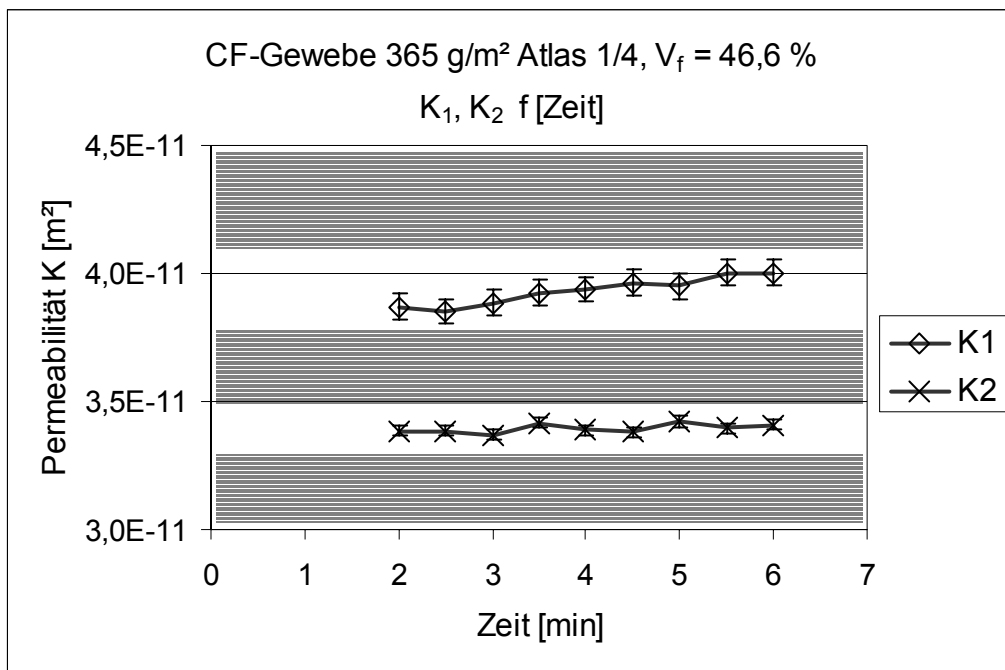
**Bild 5-25** Vollständige Charakterisierung der Permeabilitäten K<sub>1</sub> und K<sub>2</sub> als Funktion des Faservolumengehaltes V<sub>f</sub> eines CF-Gewebes Atlas 1/4 (365 g/m<sup>2</sup>)

Bei der gewählten teillogarithmischen Darstellung kann anhand einer überschaubaren Anzahl von Versuchen und der Bestimmung der Geradengleichung der Trendlinie eine vollständige Beschreibung der Materialkennwerte Permeabilität K<sub>1</sub> und K<sub>2</sub> als Funktion des Faservolumengehaltes V<sub>f</sub> erfolgen. Die mit höheren Faservolumengehalten stärker differierenden Werte von K<sub>1</sub> und K<sub>2</sub> beschreiben die Anisotropie der untersuchten Struktur, welche erst bei höherem V<sub>f</sub> einen Einfluss auf das Ausbreitungsverhalten nimmt. Mit steigendem Faservolumengehalt wird es zunehmend ein Voreilen der Fließfront in x-Richtung im Vergleich zur y-Richtung geben (K<sub>1</sub> > K<sub>2</sub>).

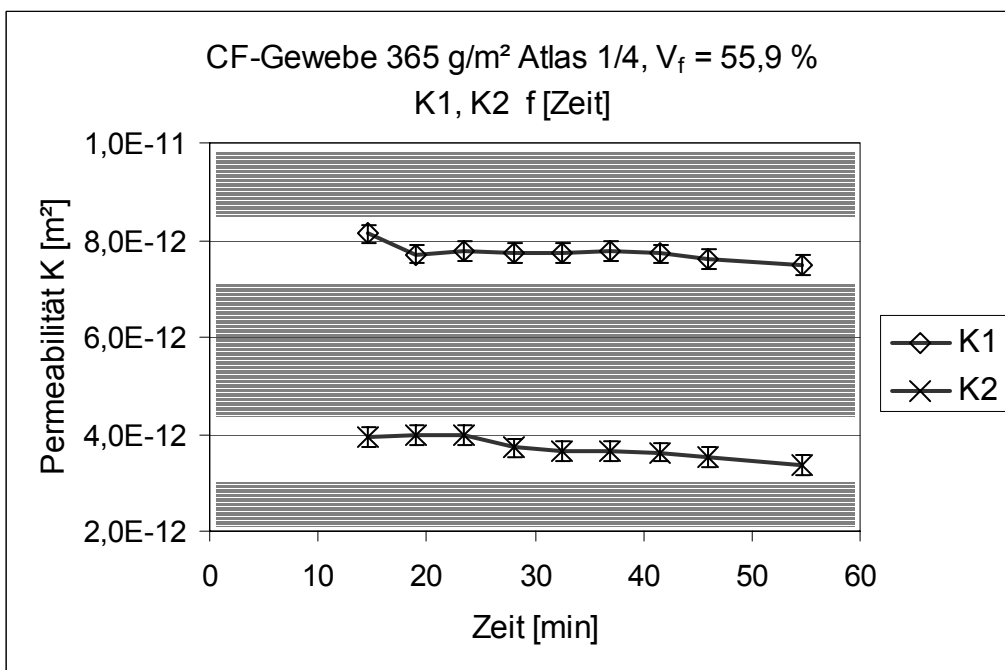
## 5.7 Online Prozesskontrolle

Aufgrund der kontinuierlichen Messwertaufnahme ist eine online Darstellung der Permeabilitätswerte über der Versuchsdauer und damit eine kontinuierliche und lückenlose Qualitätssicherung des Injektions- und Fertigungsprozesses möglich. In den Bildern 5-26 und 5-27 ist in Anlehnung an den Einsatz von Regelkarten im Qualitätsmanagement

mit einem oberen und unteren Toleranzwert eine Möglichkeit zur Darstellung der kontinuierlichen Beobachtung des Injektionsprozesses anhand der Beschreibung der Permeabilitäten  $K_1$  und  $K_2$  für CF-Gewebe Atlas 1/4 (365 g/m<sup>2</sup>) mit 5 Lagen,  $V_f = 46,6\%$  bzw. 6 Lagen,  $V_f = 55,9\%$  bei einer Kavitätshöhe von 2,2 mm gezeigt.



**Bild 5-26** Kontinuierliche online Permeabilitätsmessung  
 CF-Gewebe Atlas 1/4 (365 g/m<sup>2</sup>), 5 Lagen,  $V_f = 46,6\%$



**Bild 5-27** Kontinuierliche online Permeabilitätsmessung  
 CF-Gewebe Atlas 1/4 (365 g/m<sup>2</sup>), 6 Lagen,  $V_f = 55,9\%$

Entsprechend dem Faservolumengehalt und der davon abhängigen Fließfrontgeschwindigkeit kann während die Sensorflächen mit dem Fluid überstrichen werden eine kontinuierliche online Berechnung der Permeabilität erfolgen. Gemäß dem Gesetz von D'Arcy muss bei einem homogenen zu durchströmenden Material die Permeabilität konstant bleiben. Kommt es zu Abweichungen von diesem im Rahmen einer Qualitätskontrolle sehr gut nachvollziehbaren, da konstanten Wert, liegt bei ansonsten konstanten Versuchsparametern folglich eine Änderung im Material vor. Bei Abweichungen der Permeabilitätsmesswerte aus den zu definierenden Toleranzbereichen mit den oberen und unteren Toleranzgrenzen besteht so schon während der Versuchsdurchführung die Möglichkeit zur Interpretation der Messungen und einer Charakterisierung der Verstärkungsstruktur.

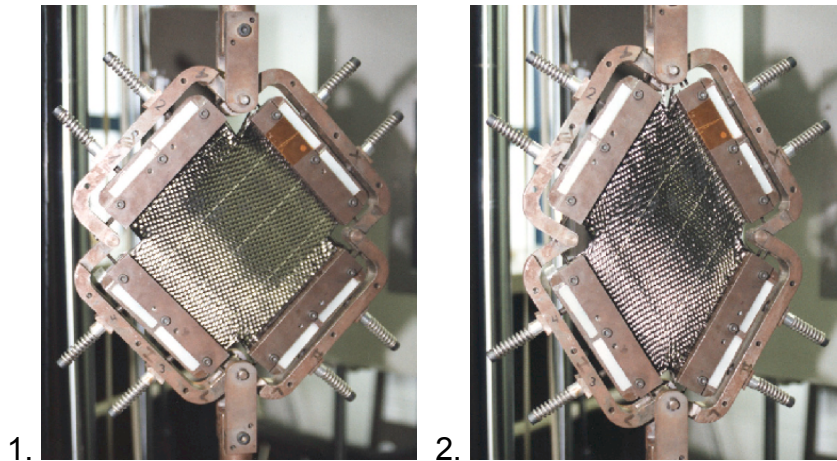
## 6 Weitere Messaufgaben

### 6.1 Faservolumengehalt und Lagenzahl

Die genaue Bestimmung des Faservolumengehaltes im Werkzeug ist zunächst für eine reproduzierbare Fließfrontausbreitung eine entscheidende Grundlage. Wie die Permeabilitätsbestimmung in Abhängigkeit des Faservolumengehaltes  $V_f$  zeigt, beeinflusst jede Abweichung des Faservolumengehaltes die Ausbreitung der Fließfront nachhaltig. Für den Injektionsvorgang ist die Bestimmung bzw. Kontrolle des Faservolumengehaltes damit also schon vor Beginn der Injektion selbst ein entscheidendes Maß um sicher zu stellen, dass der Füllvorgang reproduzierbar und kontrolliert durchgeführt werden kann [149].

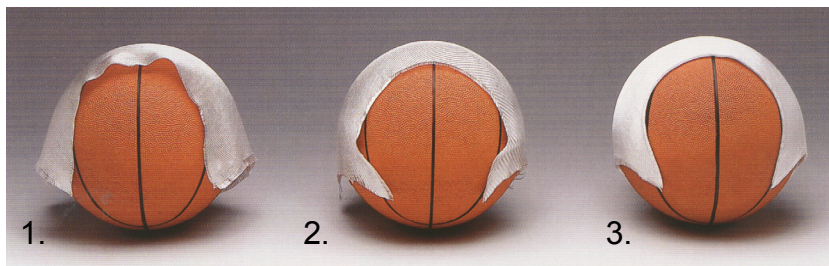
Eine entscheidende Rolle spielt die definierte Ablage der Verstärkungsstrukturen [150] auch als Grundlage für die späteren mechanischen Eigenschaften des Bauteils. Entsprechend den Vorgaben aus Berechnung bzw. Konstruktion ist die korrekte Positionierung der Verstärkungsstrukturen und damit die Ausrichtung der Verstärkungsfasern daher ebenso wichtig wie zur definierten Tränkung in der Kavität auf Basis von Simulation und Vorversuchen [151].

Ein wichtiger Schritt zu einer kontrollierten und reproduzierbaren Faserablage ist die Preformtechnik [152]. Mit deren Hilfe kann durch einen der Injektion vorgeschalteten, möglichst automatisierten Prozess ein zu einer Einheit zusammengefasster Verstärkungskomplex aus unterschiedlichsten Elementen für ein großes Maß an Produktionssicherheit und Zykluszeitoptimierung sorgen [153]. Dennoch bei der Injektion auftretende Veränderungen können durch einen geeigneten Kontrollmechanismus ausgeschlossen werden. So entstehen in vielen Bereichen dreidimensional gekrümmter Elemente Zonen mit verstärktem Verzug oder hohem Drapierungsgrad [154, 155]. Ein Beispiel für den Einfluss einer zweidimensionalen Scherung auf ein CF-Gewebe ist in den Bildern 6-1.1 und 6-1.2 gezeigt.



