

Konstruktive Auslegung und Umsetzung eines 3D Permeameters

Masterarbeit

verfasst von

Patrick Hergan, BSc.

erstellt am

Lehrstuhl für Verarbeitung von Verbundwerkstoffen

Department Kunststofftechnik

Montanuniversität Leoben



**VERARBEITUNG VON
VERBUNDWERKSTOFFEN**

Betreuung: Dipl.-Ing. Harald Grössing

Begutachtung: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ralf Schledjewski

Leoben, 19. Jänner 2015

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Datum

Unterschrift

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich beim Lehrstuhl Verarbeitung von Verbundwerkstoffen an der Montanuniversität Leoben mit seinem Leiter Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ralf Schledjewski sowie dem Christian Doppler Labor für hocheffizienten Composite Verarbeitung für die Finanzierung meiner Arbeit bedanken.

Fortführend danke ich meinem Betreuer, Dipl.-Ing. Harald Grössing, der mir die Erstellung der Masterarbeit zu dem Thema „Konstruktive Auslegung und Umsetzung eines 3D Permeameters“ ermöglichte. Er war jederzeit mit Rat und Tat zur Seite. Das kollegiale Arbeitsklima hat sehr dazu beigetragen, die Arbeit voller Energie fertigzustellen.

Recht herzlich danke ich auch allen Mitarbeitern des Lehrstuhls Verarbeitung von Verbundwerkstoffen, die mich bei der Arbeit unterstützt haben, insbesondere möchte ich aber MSc. Spiridon Konstantopoulos, Dipl.-Ing Maximilian Tonejc, Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Ewald Fauster, Dipl.-Ing. Alexander Maier und Ing. Stephanie Schindlegger hervorheben.

Zu guter Letzt gilt ein besonderer Dank meiner Familie, die mich während des gesamten Studiums tatkräftig unterstützte.

Kurzfassung

Ausgehend von dem Ziel einen Prüfstand zu entwickeln, der in der Lage ist die Dickenpermeabilität einer Verstärkungsstruktur zu bestimmen, wurde die Literatur zu diesem Thema durchleuchtet. Hierbei ergab sich, dass zum derzeitigen Zeitpunkt nur eine Hand voll Verfahren beschrieben werden, die eine solche Messung ermöglichen. Durch einen Entscheidungsfindungsprozess wurden die Vor- und Nachteile dieser Verfahren abgewogen.

Für die Konstruktion des Dickenpermeameters wurde der Ansatz des Ultraschall (US) Durchschallungsprinzipes verfolgt. Hierbei werden zwei US-Sensoren verwendet, wobei einer als Sender und der andere als Empfänger fungiert. Um bei der US-Sensorauswahl variabel zu sein, wurde ein modulares Konstruktionskonzept verfolgt, was eine nachträgliche Adaptierung des Systems ermöglicht.

Um eine ideale Funktionalität zu erreichen, wurden unterschiedliche Werkstoffe verbaut, deren spezifisches Materialverhalten speziell auf ihren Einsatz geprüft wurde.

Durch eine Reihe von Vorversuchen wurden die idealen Sensoren für das gewählte Messprinzip herausgefunden. In weiterer Folge wurden diese angeschafft und in die konstruierten und gefertigten Bauteile integriert.

Das Ergebnis dieser Arbeit ist ein 3D Permeameter, welches zur Bestimmung von Dickenpermeabilitäten von ungetränkten Verstärkungsstrukturen verwendet werden kann.

Abstract

Starting with the aim to develop a three dimensional permeameter which is able to measure the thru-thickness permeability of fibre preforms, a literature research was done. It was found out, that at this instant of time only a few of such test benches have been existing. By raring the pros and cons of the described measurement methods a decision-making process was carried out.

With the target to measure the flow front interface development of the injected liquid in the preform an approach with ultrasonic probes was used. The ultrasonic test-setup uses the time of flight mode to scan the preform by sound. Therefore two ultrasonic probes are used. One acts as transmitter the other one as receiver. To be variable at the ultrasonic probe selection a modular construction concept was applied. This also allows the thru-thickness Permeameter to be adapted.

For an ideal functionality of the construction different materials have been used. Their special material behaviour has been investigated to be used under ultrasonic environment.

Furthermore a few preliminaries have been carried out to find out the best sensors for this experimental setup. Subsequently, these sensors were purchased and integrated in the test bench.

The result of this thesis is a three dimensional permeameter which can be used to measure the thru-thickness permeability of fibre preforms under a similar environment as the liquid composite moulding process.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Einleitung und Zielsetzung | 1 |
| 2 | Grundlagen | 3 |
| 2.1 | Permeabilität | 3 |
| 2.1.1 | Eindimensionales Fließen | 4 |
| 2.1.2 | Zweidimensionales Fließen | 5 |
| 2.1.3 | Dreidimensionales Fließen | 6 |
| 2.2 | Berechnungsmethode der Dickenpermeabilität | 8 |
| 3 | Stand der Technik | 10 |
| 3.1 | Dickenpermeameter und 3D Permeameter | 10 |
| 3.2 | Sensorik | 11 |
| 3.2.1 | Injektionsdruck am Anguss | 11 |
| 3.2.2 | Volumen des injizierten Fluids | 13 |
| 3.2.3 | Höhe des Fließfrontscheitels über dem Anguss | 15 |
| 3.3 | Zusammenfassung Stand der Technik | 22 |
| 4 | Umsetzung | 23 |
| 4.1 | Design des Permeameters | 23 |
| 4.1.1 | Stehgerüst | 23 |
| 4.1.2 | Angusssystem | 24 |
| 4.1.3 | Grundplatte | 26 |
| 4.1.4 | Deckplatte | 28 |
| 4.2 | Aktuatorik | 29 |
| 4.3 | Sensorauswahl | 29 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 4.3.1 | Drucksensor | 30 |
| 4.3.2 | Volumen- bzw. Massestromsensor..... | 31 |
| 4.3.3 | Detektion der Fließfront | 34 |
| 4.4 | Gesamtsystem 3D Permeameter | 37 |
| 4.5 | Inbetriebnahme | 39 |
| 5 | Zusammenfassung | 44 |
| 6 | Literatur..... | 45 |
| 7 | Verwendete Symbole und Abkürzungen | 51 |
| 7.1 | Symbole | 51 |
| 7.2 | Abkürzungen..... | 53 |
| 8 | Abbildungsverzeichnis | 55 |
| 9 | Tabellenverzeichnis | 57 |

1 Einleitung und Zielsetzung

Die heutzutage eingesetzten Verfahren zur Verarbeitung von Compositen werden immer komplexer und erfordern somit oftmals vorhergehende Berechnungen und Simulationen. Um solche Simulationen mit genauen Ergebnissen durchführen zu können, ist eine Vielzahl an Stoffdaten nötig. Je genauer diese Daten bestimmt werden können, umso genauer wird auch die durch die Simulation ermittelte Vorhersage für den Prozess.

Der immer weiter zunehmende Einsatz von Verbundwerkstoffen in Luft- und Raumfahrt sowie im Automobilbau, führt zu neuen Herausforderungen im Bereich der Verarbeitung. Hierbei stößt man bei den derzeit eingesetzten Verfahren wie Liquid Composite Moulding (LCM), das den Überbegriff für Injektionsverfahren wie Resin Transfer Moulding (RTM), Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding (VARTM) und Vacuum Assisted Resin Injection (VARI) bildet, immer weiter in unbekannte Bereiche vor. Vor allem die immer größer werdenden Bauteildicken bedeuten für den Prozessingenieur eine zunehmende Wichtigkeit von Füllsimulationen. Mithilfe solcher Simulationen können ideale Injektionspunkte und -parameter gefunden werden, die in weiterer Folge zu einer Optimierung des Prozesses beitragen.

Besonders wichtig für Füllsimulationen von Verstärkungsstrukturen sind verlässliche Permeabilitätswerte. Um solche Werte vergleichbar messen zu können, ist eine Standardisierung der Messmethodik notwendig. Für die eindimensionale (1D) Bestimmung von Permeabilitäten wird bereits ein solcher Weg gezeigt [1, 2]. Beim zweidimensionalen (2D) Fall wird die Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Messverfahren dargestellt [3]. Für den dreidimensionalen (3D) Fall der Permeabilitätsmessung werden in der Literatur noch keinerlei Wege zu Standardisierungsmethoden beschrieben.

Sollten in Zukunft solche Standardisierungen vorhanden sein, werden auch die Textilhersteller gezwungen sein ihre Produkte weiter zu verbessern, da deren Tränkungeigenschaften durch Permeabilitätswerte bestimmt und somit international vergleichbar sein werden.

Der erste Schritt in diese Richtung wird in dieser Arbeit verfolgt, dessen Ziel es ist, einen Prüfstand zu entwickeln, der eine verfahrensnaher Bestimmung der Dickenpermeabilität von Verstärkungsstrukturen, für den LCM-Prozess, ermöglicht.

Wichtig ist es hierbei, dass ein Prüfverfahren entwickelt wird, welches den Bedingungen des LCM Prozess ähnelt.

Hierfür wurde die Literatur nach bereits bekannten Verfahren durchsucht und in einem kontinuierlichen Prozess ein Konzept entwickelt, wie ein solcher Prüfstand zu fertigen ist.

Den Abschluss der Arbeit stellte die Fertigung dieses Prüfstandes dar, welcher nach seiner Inbetriebnahme auf seine Funktionalität geprüft wurde.

2 Grundlagen

2.1 Permeabilität

In der von Henry Darcy beschriebenen Gleichung wird der Zusammenhang von Fließgeschwindigkeit, Druckabfall über einen Weg, sowie der Permeabilität und Viskosität hergestellt [4]. Er betrachtet in seiner Arbeit den gesättigten 1D Fall des Fließens einer Flüssigkeit durch poröse Sandschichten [5]. In Gleichung 1 beschreiben v_x die Fließgeschwindigkeit des Fluid, K_x die Permeabilität und Δx den Weg in die betrachtete Richtung. Die Viskosität des Fluids wird durch η und der über den Weg Δx entstehende Druckabfall durch ΔP beschrieben.

$$v_x = -\frac{K_x}{\eta} \frac{\Delta P}{\Delta x} \quad (1)$$

Diese von ihm empirisch ermittelte Gleichung kann aus der Navier - Stokes Gleichung für inkompressible Strömungen in einem porösen Medium hergeleitet werden [6]. Gleichung 2 stellt die Navier-Stokes Gleichung dar.

$$\rho \left(\frac{dv}{dt} \right) = -\nabla P + \eta \nabla^2 v \quad (2)$$

Dabei beschreibt ρ die Dichte, v den Geschwindigkeitstensor, ∇P den Druckgradienten und η die Viskosität des verwendeten Fluids.

Hierfür sind Annahmen zu treffen, welche im realen Versuch nicht immer eingehalten werden können [6, 7].

Aufgrund der geringen Fließgeschwindigkeit der Matrix kann die linke Seite der Gleichung 2 null gesetzt werden. Dies bedeutet, dass die Trägheitskräfte der Matrix durch die geringe Fließgeschwindigkeit als vernachlässigbar angenommen werden.

Durch Anwendung der Volumenkontrollmethode und der Annahme einer unendlichen Ausdehnung des porösen Materials können weitere Vereinfachungen gewonnen werden. Das Ergebnis ist die Gleichung von Darcy mit der Permeabilität K

als Proportionalitätsfaktor zwischen der Fließgeschwindigkeit und der treibenden Kraft durch das Druckgefälle [6].

Durch die in den Gleichungen 1 und 2 auftretende Fließgeschwindigkeit ist immer ein zeitvarianter Term vorhanden. Dieser macht es notwendig für die Bestimmung der Permeabilität den zeitlichen Fließfrontfortschritt der Flüssigkeit zu bestimmen.

2.1.1 Eindimensionales Fließen

Legt man nun Gleichung 1 der Ermittlung der Permeabilität zugrunde, so muss die Geschwindigkeit des Fluids beim Durchströmen des porösen Mediums bekannt sein. Diese kann über den Volumenstrom Q und die effektiv durchströmte Fläche A_{ef} berechnet werden. Gleichung 3 stellt die resultierende Form des Ausdruckes dar:

$$K_x = -Q \cdot \frac{\Delta x}{\Delta P} \cdot \eta \cdot A_{ef} \quad (3)$$

Wobei die A_{ef} durch Gleichung 4 definiert ist.

$$A_{ef} = A \cdot \varepsilon \quad (4)$$

Hierbei ist A die Querschnittsfläche der durchströmten Form normal zur Fließrichtung und ε die Porosität des durchströmten Materials.