**Bild 6-1** Scherung eines CF-Gewebes Atlas 1/5 (270 g/m<sup>2</sup>)

Diese Verformungen führen nicht nur lokal zur Verschiebung und zum Verzug sowohl einzelner Faserbündel als auch des betroffenen Bereichs. Sie wirken sich in der gesamten Verstärkungsstruktur aus und können gerade in dreidimensionalen, geometrisch komplexen Strukturen zu unerwünschten – und letztlich zum Ausschuss führenden – Änderungen im Bauteil führen [156]. Die sehr unterschiedliche 3D-Drapierbarkeit [157] von GF-Geweben beispielsweise aufgrund verschiedener Bindungsarten wird in Bild 6-2 beschrieben.

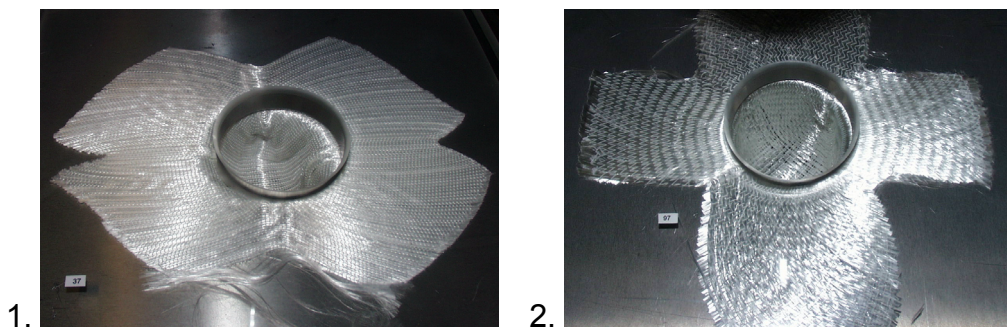


**Bild 6-2** 3-D Drapierung verschiedener Glas-Gewebe [158]

- 1 – Leinwandbindung
- 2 – Körperbindung
- 3 – HD-Spezialbindung

Auch Bild 6-3 zeigt für die Drapierung verschiedener GF-Gelege grundsätzliche Unterschiede, abhängig von der Konstruktion, der Bindungsart und einer Reihe weiterer Parameter, die bei der Herstellung von Gelegen [159] variiert werden können.



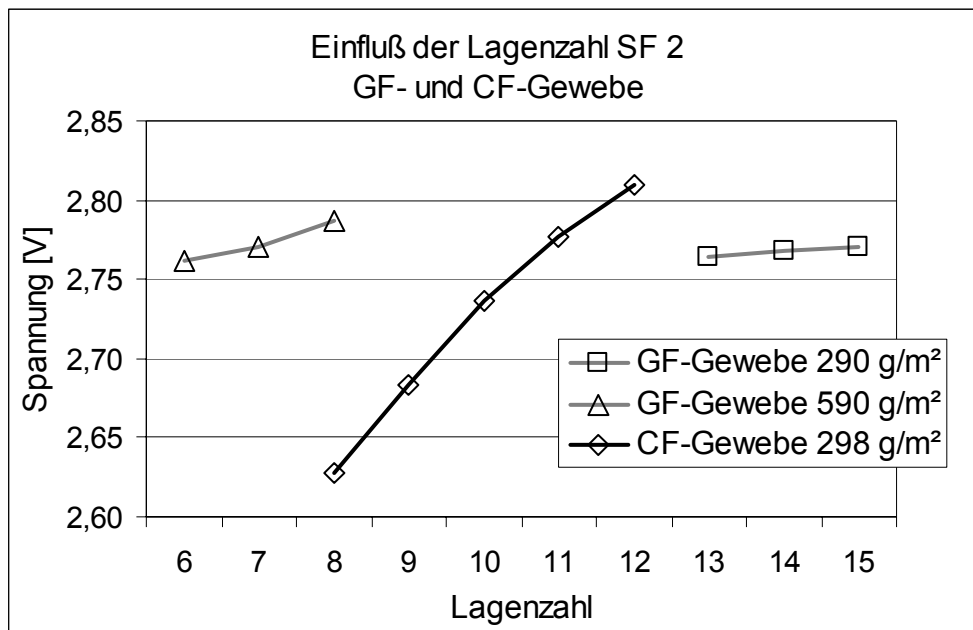


**Bild 6-3** 3-D Drapierung verschiedener Glas-Gelege (450 g/m<sup>2</sup>, Tricot-Bindung) [160]

- 1 – monoaxiales (0°) Gelege
- 2 – bidiagonales (±45°) Gelege

Sehr deutlich ist die Verschiebung und Umorientierung der Fasern zu beobachten, welche aufgrund von Bündelungen der einzelnen Faserstränge zu Veränderungen des Faservolumengehaltes führen. Besonders problematisch kann sich dabei die lokale Änderung des Faservolumengehaltes auf das saubere Schließen des Werkzeugs, den Injektionsprozess und schließlich auch die mechanischen Eigenschaften des fertigen Bauteils auswirken.

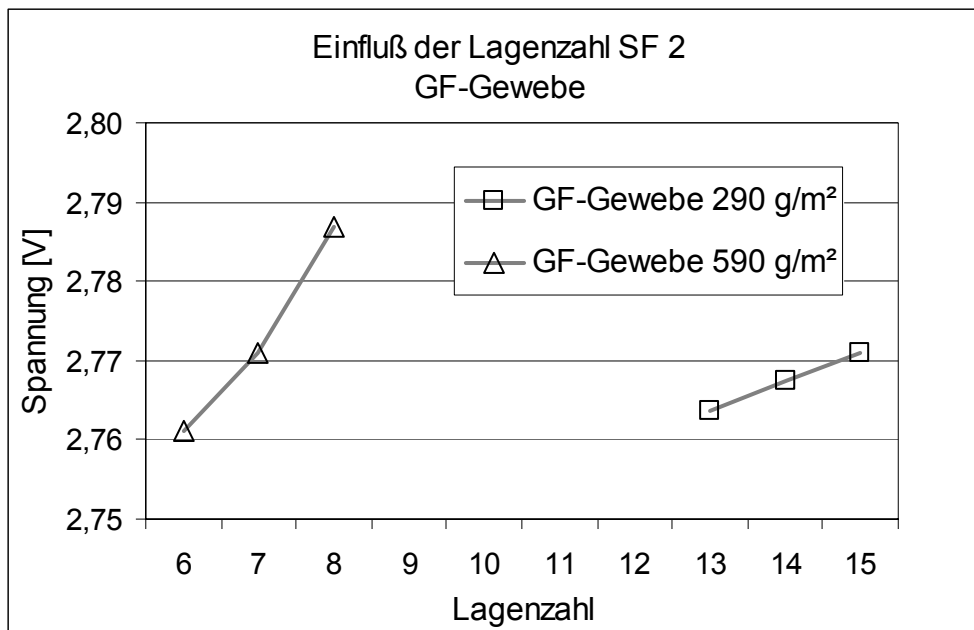
Das kapazitive Messsystem bietet hier eine weitere Möglichkeit zur Kontrolle. Schon nach der Belegung mit der Verstärkungsstruktur / Preform und dem Schließen des Werkzeugs kann das System zur Quantifizierung des Faservolumengehaltes eingesetzt werden. In Abhängigkeit der eingelegten absoluten Fasermenge wird der Wert  $\epsilon_{\text{Faser}}$  beeinflusst und macht so die Bestimmung des Faservolumengehaltes möglich. Die Ergebnisse der Versuche mit variierenden Lagenzahlen, also einer Änderung des Faservolumengehaltes, zeigen dies (Bild 6-4).



**Bild 6-4** Quantifizierung des Faservolumengehaltes für zwei Glasfaser (GF) - Gewebe (290 g/m<sup>2</sup> und 590 g/m<sup>2</sup>) und ein Kohlenstofffaser (CF) - Gewebe (298 g/m<sup>2</sup>). Die Faservolumengehalte  $V_f$  [%] errechnen sich entsprechend den Lagenzahlen zu

GF-Gewebe 290 g/m <sup>2</sup> –	13 Lagen $V_f = 45,3 \%$
	14 Lagen $V_f = 48,8 \%$
	15 Lagen $V_f = 52,3 \%$
GF-Gewebe 590 g/m <sup>2</sup> –	6 Lagen $V_f = 42,5 \%$
	7 Lagen $V_f = 49,6 \%$
	8 Lagen $V_f = 56,7 \%$
CF-Gewebe 298 g/m <sup>2</sup> –	8 Lagen $V_f = 41,9 \%$
	9 Lagen $V_f = 47,1 \%$
	10 Lagen $V_f = 52,3 \%$
	11 Lagen $V_f = 57,5 \%$
	12 Lagen $V_f = 62,8 \%$

Es wird deutlich, dass sowohl für GF- als auch für CF-Materialien, also für leitende als auch nicht leitende Verstärkungsstrukturen, ein direkter Zusammenhang zwischen dem Faservolumengehalt und dem Ausgangsmesssignal der kapazitiven Sensorik bei geschlossenem Werkzeug besteht. Werden entsprechend Bild 6-5 die Ergebnisse für die beiden GF-Gewebe in angepasstem Maßstab dargestellt, wird wie schon in Bild 6-4 für das CF-Gewebe der Zusammenhang von Lagenzahl zu Messsignal noch verdeutlicht.



**Bild 6-5** Quantifizierung des Faservolumengehaltes für die beiden Glasfaser (GF) - Gewebe (290 g/m<sup>2</sup> und 590 g/m<sup>2</sup>)

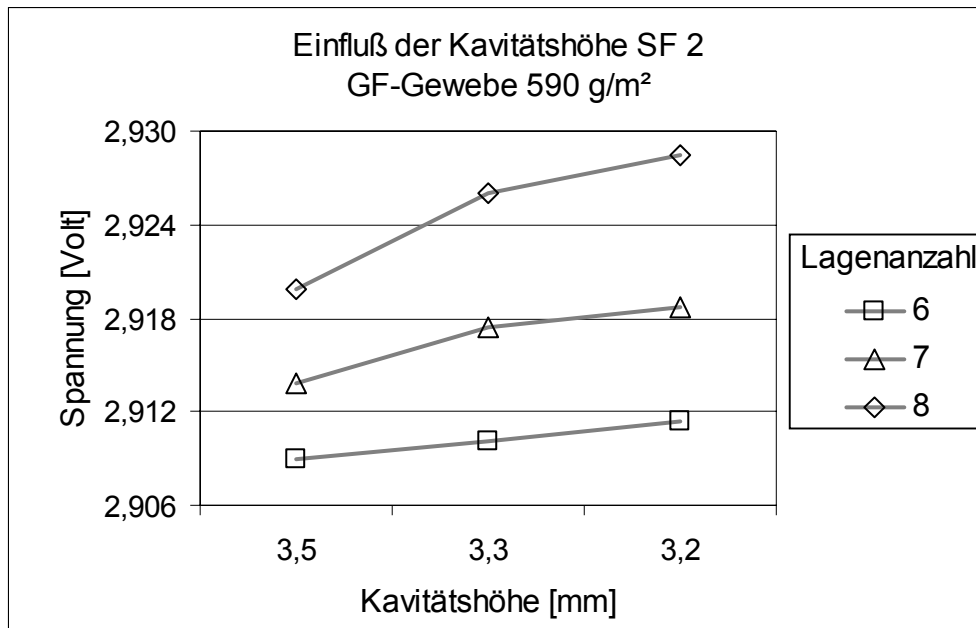
Mit der Auswertung der Kondensatorsignale schon vor der Injektion bietet das entwickelte System zur Beschreibung der Füllvorgänge in geschlossenen Werkzeugen damit zusätzlich ein sinnvolles Mess- und Kontrollinstrument zur Analyse der Verteilung der Verstärkungsstruktur im Werkzeug. Dies hilft, kostspieligen Ausschuss aufgrund nicht erfolgreicher Injektionen oder mangelhafter Bauteilqualität aufgrund falscher Faservolumengehalte auszuschließen.