Umgelegt auf eine Verstärkungsstruktur aus Faserhalbzeug lässt sich die Porosität über den Zusammenhang mit dem Faservolumengehalt V_f errechnen. Der Faservolumengehalt lässt sich mittels Gleichung 5, bei der n die Anzahl der Lagen des Faserhalbzeugs, S_0 deren Flächengewicht, ρ_f die Dichte des Faserhalbzeugs und h die Kavitätenhöhe angeben, berechnen [6].

$$V_f = \frac{n \cdot S_0}{\rho_f \cdot h} \quad (5)$$

Die Porosität ist laut Gleichung 6 definiert:

$$\varepsilon = 1 - V_f \quad (6)$$

Eine Vielzahl an Arbeiten greift auf die 1D Messung der Permeabilität von Verstärkungsstrukturen zurück, wenn auch meist in abgewandelter Form [1, 8–10]. Hier-

bei muss zwischen 1D Messungen im gesättigten bzw. ungesättigten Medium unterschieden werden.

2.1.2 Zweidimensionales Fließen

Das 2D Fließen stellt das Fließen in der Ebene dar [11–15]. Aufgrund der unterschiedlichen Materialstrukturen müssen hierbei zwei unterschiedliche Fälle betrachtet werden. So kommt es bei einem in den zwei betrachteten Dimensionen isotropen Werkstoff zu einer kreisförmigen und bei einem anisotropen Werkstoff zu einer elliptischen Ausbreitung der Fließfront des injizierten Fluids [6, 15–18].

Zur Lösung dieses Problems wird die Darcy Gleichung in ihrer Polarkoordinaten Form angewandt. Diese ist in Gleichung 7 dargestellt, wobei $\partial P / \partial r$ den Druckgradienten über den Radius definieren.

$$\vec{v} = -K \frac{1}{\eta} \frac{\partial P}{\partial r} \quad (7)$$

Im Falle der kreisförmigen Ausbreitung ergeben sich gleiche Werte für die Permeabilitätswerte K_1 und K_2 . Aus diesem Grund werden sie in der nachfolgenden Gleichung 8 zusammengefasst und als $K_{1,2}$ bezeichnet. Durch Lösen der Laplacegleichung in Polarkoordinaten und Einsetzen der neuen Druckverteilung in Gleichung 7 erhält man nach der Integration mit den entsprechenden Randbedingungen die Permeabilität $K_{1,2}$ [16].

$$K_{1,2} = \left\{ r_f^2 \left[2 \ln \left(\frac{r_f}{r_0} \right) - 1 \right] + r_0^2 \right\} \frac{1}{t} \frac{\eta \varepsilon}{4 \Delta P} \quad (8)$$

Hierbei kommen die noch nicht definierten Variablen r_f für den Radius der Fließfront, r_0 für den Radius des Angusses und t als Zeit zwischen Injektionsstart und Aufnahme der Messdaten. ΔP ist die Differenz zwischen dem Gegendruck an der Fließfront und dem Injektionsdruck des Fluids.

Bei einem anisotropen Fließverhalten in der Ebene kommt es zu einer elliptischen Ausbreitung der Fließfront. Die Fließfront kann somit mittels dreier Parameter beschrieben werden, die Haupt- und Nebenachsenlänge der Ellipse sowie den Winkel, den eine Hauptachse zum Rand des Messsystems aufweist. Aufgrund der, durch die Anisotropie des Materials, auftretenden unterschiedlichen Permeabilitä-

ten K_1 und K_2 in Richtung der zwei Achsen der Ellipse ist die Gleichung keine Laplacegleichung mehr. Adams löst dieses Problem mithilfe eines iterativen Ansatzes [17]. Mithilfe spezieller Transformationen kann allerdings eine analytische Lösung für ein quasi-isotropes System gefunden werden. Dies wird von Weitzenböck gezeigt [16]. Ist der Winkel der Drehung der Ellipse bekannt, so ergeben sich für die Permeabilitäten entlang der Haupt- und Nebenachse die Gleichungen 9 und 10.

$$K_1 = \left\{ x_f^2 \left[2 \ln \left(\frac{x_f}{x_0} \right) - 1 \right] + x_0^2 \right\} \frac{1}{t} \frac{\eta \varepsilon}{4 \Delta P} \quad (9)$$

$$K_2 = \left\{ y_f^2 \left[2 \ln \left(\frac{y_f}{y_0} \right) - 1 \right] + y_0^2 \right\} \frac{1}{t} \frac{\eta \varepsilon}{4 \Delta P} \quad (10)$$

Hierbei ist x_f der Fortschritt der Fließfront entlang der Hauptachse und y_f der Fließfrontfortschritt entlang der Nebenachse der Ellipse. x_0 und y_0 definieren die Parameter des elliptischen Angusses.

2.1.3 Dreidimensionales Fließen

Wie bereits bei der Permeabilität im 2D wird auch hier eine Transformation der anisotropen realen Fließfront in ein isotropes Ersatzsystem angewandt. Durch die Punktinjektion in einer Ebene kommt es zu einer Ausbreitung der Flüssigkeitsfront in Form eines Ellipsoids. Dieser kann durch die drei Halbachsenlängen a , b und c beschrieben werden. Parallel zu diesen Hauptachsen befinden sich die Hauptachsenpermeabilitäten, die in den Permeabilitätstensor eingehen [18, 19]. Die Auswirkung der Koordinatentransformation wird in Abbildung 1 dargestellt.

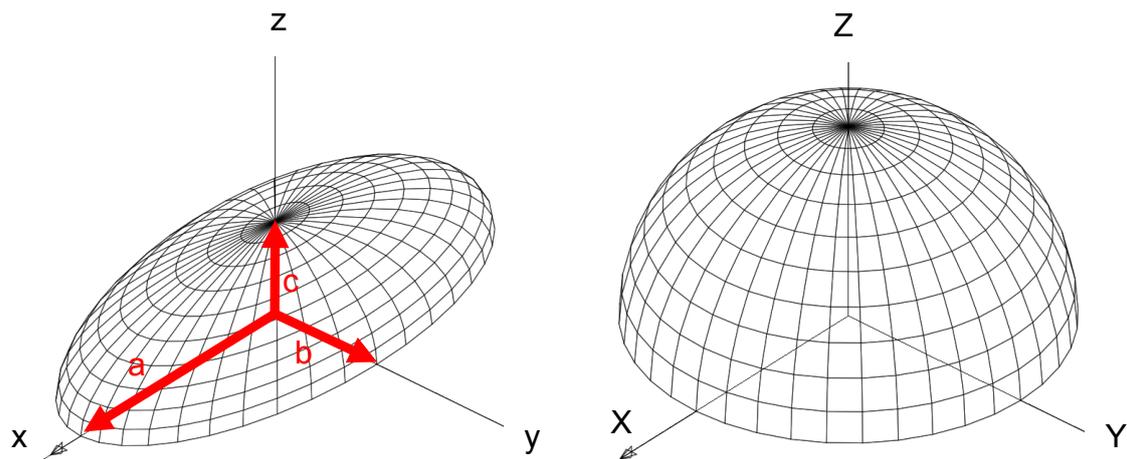


Abbildung 1: Vergleich anisotrope Ausbreitung der Fließfront mit isotroper Ausbreitung im Ersatzmodell.

Die isotrope Ersatzpermeabilität K_e ist nach Gleichung 11 definiert.

$$K_e = \sqrt[3]{K_1 K_2 K_3} \quad (11)$$

Hieraus ergeben sich die in den Gleichungen 12 bis 14 angeführten Transformationsformeln, mit denen die realen Koordinaten x , y und z in die Koordinaten X , Y und Z des isotropen Raumes transformiert werden.

$$X = \sqrt{\frac{K_e}{K_1}} x \quad (12)$$

$$Y = \sqrt{\frac{K_e}{K_2}} y \quad (13)$$

$$Z = \sqrt{\frac{K_e}{K_3}} z \quad (14)$$

Da es in einem isotropen System zu einer kugelförmigen Ausbreitung der Fließfront kommt, ist die Druckverteilung dort nur noch abhängig vom Radius r . Dadurch vereinfacht sich die Laplacegleichung. Fügt man nun die Ableitung des Gesetzes von Darcy ein, integriert diese Gleichung und definiert Randbedingungen, erhält man die Formeln der Hauptachsenpermeabilitäten K_1 , K_2 und K_3 laut den Gleichungen 15 bis 17 [18, 20].

$$K_1 = \frac{1}{t} \frac{x_0^2 \eta \varepsilon}{6 \Delta P} \left[2 \left(\frac{x_f}{x_0} \right)^3 - 3 \left(\frac{x_f}{x_0} \right)^2 + 1 \right] \quad (15)$$

$$K_2 = \frac{1}{t} \frac{y_0^2 \eta \varepsilon}{6 \Delta P} \left[2 \left(\frac{y_f}{y_0} \right)^3 - 3 \left(\frac{y_f}{y_0} \right)^2 + 1 \right] \quad (16)$$

$$K_3 = \frac{1}{t} \frac{z_0^2 \eta \varepsilon}{6 \Delta P} \left[2 \left(\frac{z_f}{z_0} \right)^3 - 3 \left(\frac{z_f}{z_0} \right)^2 + 1 \right] \quad (17)$$

Hierbei definieren die Parameter x_f , y_f und z_f die Ausbreitung der Fließfront entlang der Hauptachsen des Ellipsoids und x_0 , y_0 und z_0 die Parameter des Angusses. Das bedeutet, dass der Anguss hierbei ebenfalls eine gewölbte, ellipsoide Form besitzen muss [18].

2.2 Berechnungsmethode der Dickenpermeabilität

Unter Kapitel 2.1.3 wird bereits auf den 3D Fall der Fließfrontausbreitung eingegangen. Die Bestimmung der drei Hauptachsenpermeabilitäten erfordert nach den Gleichungen 15 bis 17 allerdings immer die Kenntnis aller Geometrieparameter des Ellipsoids. Um dieses Problem zu umgehen wird ein Verfahren beschrieben, das es ermöglicht, ohne die Abmessungen der Halbachsenlängen a und b zu kennen, die Permeabilität K_3 zu ermitteln.

Hierfür wird als Zusatzinformation das Volumen des injizierten Fluids benötigt. Damit die in den Gleichungen 12 bis 14 beschriebene Transformation der Koordinaten zulässig ist, muss Volumenkonstanz gelten. Das bedeutet, dass Gleichung 18 zu jeder Zeit Gültigkeit behält.

$$V_{el} = \frac{2}{3} \pi a b c \varepsilon = V_{ku} = \frac{2}{3} \pi r_f^3 \varepsilon \quad (18)$$

Hierbei beschreiben V_{el} und V_{ku} die Volumina des Halbellipsoides sowie der Halbkugel des isotropen Ersatzmodells. Sind das injizierte Volumen sowie die Porosität des Materials bekannt, so kann der Radius der Halbkugel r_{fe} errechnet werden [18]. Dieser ergibt sich nach Gleichung 19.

$$r_{fe} = \sqrt[3]{\frac{3V_{el}}{2\pi\varepsilon}} \quad (19)$$

Ist nun der Abstand zwischen Injektionspunkt und Scheitel der Fließfront z_f bekannt, so kann eine mittlere Ausbreitung der Fließfront in der Ebene errechnet

werden. Dieser virtuelle horizontale Radius r_{xy} genügt der Volumenkonstanz sowie den Transformationsbedingungen und wird benutzt um eine virtuelle Permeabilität K_{xy} in der xy -Ebene zu berechnen. Somit ergibt sich für r_{xy} Gleichung 20.

$$r_{xy} = \sqrt{\frac{3V_{el}}{2\pi\epsilon z_f}} \quad (20)$$

Formt man nun die Gleichung 12 um und setzt für x r_{xy} ein, so erhält man Gleichung 21, die ebendiese virtuelle Permeabilität K_{xy} beschreibt.

$$K_{xy} = \left(\frac{r_{xy}}{r_{fe}}\right)^2 K_e \quad (21)$$

Für K_e kann mit sehr guter Näherung Gleichung 22 verwendet werden. Es ist allerdings erforderlich, dass die Dimension der Injektionsöffnung passend gewählt wird [18–20].

$$K_e \approx \frac{1}{t} \frac{r_0^2 \eta \epsilon}{6\Delta P} \left[2 \left(\frac{r_{fe}}{r_0}\right)^3 - 3 \left(\frac{r_{fe}}{r_0}\right)^2 + 1 \right] \quad (22)$$

Da zu Beginn der Messung noch keine Permeabilitäten bekannt sind, berechnet sich r_0 laut Gleichung 23. Hierbei werden die errechneten und messtechnisch ermittelten Fließfrontkoordinaten unter Berücksichtigung der Halbachsenbeziehungen verwendet [18].