## 6.2 Kavitätshöhe

Mit dem Aufbau des Sensors als kapazitives System ist es weiterhin möglich, den Abstand der Platten des Kondensators zueinander als Kontrollinstrument zur Bestimmung der Kavitätshöhe zu nutzen. In Abhängigkeit der Kavitätshöhe in einem Werkzeug wird die Bauteildicke und während der Injektion aufgrund des geänderten Faservolumengehaltes die Fließfront des Matrixsystems – gewollt oder ungewollt – beeinflusst. Die gezielte Steuerung des Harzflusses wird beispielsweise beim ARTM (*Advanced Resin Transfer Moulding*) (vgl. Kap. 2.1.4) umgesetzt [161].

Entscheidender Nachteil dieser Fertigungstechnik ist der zusätzliche Kontroll- und Regelungsaufwand während der Injektion zur Steuerung der Kavitätshöhe. Der Einsatz

des Kondensatormesssystems bietet hier eine ideale Kombination: Neben der beschriebenen Dokumentation der Fließfront als Informationsquelle zur Bestimmung des Umschaltpunktes 'Werkzeug schließen' ermöglicht das kapazitive Messsystem die genaue Kontrolle des Abstandes der beiden Werkzeughälften zueinander, in Bild 6-6 mit einem eingelegten GF-Gewebe dargestellt.



**Bild 6-6** Bestimmung der Höhe der Werkzeugkavität

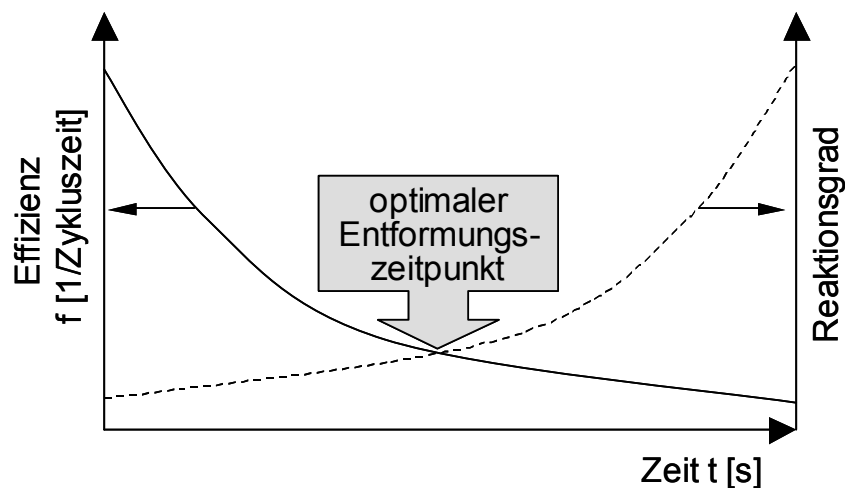
Die gemessenen Werte zeigen den Zusammenhang zwischen dem Signal des Kondensators und den mittels Distanzblechen (0,1 und 0,2 mm) eingestellten Kavitätshöhen bei verschiedenen Lagenzahlen.

Für den Fall, dass sowohl die Kavitätshöhe als auch der Faservolumengehalt dokumentiert werden soll, muss beachtet werden, dass die beiden Messprinzipien sich dann überlagern.

### 6.3 Aushärtezyklus

Mit der Forderung, bestehende Prozesse effizienter zu gestalten und damit einer höheren Produktivität zuzuführen, müssen die Zykluszeiten verkürzt werden [162]. Zur Sicherung der Bauteilqualität müssen aber ausreichende Verweilzeiten im Werkzeug in Abhängigkeit der Reaktionskinetik einzusetzender Harzsysteme definiert werden. Um die-

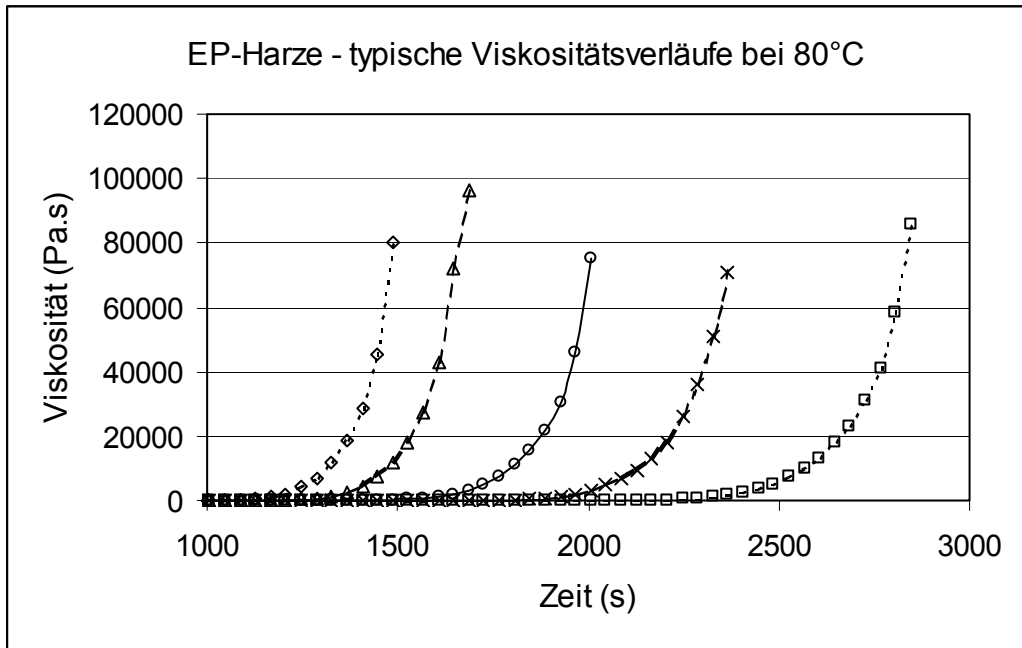
sen Anforderungen folgend den frühest möglichen Entformungszeitpunkt zu finden, sind Informationen zur Reaktion und dem Aushärteverlauf des Harzsystems notwendig [163]. Die gegenläufigen Entscheidungskriterien zur Bestimmung des optimalen Entformungszeitpunkts sind in Bild 6-7 verdeutlicht.



**Bild 6-7** Optimaler Entformungszeitpunkt

Die Dokumentation des Aushärteverlaufes ermöglicht die exakte Bestimmung des Zeitpunkts der Entformung eines Bauteils. Nach der Injektion und dem vollständigen Füllen der Kavität werden in Abhängigkeit des eingesetzten Harzsystems, der Temperierung, der Bauteildicke und des Faservolumengehaltes sowohl die Prozesszeit als auch die Bauteilqualität innerhalb des Kernprozesses beeinflusst [164]. Ein zu frühes Entformen des Bauteils führt im einfachsten Fall zu einer Minderung der Bauteilqualität (Schädigung der Oberfläche oder minimaler Verzug), im ungünstigen Fall kommt es aufgrund der nicht abgeschlossenen Reaktion des Harzsystems zu einer vollständigen Zerstörung des Bauteils und der notwendigen Generalreinigung des Werkzeugs. Dies bedeutet einen erheblichen Kosten- und Zeitaufwand. Der optimale Entformungszeitpunkt wird letztlich in Abhängigkeit der Injektionszeit so mit der Reaktionszeit der einzusetzenden Harzsysteme abgestimmt [165], dass ein minimaler, aber dennoch ausreichender Zeitpuffer zwischen der vollständigen Füllung des Werkzeugs, der fortschreitenden Reaktion des Harzsystems und dem Ziel möglichst kurzer Zykluszeiten aber hoher Bauteilqualität verbleibt [166].

Neben der Verfolgung des tatsächlichen Aushärtgrades und damit einer Feststellung des frühest möglichen Entformungszeitpunkts ist die genaue Bestimmung des Beginns der Gelierung und der davon abhängigen Verarbeitbarkeit des Harzsystems von besonderer Bedeutung und veranschaulicht auch für diesen Prozessschritt die notwendigen Kontrollmechanismen während der Injektion. Bild 6-8 zeigt typische Viskositäts- und Aushärtungsverläufe für EP-Harzsysteme.

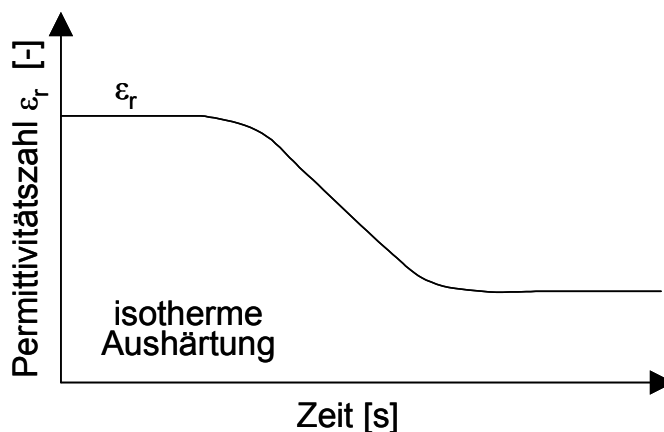


**Bild 6-8** Viskositätsverlauf typischer EP-Harzsysteme

Mit einer online Kontrolle und Darstellung dieser für den Prozess wichtigen Informationen zur Bestimmung des Verarbeitungsfensters und damit dem Injektionsende sowie dem idealen Entformungszeitpunkt kann der Gesamtprozesszyklus verkürzt und damit das Fertigungsverfahren optimiert werden.

Hier bietet das kapazitive Messverfahren weitere Möglichkeiten zur Messung. Da die Matrixsysteme während der Verarbeitung einem fortlaufenden chemischen Prozess unterliegen, bei dem sich die elektrische Leitfähigkeit und die Dielektrizitätskonstante aufgrund der beginnenden Reaktion und der nach der Gelierung folgenden Aushärtung kontinuierlich ändert [167], bietet die Analyse der vom Sensorsystem gelieferten Daten auch nach der vollständigen Injektion weitere wichtige Informationen.

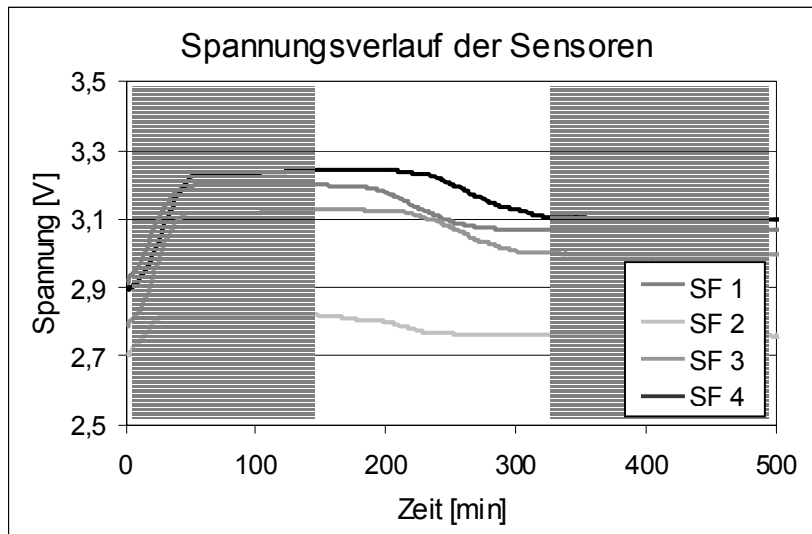
In Bild 6-9 ist qualitativ das Signal einer kapazitiven Messung zur Bestimmung des Aushärteverhaltens von EP-Harzsystemen aufgrund der Änderung der Permittivität skizziert.