$$r_0 = R_0 \sqrt{\frac{z_f}{r_{fe}}} \quad (23)$$

Folglich ergibt sich die Dickenpermeabilität K_3 laut Gleichung 24 [18].

$$K_3 = \left(\frac{z_f}{r_{fe}}\right)^2 K_e \quad (24)$$

3 Stand der Technik

3.1 Dickenpermeameter und 3D Permeameter

In der Literatur werden, im Vergleich zur in-plane Messung, nur eine geringe Anzahl an Messverfahren aufgeführt, die dazu in der Lage sind entweder die Dickenpermeabilität oder weitgreifender die 3D Permeabilität einer Verstärkungsstruktur zu ermitteln. So befasst sich Jaganathan S. in seiner Arbeit mit Schlibbildern einer ausgehärteten Verbundstruktur, die in Folge zu einem 3D Modell zusammengefügt werden. Hierbei werden die Fasern sichtbar gemacht und in ein Computermodell überführt. Über fluidmechanische Finite Elemente Betrachtungen, denen das Gesetz von Darcy zugrunde liegt, werden dann Permeabilitätswerte berechnet [21]. Auch andere Arbeiten greifen auf computergestützte Berechnungen von Permeabilitäten zurück [22–26]. Diese Arbeiten untersuchen allerdings nicht den laufenden Prozess sondern stützen sich rein auf mathematische Methoden.

Die Messung des 3D Permeabilitätstensors während der Injektion wird erstmals 1995 von Ahn S. H. beschrieben. In seiner Arbeit zeigt er, wie es mithilfe faseroptischer Sensoren möglich ist die Permeabilität von Verstärkungsstrukturen zu bestimmen [27]. Trotz der kleinen Abmessungen der faseroptischen Sensoren kommt es durch diese zu einer Veränderung der Faserstruktur, welche sich klarerweise auch in den gemessenen Permeabilitäten niederschlägt. Noch im gleichen Jahr beschreiben Bréard et al. eine auf Röntgenstrahlen basierende Methode zur Detektion der Fließfront in der Verstärkungsstruktur [28]. Weitzenböck greift das Grundprinzip der Messung von Ahn S. H. auf, verwendet zur Detektion allerdings temperaturempfindliche Resistoren [20]. Nedanov hingegen impliziert in seinen Messaufbau eine Videokamera um die Fließfront in der Ebene zu detektieren. Des Weiteren nimmt er den Massefluss des injizierten Fluids auf. Über eine Berechnung, die der unter 2.2 beschriebenen ähnelt, wird die vertikale Ausbreitung des Fluids berechnet [19]. Andere Arbeiten greifen die Berechnungsmethode auf, transformieren sie allerdings in die Form wie in 2.2 beschrieben. Die Detektion der Fließfront findet dann mit US oder der linearen Gleichstrom (LDC) Messmethode statt [29, 30].

3.2 Sensorik

Aus dem in Kapitel 2.2 beschriebenen Berechnungsalgorithmus geht hervor, dass für die Bestimmung der Dickenpermeabilität folgende Daten aus dem Experiment ermittelt werden müssen:

- Radius der Injizierungsöffnung,
- Höhe der Kavität,
- Porosität der untersuchten Struktur,
- Viskosität des injizierten Fluids,
- Injektionsdruck am Anguss bzw. an der Fließfront,
- Volumen des injizierten Fluids und
- Höhe des Fließfrontscheitels über dem Anguss.

Die ersten zwei Punkte lassen sich ohne Probleme ermitteln. So ist der Radius der Injizierungsöffnung konstant und kann notfalls mittels einer Schiebelehre nachbestimmt werden. Die Höhe der Kavität wird auf den gewünschten Abstand eingestellt. Für die Porosität der untersuchten Struktur kann der Zusammenhang mit dem Faservolumengehalt herangezogen werden. Dieser Zusammenhang wird bereits in den Gleichungen 5 und 6 beschrieben. Die Viskosität der injizierten Flüssigkeit kann im Falle eines Newtonschen Fluids für eine bestimmte Temperatur als konstant angenommen werden. Dieser Stoffparameter kann aus dem Datenblatt des Fluids entnommen oder mit einem Viskosimeter bestimmt werden.

Die Ermittlung der folgenden drei Punkte erfordert einen höheren gerätetechnischen Aufwand. Aus diesem Grund werden nachfolgend Möglichkeiten angeführt, mit denen diese Parameter bestimmt werden können.

3.2.1 Injektionsdruck am Anguss

Hierfür ist eine Druckmessung möglichst nah am Anguss durchzuführen. Die Druckmessung kann technisch auf unterschiedliche Weise realisiert werden. Nachfolgend werden die am häufigsten verwendeten Verfahren aufgelistet. Bei der Druckmessung kann entweder auf die Verformung eines Körpers unter Druck, oder über die Nutzung der Druckabhängigkeit interinistischer Eigenschaften eines Körpers zurückgegriffen werden [31, 32].

- **Magnetoelastische Messung**

Bei dieser Messmethode wird der Effekt ausgenutzt, dass ferromagnetische Werkstoffe bei der Verformung eine Änderung ihrer magnetischen Permeabilität aufweisen. Idealerweise ist dieser Effekt bei weichmagnetischen Materialien linear proportional zur Verformung. Für den Messaufbau wird der magnetoelastische Kern mit einer Kraft beaufschlagt. Dieser verkürzt sich dadurch, was eine Änderung der magnetischen Permeabilität zu Folge hat. Eine den Kern umfassende Spule ändert somit ihre Induktivität. Diese Änderung kann über elektrische Messverfahren erfasst werden [31–33].

- **Kapazitive Messung**

Bei diesem Messprinzip wird die Wegänderung eines Verformungskörpers aufgenommen. Durch die Verformung ändert sich der Abstand zwischen zwei Kondensatorplatten. Eine dieser Platten ist als Membran ausgeführt, wodurch eine definierte Verformung gewährleistet wird. Durch diese Verformung kommt es zu einer Änderung der Kapazität. Der Abstand der Platten geht hierbei reziprok zur Kapazität ein. Diese Kapazitätsänderung kann mithilfe elektrotechnischer Messmethoden ermittelt werden [31–35].

- **Piezoelektrische Messung**

Bei diesem Messprinzip werden Materialien wie Quarz, Turmalin oder Bariumtitanat verwendet. Werden diese Materialien einer Kraft ausgesetzt, so entsteht eine elektrische Ladung. Diese bildet sich mit unterschiedlicher Polarität an den gegenüberliegenden Seiten des Kristalls aus. Mithilfe eines Verstärkers und Messwandlers wird diese Spannung in ein messbares elektrisches Signal umgewandelt [31–35].