**Bild 6-9** Typisches Messsignal einer kapazitiven Messung bei der Aushärtung eines EP-Harzsystems [168]

Hervorgerufen werden die Änderungen der Permittivitätszahl durch Ionenleitung sowie durch die Ausrichtung der polaren Gruppen (Dipole) der Moleküle im elektrischen Feld. Verschiedene Untersuchungen mit Polyester- und Epoxidharzen haben gezeigt, dass die Dielektrometrie zur Aushärteüberwachung eingesetzt werden kann. Leitwert und Viskosität können eindeutig miteinander korreliert werden, so dass der Entformungszeitpunkt bzw. das Aushärtungsende bestimmt werden können [169].

Mit einer Analyse der Daten zur Änderung der Permittivitätszahl ist eine Bestimmung des frühest möglichen Entformungszeitpunktes gegeben [170]. In Bild 6-10 ist der Injektions- und Härtingsverlauf eines EP-Harzsystems in einem Kohlenstoffasergelege, aufgenommen mit den Sensorflächen  $SF_1$  –  $SF_4$ , beschrieben.



**Bild 6-10** Überwachung des Aushärtungsprozesses eines Standard-EP-Harzsystems mit CF-Gelege bei 60°C

Das eingesetzte EP-Harzsystem ist ein langsames System mit einem weiten Verarbeitungsfenster. Die Verarbeitung kann über einen Zeitraum von bis zu 2 Stunden erfolgen. Anschließend beginnt die Viskosität zu steigen und die Gelierung und Aushärtung setzt ein. Im dargestellten Fall beginnt ab etwa 150 min, also nach 2,5 Stunden an den Sensoren das Messsignal kontinuierlich abzunehmen. Dieser Abfall des Messsignals aufgrund der Abnahme der freien Ionen und damit der Abnahme der Permittivitätszahl beschreibt die fortschreitende Aushärtung des EP-Harzsystems bei einer Temperatur von 60°C. Mit der Stabilisierung auf neuem Niveau ist das Ende der Aushärtung und damit der vollständige Abschluss dieses Fertigungsschrittes gekennzeichnet.

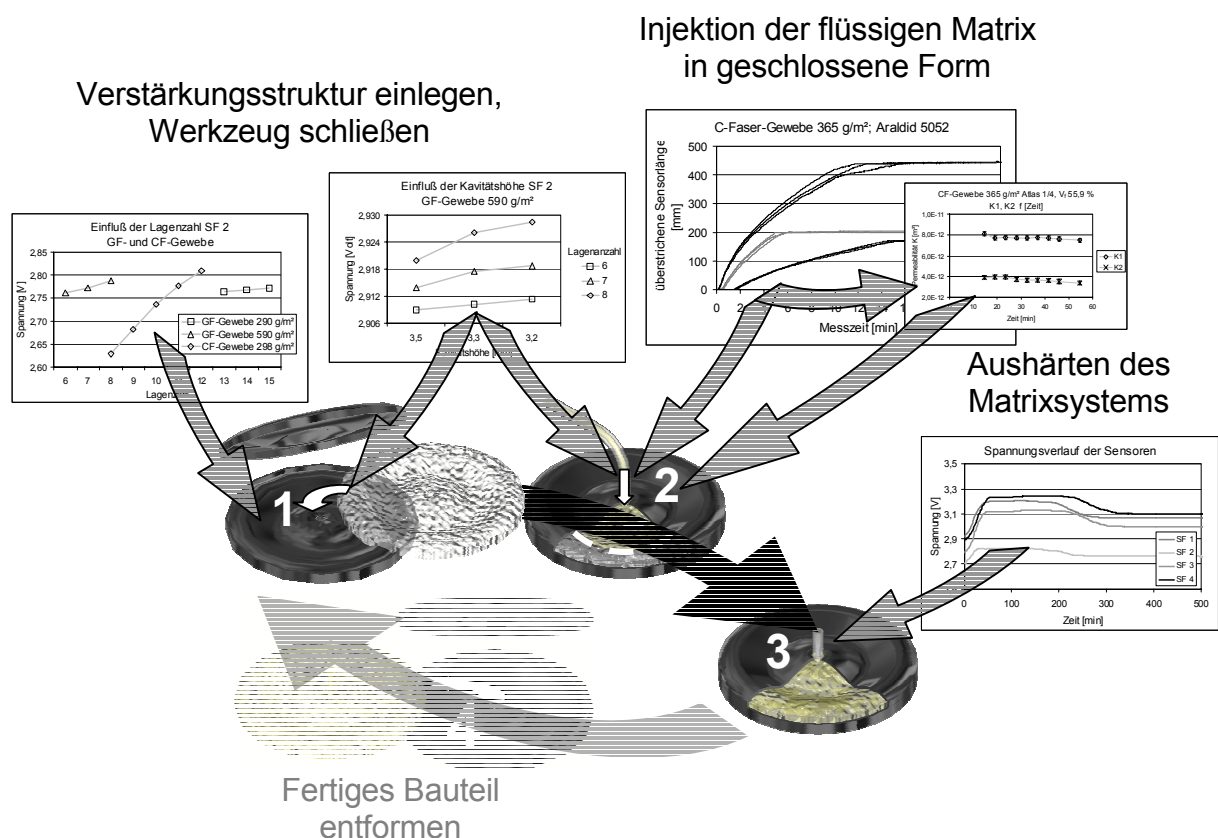


## 7 Elemente und Organisation der Harzinjektionstechnik

### 7.1 Die messtechnischen Lösungen im Überblick

Die Möglichkeit, den Fertigungsprozess der Harzinjektionstechnologie mit den beschriebenen messtechnischen Lösungen und nur einem Sensorsystem vollständig und detailliert erfassen und darstellen zu können erschließt das Potenzial zur Optimierung des gesamten Herstellungsverfahrens. Im Überblick (Bild 7-1) dokumentiert das kapazitive Messverfahren die Prozessschritte

- Belegen und Schließen des Werkzeugs – Faservolumengehalt und Kavitätshöhe
- Injektion – Fließfrontkontrolle / Permeationsmessung
- Aushärtung – Reaktionsdokumentation des Harzsystems.



**Bild 7-1** Dokumentierte Prozessschritte im Überblick

Mit dieser die entscheidenden Prozessschritte erfassenden kapazitiven Sensorik ist es – auch aufgrund des entwickelten Konzepts zur Integration der sehr robusten Sensorflächen in der Werkzeugoberfläche in praktisch jeder Geometrie – möglich, ohne Beeinflussung des Fertigungsprozesses diesen in seiner Gesamtheit (mit Ausnahme der Ent-

formung) zu dokumentieren und transparent darzustellen. Das entwickelte kapazitive Sensorsystem kann hier sehr effizient und mit einer Vielzahl von neuen Impulsen für den gesamten HIT-Prozesszyklus eingesetzt werden. Die Injektion als Kernprozess kann aber nicht isoliert betrachtet und unabhängig kontrolliert und gesteuert werden. Vielmehr müssen die zuvor schon angesprochenen vorgeschalteten Prozessschritte ebenso mit in ein gesamtheitliches Fertigungskonzept eingebunden werden wie auch nachgeschaltete Prozessschritte. Der Ansatz zur Optimierung der Harzinjektionstechnik in ihrer Gesamtheit soll an den der Injektion vorgeschalteten Prozessschritten

- Werkzeugkonzepte und Werkzeugbau (*Near-Net-Shape*) sowie
- Preformtechnologie

beschrieben werden. Aufgezeigt werden die bestehenden und notwendigen Verknüpfungen dieser einzelnen, die Fertigung mitbestimmenden Prozessschritte.

## 7.2 Werkzeugbau

Da die mit den Harzinjektionstechniken realisierbaren Maßhaltigkeiten eine *Near-Net-Shape*-Fertigung, also eine abfallfreie Herstellung der Bauteile ohne eine anschließende Nachbearbeitung, erlauben [171], kommt gerade dem Werkzeugbau eine besondere Bedeutung zu [172]. Mit der Auslegung von Angussystemen, Werkzeugdichtsystemen und Kantengeometrien, der Integration von Elementen zur Aufnahme von Inserts sowie der Oberflächenbeschaffenheit und der Temperierung der Werkzeuge kann der Injektionsprozess selbst und damit auch die Qualität des herzustellenden HI-Bauteils nachhaltig beeinflusst werden. Dabei spielen auch die beim Werkzeugbau eingesetzten Materialien eine entscheidende Rolle [173]. Über diese definieren sich beispielsweise die Steifigkeit des Werkzeugs und damit der einstellbare Faservolumengehalt, die Zuhaltkräfte, die Wärmezu- bzw. Wärmeableitung und folglich der Injektionsablauf im geschlossenen Werkzeug selbst. Mit Hilfe des Einsatzes von kapazitiven Sensorsystemen kann also auch hier eine Unterstützung des Werkzeugbaus hinsichtlich der Auslegung des Werkzeugs in der Weise erfolgen, dass ein *feedback* zu Verfügung steht und kritische Bereiche der Kavität zielgerichtet überwacht und in besonderen Fällen im Injektionsprozess aktiv gesteuert werden können.

Als Beispiel sei auf das Problem *Race-Tracking*, also das ungewollte Vorschießen der Harzfront im Kantenbereich, verwiesen. Mit bisherigen Sensorsystemen ist ein Beobachten gerade dieser geometrisch sehr komplexen Bereiche an Werkzeugkanten, Rippen oder Insertelementen nicht möglich. Besonders vor dem Hintergrund eines immer flexibler und schneller reagierenden Werkzeugbaus [174] ist eine unmittelbare und präzise Informationsgewinnung zur Optimierung der Werkzeuge von immer größerem Interesse.

Mit dem Einsatz der kapazitiven Sensorik, die den Füllvorgang gerade in den kritischen Bereichen der Kavität veranschaulichen kann, steht vor dem Hintergrund einer ganzheitlichen Betrachtung des Fertigungsprozesses ein effizientes System zur lückenlosen Dokumentation des Prozesses zu Verfügung. Werden die Erkenntnisse aus Werkzeuggeometrie und Injektionsprozess für die Fertigung der Preform umgesetzt, ist die Realisierung deren angepassten Aufbaus möglich [175].

Somit kann die Preformherstellung als Bindeglied zwischen den Fertigungsschritten Werkzeugbau und Injektion durch einen optimalen Informationsaustausch mit einer detaillierten Beschreibung der für einen optimalen Prozessablauf notwendigen Verstärkungsstrukturen wesentlich zum Gesamtprozess beitragen.

### **7.3 Verstärkungsstrukturen / Preforming**

Die Besonderheit der Harzinjektionstechnologie liegt in der Möglichkeit, aufgrund der trockenen Verstärkungsstrukturen die gesamte Bandbreite der textilen Potenziale hinsichtlich Faserorientierung und Komplexität nutzen zu können. So sind neben den klassischen 2-dimensionalen Verstärkungsstrukturen auch Materialien mit Dickenverstärkung im Bauteil, global oder lokal, möglich [176].

Zum Aufbau der teilweise sehr komplexen textilen Verstärkungsstrukturen wird die Preformtechnologie eingesetzt. Die herzustellenden Preforms oder Faservorformlinge sind komplexe Verstärkungsstrukturen, die in einem zusätzlichen Fertigungsschritt reproduzierbar vorgeformt bzw. vorgefertigt werden [177].

Ziel des Einsatzes von Preforms ist es vor allem, die Beschickungszeit der Kavität zu reduzieren [178], da die Positionierung dieser Verstärkungspakete im geöffneten Werkzeug wesentlich einfacher und effektiver zu realisieren ist als das Fixieren nicht vorbereiteter flächiger Textilizuschnitte. Neben diesem Ansatz zur Reduzierung der Zykluszeiten bietet der Einsatz von Preforms weitere wesentliche Vorteile. Tabelle 7-1 zeigt eine Übersicht über die Auswirkungen vorgefertigter Verstärkungsstrukturen auf Bauteilanforderungen und Verarbeitungsprozess (HIT).

**Tabelle 7-1** Preforming – Vorteile für die HIT

<b>Prozess</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Handling / Kavitätsfüllung</li> <li>Faserfixierung in der Form</li> <li>definierte Faservolumengehalte</li> <li>kein Race-Tracking</li> <li>net-shape Fähigkeit</li> <li>angepasste Fließwege</li> </ul>
<b>Bauteil</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>optimale Faserausnutzung (Tailored Reinforcement; Multi-Textil)</li> <li>lokale Verstärkungen</li> <li>keine mech. Nachbearbeitung</li> <li>gezielte Anpassung von Sandwichkonstruktionen im Sinne partieller Verstärkungen</li> <li>komplizierte Geometrien / Dickensprünge</li> <li>verbesserte Anbindung von Kraffteinleitungselementen</li> <li>verbessertes Schadenstoleranzverhalten</li> </ul>
<b>Wirtschaftlichkeit</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>reduzierte Werkzeugbestückungszeit / Zykluszeit</li> <li>Prozesssicherheit</li> <li>reduzierte Endkontrolle</li> </ul>

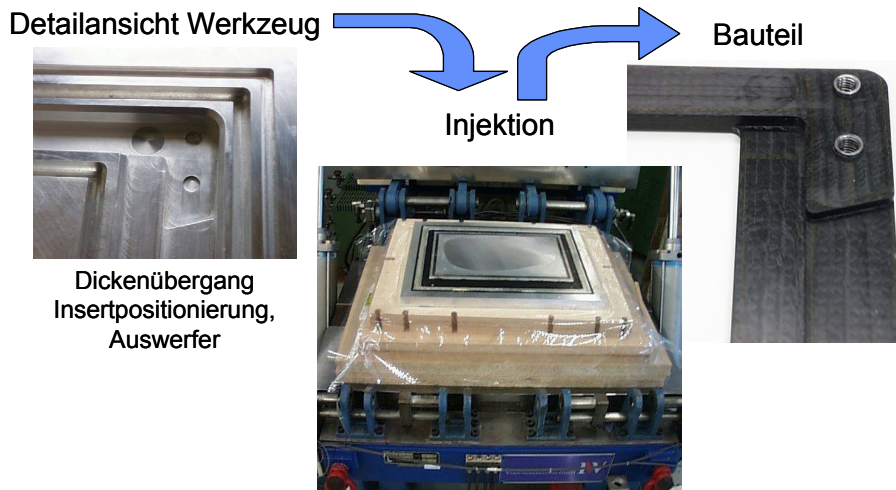
Der Wunsch nach einer *Near-Net-Shape*- (nachbearbeitungsfreien) Fertigung in der Harzinjektionstechnik bedingt das Einlegen von Verstärkungsstrukturen, die exakt auf die spätere Bauteilgeometrie und damit die Kavität im Werkzeug abgestimmt sind. Erscheinungen wie das Ausfransen der Randbeschnitte, das Verschieben der Einzellagen oder auch eingebrachter Inserts und lokaler Verstärkungen müssen unterbunden werden.

Die Anforderungen seitens der Harzinjektionstechnik an die Preformtechnologie mit dem Ziel eines an den Prozess angepassten Preformings lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Vorgefertigte Strukturen, die im geöffneten Werkzeug einfach positioniert werden können,
- reproduzierbare und ideale Ausrichtung der Faserorientierung nach Belegungsplan,
- verschiebefreie Zusammensetzung von Verstärkungsstrukturen aus unterschiedlichen Verstärkungs- und Faserarten zur optimalen Nutzung der Kosten- und Gewichtspotenziale, Applikation metallischer Inserts und lokaler Verstärkungen, Fixierung von Sandwichkernen,
- Randbesäumung zur Vermeidung des Ausfransens beim Zuschnitt der trockenen Verstärkungsstruktur zur Realisierung einer *Near-Net-Shape*-Fertigung, Vermeidung des *Race-Tracking*-Effects. Vermeidung des *'Fiber-Trapping'* im Dichtungsbereich durch ausreichend fixierte Kanten,
- gezielte Steuerung der Drapierbarkeit und Permeabilität der eingesetzten Verstärkungsaufbauten [179].

Der Einsatz der Nähetechnologie zur Konfektion von Verstärkungsmaterialien für FKV ermöglicht die Herstellung von Verstärkungskomplexen mit den oben genannten Eigenschaften und eröffnet somit neue Perspektiven für die Harzinjektionstechnik [180]. Erste Anwendungen aus der Luftfahrt erschließen nur einen sehr geringen Teil dieses Potenzials, welches auch für eine automatisierte Fertigung eingesetzt werden kann. Neue Anwendungsbereiche der Nähetechnik können insbesondere durch die ganzheitliche Betrachtung der Preform-HIT-Prozesskette erschlossen werden, indem die Prozessanforderungen in die verschiedenen Preforming-Abschnitte einfließen.

Ein Beispiel für ein Werkzeug-Preform-Injektionskonzept zur *Near-Net-Shape*-Fertigung eines Bauteils mit Inserts und Dickenprüngen ist in Bild 7-2 gezeigt.



**Bild 7-2** Werkzeug-Preform-Injektionskonzept zur *Near-Net-Shape*-Fertigung

Alle Kanten und Dickenprünge sowie die integrierten metallischen Inserts werden nachbearbeitungsfrei gefertigt. Lediglich die AngüÙe und Steiger müssen nach der Entformung noch beseitigt werden.

In einem ganzheitlich zu betrachtenden System von Werkzeugbau, Preform und HI-Fertigung ergeben sich Potenziale, die bei einer singulären Betrachtung der einzelnen Elemente der Prozesskette nicht zugänglich sind. Ist für ein *Near-Net-Shape*-Werkzeug eine Verstärkungsstruktur mit konstanter Qualität verfügbar, kann auch eine Steuerung des Harzinjektionsprozesses reproduzierbar erfolgen. Durch eine effiziente Anpassung der Preformingtechnologie an die gegebenen Bauteil- und Prozessanforderungen lassen sich qualitative und wirtschaftliche Verbesserungen für HIT-Bauteile erreichen.

Das zur Verfügung stehende kapazitive Kondensatormesssystem bietet hier die Möglichkeit eines durchgängigen QM-Systems.

Damit schließt sich der Kreis einer ganzheitlichen Betrachtung. Drei Elemente der Prozesskette,

- der Werkzeugbau,
- die Preformtechnologie und
- die Injektion

wurden vorgestellt. Es zeigt sich, dass eine Fließfrontkontrolle während der Injektion – dem Kernprozess der Harzinjektionstechnik – wichtige Informationen nicht nur für die-

sen Fertigungsschritt selbst und für die Füllbildsimulation bietet, sondern auch für die vorgeschalteten Prozessschritte des Werkzeugbaus und der Preformtechnologie von Vorteil ist. Da gerade diese beiden Prozessschritte auf die Injektion einen entscheidenden Einfluss haben, ist ein umfassender Informationsaustausch der Schlüssel zum Erfolg. Nur ein reger Datenaustausch führt dazu, den Werkzeugbau, die Preformtechnik und den Injektionsprozess aufeinander abzustimmen und anhand einer ganzheitlichen Betrachtung der Harzinjektionstechnik deren Potenziale zu nutzen.

## 8 Zusammenfassung

Mit den vielfältigen Möglichkeiten an Fertigungsvarianten und einzusetzenden Materialien hat sich die Harzinjektionstechnik zu einer festen Größe auf dem FKV-Markt und als eines der Herstellungsverfahren mit dem größten Entwicklungspotenzial etabliert.

Die nunmehr über 40-jährige Entwicklung der HIT hat einen Stand erreicht, der in praktisch allen Teilen der Industrie auf ein lebhaftes Interesse stößt. Mit der Weiterentwicklung sowohl der Fertigungstechnik insgesamt als auch der Einzelkomponenten wie den Fasern und Faserhalbzeugen oder auch der Matrixsysteme, die das spätere Bauteil definieren, eröffnet sich dem Verfahren eine immer weitere Bandbreite von Anwendungsgebieten. Dies sowohl im Hinblick erreichbarer mechanischer Eigenschaften, der Komplexität zu realisierender Strukturen, der Bauteilgrößen als auch der Produktivität und der Wirtschaftlichkeit.

Mit der Etablierung der Harzinjektionstechnologien auf dem FKV-Sektor zur Fertigung von einfachsten bis hin zu großen, sehr komplexen Strukturen, von der labortechnischen Kleinserie bis zu industriell gefertigten großen Stückzahlen, wird eine sinnvolle und effiziente Kontrolle und Dokumentation des eigentlichen Kernprozesses aller Harzinjektionsverfahren, der Injektion, in Kombination mit einer aussagekräftigen Simulation auf der Basis reproduzierbarer Versuchsdaten zur Charakterisierung und Auswahl der einzusetzenden Verstärkungsstrukturen von immer größerer Bedeutung. Aufgrund der Vielfalt der verfügbaren Verarbeitungsverfahren, Materialien und Verfahrensparameter ist es von besonderem Interesse für den Verarbeiter, ein flexibles, auf die diversen Messaufgaben abgestimmtes Sensorsystem zur Datengewinnung und Dokumentation zur Verfügung zu haben.

Das hier vorgestellte Prinzip der kapazitiven Messung zeigt neue Wege der effizienten Informationsgewinnung für eine lückenlose online Dokumentation und Steuerung des gesamten Fertigungsprozesses. Dies auch bei Einsatz elektrisch leitender Verstärkungsstrukturen wie C-Fasern.

Geeignet für eine werkzeugseitige feste Montage, bietet das entwickelte Kondensatormesssystem vor allem die Möglichkeit, in geschlossenen Werkzeugen mit zuvor nicht realisierbaren Freiheitsgraden zur geometrischen Gestaltung der Sensorflächen den



Füllprozess kontinuierlich und in Echtzeit zu beschreiben. Damit wird das Sensorsystem dem erkennbar immer stärker werdenden Interesse an einer vollständigen Dokumentation des Verarbeitungsprozesses gerecht.

Mit dem Einsatz des Messaufbaus zur effizienten Bestimmung der Permeabilität der ständig wachsenden Zahl an Verstärkungsstrukturen und -kombinationen wird der Simulation ein wichtiges Werkzeug zur schnellen und präzisen Generierung von Eingabedaten zur Verfügung gestellt. Damit ist eine aussagekräftige Beschreibung der Füllvorgänge möglich, um so schon im Vorfeld der Projektierung mit der Definition des Materials, der Werkzeug- und Preformgeometrie, der Festlegung der Injektionspunkte und Angussysteme bis hin zur Vorhersage von Zykluszeiten und damit der Effizienz der Verarbeitungstechnik fundierte Entscheidungshilfen geben zu können.

Neben der kontinuierlichen online Fließkontrolle bietet das System weitere Einsatzmöglichkeiten, so eine Dokumentation bzw. Kontrolle von Faservolumengehalt und Status des Werkzeugschließvorgangs. Darüber hinaus eignet sich das Messsystem zur Beschreibung des Aushärteverhaltens der Matrixsysteme nach abgeschlossener Injektion.