- **Piezoresistive Messung**

Das Wirkungsprinzip dieser Messmethode beruht auf der Dehnungsabhängigkeit des spezifischen elektrischen Widerstandes von Halbleiterwiderständen. Wird eine mechanische Spannung auf einen Halbleiter-Dehnungsmessstreifen (H-DMS) aufgebracht, so ändert sich dessen elektrischer Widerstand. Dieser piezoresistive Effekt entsteht durch die Verformung der Bandstruktur. Die dafür

verwendeten Halbleiter werden zumeist aus Silizium hergestellt. Um Messfehler zu vermeiden werden vier solcher H-DMS zu einer Wheatstone'schen Messbrücke zusammengeschaltet und auf eine Membran aus einkristallinem Silizium aufgetragen. Durch Leiterbahnen aus Aluminium wird der elektrische Kontakt zu einem Messverstärker hergestellt. Zum Schutz der Siliziummembran vor äußeren Einflüssen erfolgt die Druckaufbringung über eine Trennmembran und eine Druckübertragungsflüssigkeit [31–35].

3.2.2 Volumen des injizierten Fluids

Um die Menge des injizierten Fluids zu bestimmen, ist die Nutzung eines Volumen- bzw. Massestrommessgerätes notwendig. Von der Vielzahl an möglichen Messverfahren werden nachfolgend die bedeutendsten und genauesten angeführt und beschrieben.

- **Volumetrische Messung**

Zur Ermittlung des Volumenstroms wird bei der volumetrischen Durchflussmessung das Fluid durch Messkammern oder Messturbinen geführt. Dieses Messverfahren kann wiederum in mehrere Unterkategorien unterteilt werden. So gibt es das Verdrängungsverfahren, bei dem das Fluid durch genau definierte Hohlräume geführt wird. Diese werden in Zyklen gefüllt und wieder entleert. Durch diesen Prozess ergibt sich z.B. beim Ovalradzähler eine Rotation der Ovalräder. Diese kann detektiert und somit der Volumenstrom ermittelt werden. Nach dem Prinzip der volumetrischen Messung funktionieren unter anderem auch so genannte Turbinendurchflussmesser. Bei diesen Sensoren wird eine Turbine durch das durchfließende Medium in Rotation versetzt. Weiters sind vor allem in Labors eingesetzte Schwebekörper-Durchflussmesser zu nennen. Bei diesem Messprinzip wird die kinetische Energie des durchströmenden Fluids durch einen Schwebekörper dargestellt. Durch Ablesen der Schwebehöhe des Körpers kann die Fließgeschwindigkeit ermittelt werden [31, 32, 34].

- **Wirkdruckverfahren**

Bei diesem Verfahren kommt der Venturi-Effekt zur Anwendung. Dieser strömungsmechanische Effekt bewirkt, dass es bei unterschiedlichen Fließgeschwindigkeiten zu unterschiedlichen Druckniveaus in der Flüssigkeit kommt. Die Änderung der Fließgeschwindigkeit wird durch eine Verengung des Fließquerschnittes erreicht. Der Volumendurchsatz lässt sich über die Druckdifferenz der gemessenen Drücke errechnen [31, 32, 34].

- **Coriolis-Durchflussmessung**

Dieses Messsystem greift auf die Corioliskraft zurück. Beim Durchfließen eines, in Resonanzschwingung versetzten, U-förmigen, Rohres kommt es zu einer Verwindung von diesem. Grund dafür ist die Corioliskraft, die dazu führt, dass sich das Fluid der senkrecht zur Strömungsrichtung entstehenden Kraft widersetzt. Diese Verwindung kann mittels magnetinduktivem oder lasergestütztem Verfahren ermittelt werden und ist direkt proportional zum Massendurchfluss [36]. Ist das Rohrvolumen bekannt, kann auch die Dichte des Fluids ermittelt werden, da die Resonanzfrequenz von der Masse der schwingenden Rohrschleife abhängt [31, 32, 37].

- **Ultraschall-Durchflussmessung**

Die US Messmethode ist eine sehr potente Anwendung, die eine Durchflussbestimmung über verschiedenste physikalische Phänomene ermöglicht. Die Laufzeitmethode, die über das Durchschallungsprinzip arbeitet, verwendet zwei US Sensoren die in einem definierten Abstand auf der gegenüberliegenden Seite eines Rohres angebracht sind. Sie senden über einen definierten Winkel zur Fließrichtung des Fluids einen Ultraschallimpuls aus. Dieser Impuls wird abwechselnd von beiden Sensoren gesendet und empfangen. Durch die Fließgeschwindigkeit des Fluids kommt es in eine Richtung zu einer kürzeren und in die andere Richtung zu einer längeren Durchschallungszeit. Aus der Differenz kann die Fließgeschwindigkeit des Fluids bestimmt werden. Desweiteren kann der Volumenstrom mittels des Driftverfahrens, der Dopplermessmethode und dem Reflexionsprinzip ermittelt werden [31, 32].

3.2.3 Höhe des Fließfrontscheitels über dem Anguss

Derzeit werden unterschiedlichste Methoden zur Erfassung der Fließfront zur Permeabilitätsmessung angewandt. Die Techniken lassen sich in zwei große Gruppen unterteilen: Techniken, die direkt in Kontakt mit der Fließfront kommen und Techniken, die eine kontaktlose Erfassung der Fließfront ermöglichen. Direkt in Kontakt stehende Methoden haben den Vorteil, dass sie die Fließfront exakt detektieren. Allerdings kommt es durch die Integration der Messelemente in die Verstärkungsstruktur zu einer Strukturveränderung dieser, welche die ermittelten Permeabilitätskennwerte verfälscht. Dieses Problem tritt bei kontaktlosen Messverfahren nicht auf. Nachfolgend werden zuerst die Messmethoden beschrieben, die eine Integration in die Verstärkungsstruktur benötigen. Nachfolgend wird auf die kontaktlosen Messmöglichkeiten eingegangen.

- **Lineare Gleichstrom Widerstandsmessung**

Diese Technik wurde von Aukward und Warfield erstmals zur Detektion von Harz angewandt. Mithilfe dieses Verfahrens ist es möglich die Änderung des Widerstandes aufgrund der Harzfüllung aufzuzeichnen. Um diese Methode auch bei LCM Prozessen anwenden zu können, ist allerdings noch Entwicklungsaufwand nötig [38].

Eine weiterentwickelte Form dieser Methode stellt das vom US Army Research Laboratory und der Universität Dalaware entwickelte Sensor Mounted As Roving Threads System (SMARTweaveTM) dar. Bei dieser Technik wird mithilfe eines Rasters aus leitenden Elementen in der Preform ein Sensornetzwerk aufgebaut. Mithilfe dieses Netzwerkes kann der Fortschritt der Fließfront detektiert werden. Abbildung 2 stellt dieses System dar [38].

Vor dem Imprägniervorgang besteht noch keine elektrische Spannung zwischen den ungekoppelten orthogonalen Rastern. Sobald das Harz einen Knotenpunkt erreicht, ergibt sich eine Änderung des Widerstandes zwischen den Leitern, welche mithilfe eines Gleichstroms gemessen werden kann. Mittels eines in mehrere Schichten eingebauten Systems kann so eine 3D Ausbreitung des Harzes in Rasterform gemessen werden. Sollten die Knotenpunkte allerdings zu nah aneinander liegen, kann es zu Störungen im System kommen.

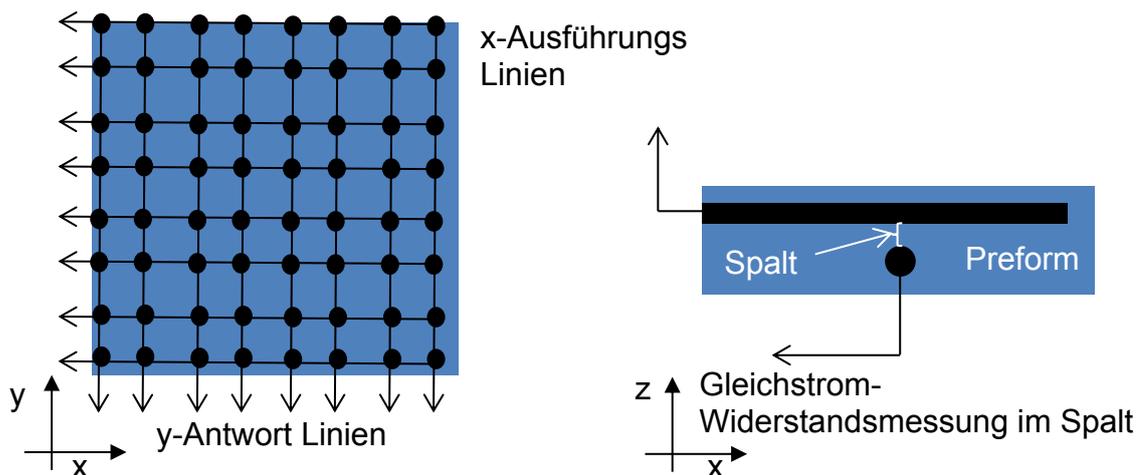


Abbildung 2: Konfiguration des SMARTweave™ Systems [38].

Bei Venylester Harzen kann es zu einem zu hohen Widerstand kommen. Aus diesem Grund muss dem Harz ein Salz zugegeben werden, welches allerdings die Viskosität nicht verändern darf [30].

- **Faseroptische Messsysteme**

Aufgrund ihres geringen Durchmessers können optische Fasern in eine Preform eingearbeitet werden. Ihr Durchmesser von 100 μm liegt allerdings eine Größenordnung über dem der in einer herkömmlichen Preform verarbeiteten Filamente. Dies führt zu einer Veränderung der Fließfrontausbreitung und der porösen Eigenschaften der Verstärkungsstruktur. Nachfolgend werden zwei Arten der faseroptischen Messmethoden zur Permeabilitätsbestimmung vorgestellt. Für alle gilt, dass sie als ein Netzwerk in die Preform eingearbeitet werden müssen um ein dreidimensionales Bild der Fließfront detektieren zu können [39].

Die Extensic Fabry Perot Interferometer (EFPI) Messmethode nutzt eine Mikrokavität mit zwei eingelegten Fasern. Aufgrund von Druck, Temperatur oder Spannung ändert sich die Länge der Kavität. Mit dieser Änderung geht eine Änderung der durchgelassenen Lichtintensität einher. Zur Erläuterung des Prinzips zeigt Abbildung 3 das Messprinzip.

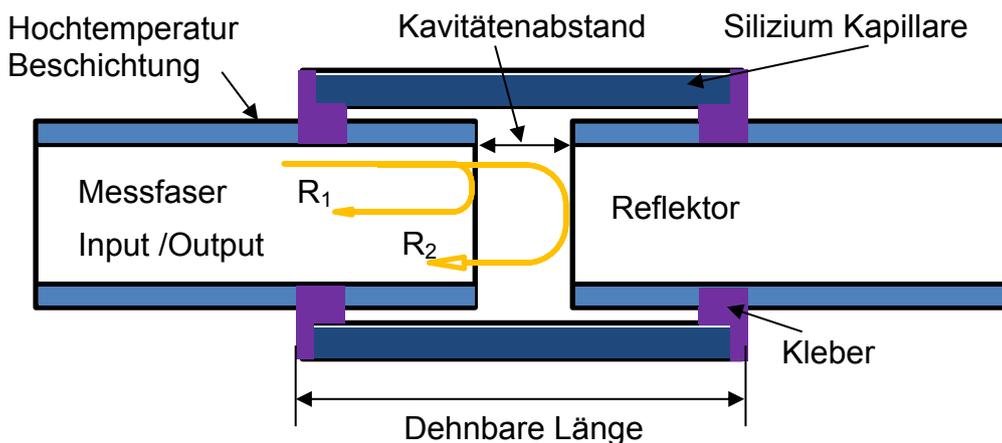


Abbildung 3: Darstellung des Messprinzips einer EFPI Faser [30].

Die Druckänderung beim Erreichen der Fließfront kann somit detektiert werden. Mit richtig angeordneten Fasern kann ein Raster aufgebaut werden, der den Fließfrontfortschritt aufnimmt [30].