Das kapazitive Messsystem stellt exakt an den Punkten des Verarbeitungsprozesses Informationen zur Verfügung, an denen ein hohes Optimierungspotenzial zur Verbesserung der Qualität, der Prozesskontrolle und zur Verkürzung der Prozesszeiten gegeben ist. Auf dem Weg zur industriellen Serienfertigung steht der HIT damit ein wichtiges Instrument zur Verfügung, da gerade mit der Großserie die Notwendigkeit einer automatisierten Prozesskontrolle und -steuerung wächst.

Die beschriebenen wirtschaftlichen und technologischen Vorteile der HIT sind aber letztlich nur durch eine ganzheitliche Betrachtung und Organisation des Qualitäts- und Fertigungsmanagements und dessen Umsetzung im gesamten Fertigungsprozess mit dem Ergebnis eines kosteneffizienten Einsatzes der HIT-Verfahren zu realisieren. Schlüssel zum Erfolg ist dabei immer eine Betrachtung des Fertigungsprozesses als Ganzes - von der ersten Idee bis zum fertigen Bauteil. Werden die sich gegenseitig beeinflussenden und ineinander verflochtenen Einzelschritte mit den hier vorgestellten Möglichkeiten zur Daten- und Informationsgewinnung koordiniert und abgestimmt aufeinander zum Einsatz gebracht, können die immensen Potenziale der Harzinjektionstechnik genutzt und dem Anwender exzellente FKV-Bauteile zur Verfügung gestellt werden.

## 9 Literaturverzeichnis

- [1] Aström B. T.: Manufacturing of Polymer Composites, Chapman&Hall Verlag, London (1997)
- [2] Neitzel M.; Breuer U.: Die Verarbeitungstechnik der Faser-Kunststoff-Verbunde, München, Wien: Hanser Verlag (1989)
- [3] Michaeli W.; Wegener M.: Einführung in die Technologie der Faserverbundwerkstoffe, München, Wien: Hanser Verlag (1989)
- [4] Kötte R.: Der Resin-Transfer-Molding-Prozeß: Analyse eines Harzinjektionsverfahrens, Köln: Verlag TÜV Rheinland (1991)
- [5] Barbero E. J.: 'Introduction to Composite Materials Design', Department of Mechanical & Aerospace Engineering, West Virginia University, USA (1998)
- [6] Rudd C. D., et. al.: Liquid Moulding Technologies, Woodhead Publishing Limited, Cambridge (1997)
- [7] Herrocks A. R.; Anand S. C.: Handbook of Technical Textiles; The Textile Institute, Woodhead Publishing Limited, Cambridge (2000)
- [8] Ehrenstein G. W.: Faserverbund-Kunststoffe: Werkstoffe, Verarbeitung, Eigenschaften. München, Wien: Hanser Verlag (1992)
- [9] N.N.: High-Performance Composites: An Overview. Pressure to reduce cost lead to new manufacturing techniques. High Performance Composites (2000) Sourcebook, S. 8-23
- [10] Bill B.: RTM comes of age. SAMPE Journal Vol. 34 (1998) 6, S. 5
- [11] N.N.: The overall trend is towards recovery – perhaps even growth. Composites International, N° 42 (2000) 6, S. 11-13
- [12] Horton A.; Bader S.: Why change from hand lay?. Reinforced Plastics Vol. 42 (1998) 2, S. 22-24
- [13] Drogdt B.: Closed moulding: a cheap solution to styrene emission, Reinforced Plastics 38 (1994) 3, S. 38-46
- [14] Beckwith S. W.: RTM, VARTM, and SCRIMP processing infusion technologies. Proceedings 'SAMPE 44th ISSE / SAMPE '99', Long Beach USA (1999)
- [15] Harper A.: RTM begins to realise its potential. Reinforced Plastics Vol. 40 (1996) 9, S. 50-53
- [16] Shafi V.: Beitrag zur Charakterisierung der Permeabilität flächiger Verstärkungsmaterialien. Dissertation Universität Kaiserslautern (1996)
- [17] Potter K.: Resin Transfer Moulding. Chapman&Hall Verlag, London (1997)
- [18] Bischoff T.: Verwirkte Textilien zur Bewehrung von zementgebundenen Matrices. Dissertation Rheinisch-Westfälische-Technische Hochschule Aachen (2001)
- [19] Black S.: Carbon bridge takes on an Army. High-Performance Composites Vol. 8 (2000) 5, S. 56-58

- [20] Busel J. P.: Engineering Standards for Composites in Civil Infrastructure. Composites Fabrication Vol. 17 (2001) 3, S. 24-27
- [21] [www.hardcore.com](http://www.hardcore.com)
- [22] N.N.: Scrimping saves money and time. Composites Technology (1999) 09/10, S. 21-28
- [23] Hartmann A.: Lebenszykluskostenrechnung als strategisches oder operatives Bewertungs- und Planungsinstrument für die Technologie der Faser-Kunststoff-Verbunde. Dissertation Universität Kaiserslautern (2000)
- [24] Musial W.: Wind Composite Industry on the Brink of Boom. High-Performance Composites Vol. 9 (2001) 1
- [25] Jacob A.: Wind energy - the fuel of the future?. Reinforced Plastics Vol. 44 (2000) 2, S. 20-24.
- [26] Schulz M. H.: Smart am Wind. DM (2001) 6, S. 78-80
- [27] Hranac K. C.: Renewable Energy: Is the Answer Blowing in the Wind? High-Performance Composites Vol. 8 (2000) 5, S. 33-37
- [28] [www.nordex.dk](http://www.nordex.dk)
- [29] N.N.: Wind Energy – Clean Power for Generations. European Wind Energy Association (EWEA), 26 Spring Street, London, W2 IJA UK
- [30] Sandia National Laboratories: Blade Manufacturing Improvements Development of the ERS-100 Blade. SAND2001-1381 (2001)
- [31] Jacob A.: LM Glasfiber: building on blade technology. Reinforced Plastics Vol. 44 (2000) 2, S. 26-30
- [32] N.N.: Germanischer Lloyd approves their largest blade so far. LM News Letter (2001) 7, S. 3
- [33] N.N.: Strom für 2000 Haushalte. Die Rheinpfalz, 31. Oktober 2000
- [34] Kalke S.: Der Wettbewerb der Werkstoffe im Automobilbau. Werkstoffe im Automobilbau. Kunststoffe (1998 /1999), Sonderausgabe von ATZ UND MTZ, S. 6-11
- [35] Trapp W. G.: Neues Werkzeug für große GFK-Teile aus einem Guss. VDI Nachrichten (1998), 15, S.15
- [36] N.N.: Iveco truck features RTM roof. Reinforced Plastics (1998) 2, S. 15
- [37] [www.tecnofibras.com.br](http://www.tecnofibras.com.br)
- [38] AVK-TV Pressegespräch am 31. August 2000 im Hotel Intercontinental, Frankfurt: Gewinner des AVK-TV-Innovationspreises 2000 'Anwendung des Jahres' an die Firma Fritzmeier Composite GmbH & Co.
- [39] Firmenprospekt der Firma Fritzmeier Composite: Kompetenz in Kunststoff: Composites made by Fritzmeier. Fritzmeier Composite GmbH & Co., Heimatweg 84, D-83052 Bruckmühl-Hinrichsseggen (2000)

- [40] N.N.: Dachmodul für das Lkw-Fahrerhaus TG-A XXL im Rahmen der Verleihung des AVK-TV-Innovationspreises, AVK-TV-Tagung Kongresshaus Baden-Baden (2000), 12.-13. September
- [41] Wiedemann J.: Leichtbau. Band 1: Elemente. Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo: Springer (1986), S. 63-71
- [42] Lee R.; Bartha E.: Tragende Strukturteile aus Faserverbundkunststoffen im Omnibusbau. Kunststoffe (1997/1998), S. 42-46
- [43] N.N.: New bus loaded with composite components. Composites Technology (2001) 1, S. 21
- [44] [www.chrysler.com](http://www.chrysler.com)
- [45] N.N.: GM pickups sport one-piece composite fenders. Composites Technology (1999), 1-2, S. 40-42
- [46] Weaver A.: Fiesta's RTM spoiler breaks new ground. Reinforced Plastics Vol. 40 (1996) 3, S. 20-24
- [47] de Kalbermatten T.: Innovative RTM-Hohlkörpertechnologie für integrierte Heckspoiler: Erfahrungen und Aussichten für die Zukunft, in: Fröhlich B.: Arbeitskreis Karosserie-Rohbau - Die Kunststoffkarosserie (1996), Schriftenreihe Praxis Forum, S. 71-78
- [48] Roth S.; Sigolotto C.; Keller K.; Kümmerlein P.: Fahrerhausstrukturen in CFK-Technologie, Chance oder Utopie? Kunststoffe im Automobilbau, VDI-K Jahrestagung (1995), Mannheim, S. 147-171
- [49] N.N.: BMW commits to developing carbon fiber parts for production cars. Composites Technology Vol. 7 (2001) 1, S. 9
- [50] Firmenprospekt TPI: TPI Composites Engineering Innovation Production. TPI Composites, Inc., PO Box 328, Market Street, Warren, Rhode Island 02885, USA
- [51] Banhardt V.: FVK - Anwendungen in der Bahntechnik. IVW-Kolloquium (2000)
- [52] Pachalis J.: SCRIMP Technology Overview. The Second Workshop on Liquid Composite Molding, Columbus, Ohio (1996), June 13
- [53] Verheus A.: Vacuum injection better for yacht hulls. Reinforced Plastics (1998) 2, S. 15
- [54] Lewit S.: Change Mainstream Boat Fabrication. Composites Fabrication Vol. 17 (2001) 3, S. 28-29
- [55] Lazarus P.: Competing Composites – Infusion? Pre-pregs? Or both? And what system? The U.S. Navy takes a long, hard look at emerging fabrication technologies. Professional BoatBuilder (1997) 4
- [56] Mosher P. C.: Cost Effective SCRIMP Applications in the Marine Market. Composites Institute's 51st Annual Conference and Expo, Cincinnati, Ohio (1996), Feb 5-7, Session 12-D
- [57] Gougeon M.: Next Generation Composite Boatbuilding. Professional BoatBuilder N° 68 (2001) Dec/Jan, S. 26-31

- [58] Benjamin B.: Deepwater Oil Exploration & Development: A New Opportunity for Composites. *Composites Fabrication* Vol. 17 (2001) 4, S. 14-19
- [59] Hayse S. R.: RTM aerospace components developed using rapid prototype tooling. 43rd International SAMPE Symposium' (1998), May 31-June 4, S. 1715-1723
- [60] deCillis J. R.; Caputo C. D.: Affordable Approaches to the Production of Complex Aerospace Composite Components via Resin Transfer Molding. 43rd International SAMPE Symposium' (1998), May 31-June 4, S. 1710-1714
- [61] Garg A.: Development of RTM for Landing Gear Doors at ASTA Components. 43<sup>rd</sup> International SAMPE Symposium (1998), S. 1352-1361
- [62] Kruckenberg T.M.; Paton R.: *Resin Transfer Moulding for Aerospace Structures*. Kluwer Academic Publishers (1998)
- [63] [www.EADS.net](http://www.EADS.net)
- [64] Bieling U.: Serieneinsatz von Faserverbundwerkstoffen im Flugzeugbau - dargestellt am Seitenleitwerk des Airbus. *Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde Teil1 Konstruktion VDI*. VDI Verlag (1992), S. 77-88
- [65] Firmenprospekt ATP: Resin Transfer Molding. ATP Advanced Technical Products, Inc., Intellitec, 2000 Brunswick Lane, DeLand, FL 32724 (1999)
- [66] N.N.: Lockheed Martin Aeronautics Company Demonstrates RTM-Technologie in Vertical Tail Project. *Composites Week* 50 (2000)
- [67] N.N.: Lockheed Martin Demonstrates Resin Transfer Molding Technology In Advanced Fighter Vertical Tail Project, Fort Worth, Texas, USA (2000), 14. Dezember
- [68] Sutton G.: Affordable RTM Aerospace Components. *SAMPE Journal*, Vol. 35 (1999) 3, S. 58-63
- [69] Criss J. M.; Arendt C. P.; Connell J. W.; Smith J. G.; Hergenrother P. M.: Resin Transfer Molding and Resin Infusion Fabrication of High-Temperature Composites. *SAMPE Journal*, Vol. 36 (2000) 3, S. 32-41
- [70] McConnell V.: Fast Paced Process Evolution: Advanced RTM Produces Complex, Repeatable, Flight-Critical Parts. *SAMPE Journal*, Vol. 34 (1998) 6, S. 37-43
- [71] Quibble M. D.: Cost Modeling Advanced Resin Transfer Molding at Dow-UT. 43<sup>rd</sup> International SAMPE Symposium (1998), S. 1702-1709
- [72] Firmenprospekt Arrow: Villiger Söhne AG, Bikes, Parts & Accessoires, CH - 6018 Buttisholz, Schweiz (2000)
- [73] [www.arrow.de](http://www.arrow.de)
- [74] Wirth D.: Das beste aus der Welt in einem Bike vereint: Arrow. Villiger Söhne AG, Schweiz, News (1997)
- [75] N.N.: Mountain and winter sports applications are a natural for composite materials. *Composites International*, N° 42 (2000) 6, S. 32-45

- [76] Powlison D.: Save weight with a Carbon-Fiber Pole. *Sailing World* Vol. 28 (2001) 5, S 42-45
- [77] Spoerre J.; Zhang C.; Wang B.; Parnas R.: Integrated Product and Process Design for Resin Transfer Molded Parts. *Journal of Composite Materials*, Vol. 32 (1998) 13, S. 1244-1272
- [78] Mayer C.; Kissinger C.; Neitzel M.: Potentiale faserverstärkter Duromere und Thermoplaste für Karosseriekomponenten. *Praxisforum Bad Nauheim* (1997), 3.-4. Nov.
- [79] Leonard-Williams S.: Keeping it in - the future for closed mould processes. *Reinforced Plastics* Vol. 44 (2000) 2, S. 32-34
- [80] Forsdyke K. L.: Are we letting things slip? *Reinforced Plastics* (1995) 12, S. 64
- [81] Eversheim W.; Mutz M.; Walker R.: FVK-Bauteilkosten systematisch bestimmen. *Ingenieur Werkstoffe*, 9 (2000) 4
- [82] Juska T.; Dexter H. B.; Seemann III W. H.: Pushing the limits of VARTM. 43<sup>rd</sup> International SAMPE Symposium (1998), S. 33-43
- [83] Yeagley H.: What's Your Bag? *Composites Fabrication* Vol. 17 (2001) 4, S. 28-32
- [84] Hammami A.; Gebart B.R.: Analysis of the vacuum infusion process. *Polymer Composites* Vol. 21 (2000) 1, S. 28-40
- [85] Beckwith S. W.: Resin Transfer Moulding (RTM) and Fibre Placement Technologies in Today's Composite Markets. 20<sup>th</sup> SAMPE Europe Jubilee International Conference (1999)
- [86] Mitschang P.; Weimer C.: Komplexe multi-textile Preforms (Potenziale der Nähetechnik). *Kunststoffe* (2000) 4
- [87] Dyckhoff J.: Resin Transfer Molding: Beitrag zur Verbesserung der Formteiloberflächenqualität. *Aachener Beiträge zur Kunststoffverarbeitung*, Band 40, Dissertation an der RWTH Aachen, Aachen: Verlag der Augustinus Buchhandlung (1995)
- [88] Francomb J.; Parmar M.: Reduced Cost, higher performance RTM. *Reinforced Plastics* Vol. 44 (1997) 10, S. 48-54
- [89] Ferret B.; Anduze M.; Nardari C.: Metal inserts in structural composite materials manufactured by RTM. *Composites Part A* 29 A (1998), S. 693-700
- [90] Karbhari V. M.: Introduction to liquid composite molding. The 10th Annual CCM Composites Workshop (1991), Center for Composite Materials, Newark, DE, USA
- [91] Firmenprospekt Scrimp Systems, L.L.C.: SCRIMP is an innovative and technologically advanced method for producing top-quality composite parts. Scrimp Systems, L.L.C., 54F Richmond Town House Road, Wyoming, Rhode Island 02898, USA (1998)
- [92] Marsh G.: Putting SCRIMP in context. *Reinforced Plastics* (1997) 1, S. 22-26

- [93] Heider D.; Gillespie J. W. Jr.: Compaction Development during Vacuum-Assisted Resin Transfer Molding (VARTM). SAMPE EUROPE Conference JEC (2001), S. 101-109
- [94] N.N.: SCRIMP stars at SPI, Reinforced Plastics Vol. 40 (1996) 4, S. 62-68
- [95] Smoluk G. R.: New Appeal in Resin Transfer. Modern Plastics International Vol. 16 (1986) 7, S. 51-53
- [96] Ware M.: Thermal Expansion Resin Transfer Molding (TERTM) - A manufacturing process for sandwich core structures. 40th Annual Conference, Reinforced Plastics/Composites Institute, The Society of the Plastics Industrie, Inc. (1985), Jan. 28 - Feb. 1, , Session 18-A
- [97] Ware M.: Thermal Expansion Resin Transfer Molding (TERTM) / An Advanced Composite Mass Production Process. Composites in Manufacturing Vol. 5 (1986), Session 107, S. 1-6
- [98] Dyckhoff J.; Jehrke M.; Jürss D.; Rau S.: Endlosfaserverstärkte Kunststoffe - Fertigungsverfahren für die Mittel- und Großserie. 17. IKV-Kolloquium, Aachen: Institut für Kunststoffverarbeitung (1994), S. 266-269
- [99] Michaeli W.: Starke Krümmung: Herstellen von Hohlkörpern aus textilen Halbzeugen im Formwerkzeug mit Hilfe von Druckluft. Maschinenmarkt Vol. 100 (1994) 23, S. 32-35
- [100] Lehmann U.: Prozessoptimierung des Schlauchblas-RTM-Verfahrens. 19. IKV-Kolloquium Aachen (1998), Block 12, S. 4-7
- [101] Firmenprospekt CoreTech Systems, Inc.: Metal Core Technology. P.O. Box 863, East Greenwich, RI 02818, USA (2001)
- [102] Beckwith S. W.; Hyland C. R.: Resin transfer molding: A decade of technology advance. SAMPE Journal Vol. 34 (1998), 6, S. 7-19
- [103] N.N.: Automating the Resin Transfer Molding process can improve productivity and quality. PosiNews Vol. 9 (1996) 2, S. 4-5
- [104] Padmanabhan S.; Pitchumani R.: Effects of parameter uncertainties on nonisothermal mold filling during RTM. 43rd International SAMPE Symposium (1998) May 31-June 4, S. 1275-1288
- [105] Liu B.; Bickerton S.; Advani S. G.: Modelling and simulation of resin transfer moulding (RTM) - gate control, venting and dry spot prediction. Composites Part A 27 A (1996) 2, S. 135-141
- [106] Abraham D.; McIlhagger R.: Investigations into various methods of liquid injection to achieve mouldings with minimum void contents and full wet out. Composites Part A 29 A (1998) 5-6, S. 533-539
- [107] Bickerton S.; Stadtfeld H. C.; Steiner K. V.; Advani S. G.: Active control of Resin injection for the Resin Transfer Molding Process. 13th Technical Conference on Composite Materials ASC, Baltimore Maryland (1998), S. 232-245

- [108] Stadtfeld H. C.; Kissinger C.; Mitschang P.: Novel Approaches to Permeability Measurement Techniques for Liquid Composite Molding Processes. 11. Techtex-til-Symposium, Frankfurt (2001), 23.-26. Apr.
- [109] Novo C.; Correia N.; Nicolau Costa A.; Vieira A.; Torres Marques A. et al: Flow Front Monitoring in RTM Process using Fibre Bragg Grating Sensors. SAMPE EUROPE Conference JEC (2001), S. 149-158
- [110] Stadtfeld H. C.; Sozer E. M.; Steiner K. V.; Advani S. G.: Approach towards an automated design environment for the Resin Transfer Molding Process. 45th International SAMPE 2000 Symposium and Exhibition, Long Beach California (2000), S. 1576-1584
- [111] Ness D.: SPRINT a Novel Composite Processing Technology. SAMPE EUROPE Conference JEC (2001), S. 89-96
- [112] Lee W. C.; Rice B. P.; Buczek M.; Mason D.: Resin transfer process monitoring and control. SAMPE Journal Vol. 34 (1998) 6, S. 48-55
- [113] Shepard D. D.: Resin Flow Monitoring Saves Money and Improves Quality. SAMPE Journal Vol. 34 (1998) 6
- [114] Cogswell F. N.: An obsession with lingerie Reflections on the Fourth International Conference "Flow Processes in Composite Materials", Aberystwyth, 9-11 September 1996. Composites Part A 29A (1998), VI, S. 1-3
- [115] Produktinformation Kistler: Drucksensor KISTLER 6169A
- [116] Produktinformation RS Components: Temperatursensor M6
- [117] Produktinformation Holometrix Micromet: ICAM-1500 Cure Analyzer. Holometrix Micromet, 25 Wiggins Ave., Bedford, MA 01730, USA
- [118] Produktinformation micromet instruments, inc.: Eumetric 100A Dielectrometer cure monitoring System. micromet instruments, inc., 7 Wells Ave., Newton Centre, MA 02159, USA
- [119] Stöger M.: Dielektrische Vernetzungsüberwachung zur Kontrolle und Optimierung duromerverarbeitender Prozesse. Aachener Beiträge zur Kunststoffverarbeitung, Band 14, 1. Auflage; Verlag der Augustinus Buchhandlung, Achen (1993)
- [120] Gachagan A. et al: Generation and reception of ultrasonic guided waves in composite plates using conformable piezoelectric transmitters and optical-fiber detectors. IEEE Vol. 46 (1999) 1, S. 72-80
- [121] Ehlers C.: Beitrag zur Qualitätssicherung bei der Verarbeitung kontinuierlich faserverstärkter Thermoplaste. Dissertation Universität Kaiserslautern (1997)
- [122] Chen J.-Y.; Hoa S.V.; Jen C.-K.: In-Situ Monitoring of Graphite / Epoxy Cure Using Optical Fiber and Ultrasonic Sensors. '12th Annual Technical Conference American Society for Composites', Dearborn, Michigan, USA / 6.-8. October (1997)
- [123] DIN 53 483 (07.69): Prüfung von Isolierstoffen, Bestimmung der dielektrischen Eigenschaften



- [124] Produktinformation Holometrix Micromet: SMARTweave Resin Flow Front Analysis System. Holometrix Micromet, 25 Wiggins Ave., Bedford, MA 01730, USA
- [125] Stöven T.; Neitzel M.; Mitschang P.; Wang X.: Monitoring of the Resin Transfer Molding Process by Piezoelectric Elements. Internationa Conference on "On-Line Sensing and Control for Liquid Molding of Composite Structures", Annapolis, Maryland (1999)
- [126] Kissinger C.; Mitschang P.; Neitzel M.: Continuous On-Line Permeability Measurement of textile structures. SAMPE 2000 Long Beach, USA (2000) May 21-25
- [127] Daniel P.; Kissinger C.; Roeder G.: Einrichtung zur Messung der Fließfront in Verstärkungsstrukturen. DE10004146 A, 13.07.2000
- [128] Firmengespräch Fa. Assmus, Dietzenbach. Herstellerangaben Eloxalschicht (1999)
- [129] Mayer C.: Prozessanalyse und Modellbildung bei der Herstellung gewebeverstärkter, thermoplastischer Halbzeuge. Dissertation Universität Kaiserslautern (2000)
- [130] N.N.: On-line polymer permeability database. Reinforced plastics (2000) 2, S. 18
- [131] Velten K.: Quantitative Analysis of the Resin Transfer Molding Process. Journal of Composite Materials, Vol. 32 (1998) 20, S. 1865-1892
- [132] D'Arcy H.: Les Fontaines Publiques de la ville de Dijon; Exposition et Application des principes à suivre des formules à employer dans les questions de distribution d'eau, Dalmont Victor (Hg.), Paris (1856) S. 559-614
- [133] Hirt D. E.; Adams K. L.; Prud'Homme R. K.; Rebenfeld L.: In-plane radial fluid flow characterization of fibrous materials. Journal of Thermal Insulation Vol. 10 (1991) 1, S. 153 - 172
- [134] Rudd C. D.; Rice E. V.; Bulmer L. J.; Long A. C.: Process Modelling and design for Resin Transfer Molding. Plastics, Rubber and Composites – Processing and Application Vol. 20 (1993) 2, S. 67-76
- [135] Adams K. L.; Rebenfeld L.: Permeability characteristics of multilayer fiber reinforcements. Part I: Experimental Observations. Polymer Composites Vol. 12 (1991) 3, S. 179-185
- [136] Adams K. L.; Miller B.; Rebenfeld L.: Forced in-plane flow of an epoxy resin in fibrous networks. Polymer Engineering and Science Vol. 26 (1986) 20, S. 1434-1441
- [137] Wang T. J.; Perry M. J.; Lee L. J.: Analysis of permeability and void formation in RTM. 50<sup>th</sup> Annual Conference, Composites Institute, Annual technical Conference, Society of Plastic Engineers (ANTEC '92) Vol. 1.2 (1992), S. 756-761
- [138] Lundström T. S.; Stenberg R.; Bergström R.; Partanen H.; Birkeland P. A.: In-plane permeability measurements: a nordic round-robin study. Composites: Part A 31 (2000), S. 29-43
- [139] Kang M. K.; Jung J. J.; Lee W. I.: Analysis of resin transfer Moulding process with controlled multiple gates resin injection. Composites: Part A 31 (2000), S 407-422

- [140] Bickerton S.; Sozer E. M.; Graham P. J.; Advani S. G.: Fabric structure and mold curvature effects on preform permeability and mold filling in the RTM process. Part 1. Experiments. *Composites: Part A* 31 (2000), S 423-438
- [141] Bickerton S.; Sozer E. M.; Simáček P.; Advani S. G.: Fabric structure and mold curvature effects on preform permeability and mold filling in the RTM process. Part II. Predictions and comparisons with experiments. *Composites: Part A* 31 (2000), S 439-458
- [142] Kissinger C.; Mitschang P.: Continuous On-Line Permeability Measurement of the RTM-Process. *Tagungsband SAMPE (2000) Long Beach, USA*
- [143] Kissinger C.; Mitschang P.; Neitzel M.: Continuous on-line resin flow measurement in RTM-processing. 1<sup>st</sup> Stade Composite Colloquium (2000) September 7<sup>th</sup> and 8<sup>th</sup>
- [144] Hilbert A.: *Mathematik*. Leipzig: Fachbuchverlag (1987)
- [145] Finck von Finckenstein K.: *Grundkurs Mathematik für Ingenieure*. Stuttgart: Teubner (1991)
- [146] Merziger G.: *Repetitorium der höheren Mathematik*. 3. Auflage. Springer: Binomi Verlag (1993)
- [147] Advani S.G; Sozer E. M.; Bickerton S.; Stadtfeld H.; Steiner K.V.: Use of Sensors and Simulations to Move Towards Automation of the Resin Transfer Molding Process. 12th International Conference on Composite Materials (ICCM), Paris France (1999)
- [148] Kissinger C.; Mitschang P.; Neitzel M.: 3-Dimensional Fluid Propagation in RTM-Processing. *International Meeting on Composite Materials. Advancing with Composites 2000, Mailand (2000) May 9-11, S. 93-98*
- [149] Slade J.; Sozer E. M.; Advani S. G.: Fluid Impregnation of Deformed Preforms. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* Vol. 19 (2000) 7, S. 552-568
- [150] Weyrauch D.: Herstellung dreidimensional vorgeformter Faserstrukturen auf der Basis von Textilglasmatten für den Einsatz in Harzinjektionsverfahren, *Aachener Beiträge zur Kunststoffverarbeitung, Band 12, Dissertation an der RWTH Aachen, Aachen: Verlag der Augustinus Buchhandlung (1993)*
- [151] Wulfhorst B.; Büsgen A.; Weber M.: Dreidimensionale Textilien rationalisieren die Herstellung von Faserverbundwerkstoffen. *Kunststoffe* Vol. 81 (1991) 11, S. 1027-1031
- [152] Ko F. K.; van Vuure A. W.; Balonis R. J.: Textile Preforming for Complex Shape Structural Composites. *SAMPE Journal* Vol. 35 (1999) 3, S. 41-48
- [153] Gembinski J.C.: The role of preforms in higher volume composites. *Structural Composites - Design and Processing Technologies* (1990) 10, S. 377-391
- [154] Wang J.; Page J. R.; Paton R.: Experimental Investigation of the Draping Properties of Reinforcement Fabrics. *Composites Science and Technology* Vol. 58 (1998), S. 229-237

- [155] Robertson R. E.; Chu T.-J.; Gerard R. J.; Kim J.-H.; Park M.; Kim H.-G.; Peterson R. C.: Three-dimensional fiber reinforcement shapes obtainable from flat, bidirectional fabrics without wrinkling or cutting. Part 1. A single four-sided pyramid. *Composites: Part A* 31 (2000), S. 703-715
- [156] Smith P.; Rudd C. D.; Long A. C.: The effect of Shear Deformation on the Processing and Mechanical Properties of Aligned Reinforcements. *Composite Science and Technology* Vol. 57 (1997) 3, S. 327-344
- [157] Hörsting K.; Wulfhorst B.: Drapeability of Textile Reinforcement Fabrics For Composites. 25<sup>th</sup> International SAMPE Technical Conference (1993), S. 876-886
- [158] Firmenprospekt CS-Interglas: Gewebe für die Kunststoffverstärkung, CS-Interglas AG, Benzstr. 14, D-89155 Erbach
- [159] Firmenprospekt Saertex: Non Crimp Fabrics - Erfolg durch individuelle Lösungen. SAERTEX Wagener GmbH & Co. KG, Brochterbecker Damm 52, D-48369 Saerbeck
- [160] Kissinger C.; Mitschang P.; Neitzel M.: Advanced Materials for RTM-Processing - Characterization and Application of Non Crimp Fabrics (NCF). 'EUROMAT 1999', Winkler P.J.(Ed.), Wiley-VCH Verlag, Weinheim (1999), S. 176-182
- [161] Kwang H. K.; Kim Y. R.; Lee J. W.; Jung M. J.; Rew Y.: 49th Annual Conference, Reinforced Plastics/Composites Institute, The Society of the Plastics Industry, Inc., (1994), Session 4-F, Feb. 7-9
- [162] Taylor A.: RTM Material Developments for Improved Processability and Performance. *SAMPE Journal* Vol. 36 (2000) 4, S. 17-24
- [163] Schönthaler W.: Duroplaste – Zukunft von Anfang an. Technische Vereinigung, Würzburg (1993)
- [164] Parker J.; Maples C.: Epoxy Resin and the SCRIMP Resin Infusion Process at Room Temperature. 43<sup>rd</sup> International SAMPE Symposium (1998), S. 1345-1351
- [165] Chang-Lun L.; Jia-Chong H.; Kung-Hwa W.: Resin Transfer Molding (RTM) Process of a High Performance Epoxy Resin. I: Kinetic Studies of Cure Reaction. *Polymer Engineering and Science*. Vol. 40 (2000) 4, S. 929-934
- [166] Produktinformation micromet instruments, inc.: Powerful Insights into Advanced Composites Processing. micromet instruments, inc., 7 Wells Ave., Newton Centre, MA 02159, USA
- [167] Senturia S.: Dielectric Analysis of Thermoset Cure. *Advances in Polymer Science*, 1995
- [168] Day D. R.: Dielectric Properties of Polymeric Materials, Handbuch The EUMETRIC System III Microdielectrometer..., Micromet Instruments, Inc. (1991) Cambridge, USA
- [169] Loos A. C.; Kranbuehl D. E.: Intelligent Processing of Advanced Composite Materials, *Intelligent Processing of Materials*, Symp. ASME (1990), S. 15-37

- [170] Shepard D. D.; Craven K. J.: Applications of Dielectric Analysis for Cure Monitoring and Control in the Polyester SMC/BMC Molding Industry; 49<sup>th</sup> Annual Conference, Composites Institute, The Society of Plastics Industry (1994), S. 1-5
- [171] Weimer C.; Kissinger C.; Mitschang P.: Near-Net-Shape-Herstellung von faserverstärkten Kunststoffen. Ingenieur-Werkstoffe Vol. 9 (2000) 4, S. 36-39
- [172] Stoeckert K. et al.: Mold-Making Handbook (2<sup>nd</sup> Edition) (2000)
- [173] Forsdyke K.: First class tooling essential to viable RTM. Reinforced Plastics (2000) 2, S. 36-37
- [174] Hayse S.: RTM Aerospace Components developed using Rapid Prototype Tooling. 43<sup>rd</sup> International SAMPE Symposium (1998), S. 1715-1723
- [175] Panteleleis N. G.; Megisidis P.; Kanarachos A.: Computer Simulations for the Optimization of Resin Flow and Tool Design towards Low Cost RTM. SAMPE EUROPE Conference JEC (2001), S. 159-169
- [176] N.N.: Prefabricated Preforms to the rescue. Composites Technology (1999) 1, S. 20-28
- [177] Dingeldein M.: Braid – The Solution to Preform Problems. SAMPE Journal Vol. 34 (1989) 6, S. 21-26
- [178] Drechsler K.; Brandt J.: Automated Manufacturing of Complex Composite Structures by the Use of Advanced Textile Preforming Technologies. 6. International Conference on Automated Composites (1999) Bristol, UK
- [179] Kruckenberg T.; Qi B.; Falzon P.; Lin Liu X.; Paton R.: Experimental and Predicted in-plane Flow Height Measurements for Stiffened Structures made using the Resin Film Infusion Process. SAMPE EUROPE Conference JEC (2001), S. 77-85
- [180] Palmer R. J.: Manufacture of Dry Fiber Preforms and Multi-Axial Stitch Bonded Fabric. SAMPE EUROPE Conference JEC (2001), S. 101-109

## Liste der betreuten Studien- und Diplomarbeiten

1. Thomas Pachler, 1997  
Herstellung dünnwandiger Schalen aus kontinuierlich faserverstärkten Duromeren, Studienarbeit
2. Yvonne Vatter, 1998  
Entwicklung eines Testverfahrens zur Messung der Drapierbarkeit von textilen Verstärkungsstrukturen, Diplomarbeit
3. Thomas Faulhaber, Patrick Kellner, Meik Möller, 1998  
Umkonstruktion einer Preformanlage, Technikerarbeit
4. Patrick Daniel, 1999  
Konstruktion eines RTM-Werkzeuges zur Herstellung von Versuchsplatten bei gleichzeitiger Nutzung als Permeameter, Studienarbeit
5. Andreas Keim, 1999  
Untersuchung des 3D-Imprägnierverhaltens von Verstärkungsstrukturen für das Resin Transfer Moulding (RTM)-Verfahren, Diplomarbeit