Das evaneszente faseroptische Messsystem ist auf fluoreszierende Harze beschränkt. In die Faser wird mittels eines Lasers ein monochromatisches Licht eingebracht. Dieses kann an den Außenwänden der Faser mit dem fluoreszierenden Harz wechselwirken [40]. Dieses Harz emittiert eine charakteristische Wellenlänge, die in die Faser aufgenommen wird. An der Intensität dieser Wellenlänge kann der Fortschritt der Fließfront ermittelt werden. Diese Messmethode hat den Vorteil, dass deutlich weniger Fasern in die Preform eingearbeitet werden müssen. Das Verfahren kann auch verwendet werden um den Aushärtprozess der Matrix zu überwachen [41]. Abbildung 4 zeigt das Messprinzip im Detail [30].

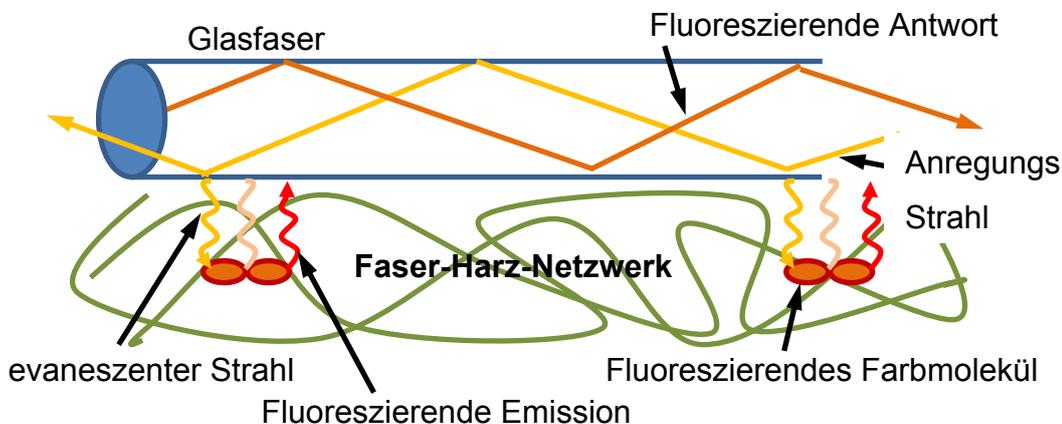


Abbildung 4: Funktionsprinzip eines evaneszenten faseroptischen Messprinzips [40].

- **Visuelle Messung**

Um eine visuelle Messung durchzuführen ist es notwendig, zumindest eine Seite der Form mittels eines transparenten Werkstoffes zu realisieren. Oft wird diese Messmethode nur für ein- oder zweidimensionale Permeabilitätsbestimmungen verwendet, da für die dreidimensionale Messung nur zwei Punkte (Injektionspunkt zum Zeitpunkt $t=0$ und der Punkt des Durchtretens des Harzes auf der gegenüberliegenden Seite zum Zeitpunkt $t>0$) bekannt sind. Als großer Vorteil kann jedoch angesehen werden, dass bei diesem System durch Hinsehen überprüft werden kann, ob die Messung problemlos abläuft [19, 30, 42, 43].

Für die Durchführung des 3D Permeabilitätsversuches wird mittels einer Videokamera ein Video, welches die trockene Preform vom Beginn der Injektion bis zu einem Punkt, an dem sich eine gut erkennbare Fließfront an der Oberseite gebildet hat, aufgenommen. Es wird die Zeit von Beginn der Injektion bis zum Erkennen der Injektionsflüssigkeit gemessen. Dieser Wert ist zur Ermittlung der Permeabilität in Dickenrichtung notwendig. Für die restlichen zwei Werte des Permeabilitätstensors werden die Hauptachsenlängen der Ellipse der Fließfront benötigt. Des Weiteren wird die Masse der injizierten Flüssigkeit detektiert. Dieser Kennwert ist notwendig um das injizierte Volumen zu ermitteln, welches benötigt wird um das entstehende Ellipsoid zu berechnen, welches den Permeabilitätstensor bestimmt. Abbildung 5 stellt den Aufbau dieses Messsystems schematisch dar [19].

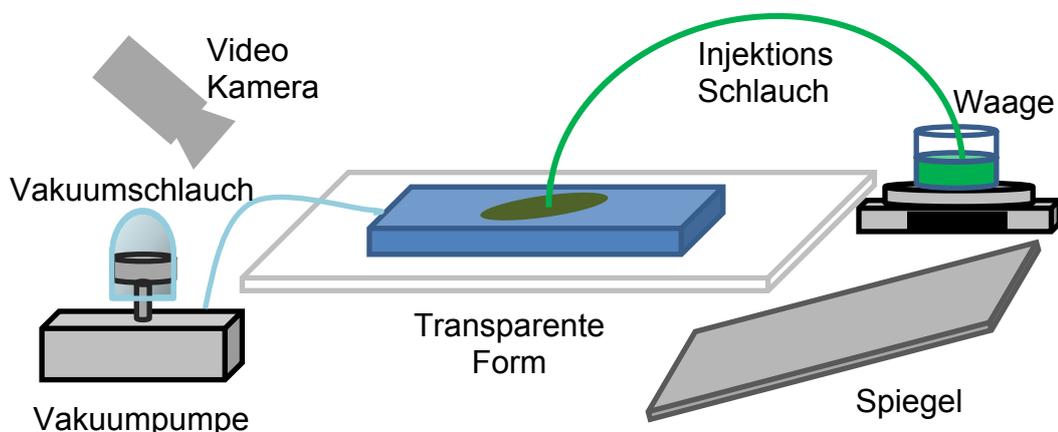


Abbildung 5: Schematische Darstellung des Messaufbaus für eine visuelle Messung [19].

Dadurch, dass bei dieser Versuchsvariante nur zwei Punkte der Fließfront über die Zeit in Dickenrichtung bestimmt werden können, kann es zu Einschränkungen kommen. Die restlichen Punkte werden errechnet und ergeben somit nur Schätzwerte. Außerdem kommt es bei der Injektion schon nach kurzer Zeit zu einem Druckabfall in der Preform, wodurch auch Kapillareffekte wirksam werden. Diese verfälschen die Ankunftszeit an der Oberseite und wirken als limitierender Faktor bei der Dicke der Verstärkungsstruktur [20].

- **Röntgen Spektroskopie**

Bei der Röntgenspektroskopie wird ein Verfahren angewandt, das der Computertomographie gleicht. Es produziert einen zweidimensionalen Schnitt durch die Preform. Mittels dieser Methode können hochauflösende Bilder, die bis zu 10 μm kleine Details darstellen können, aufgenommen.

Röntgenverfahren sind immer mit sehr hohem finanziellem Aufwand verbunden. Des Weiteren muss die Form aus einem für Röntgenstrahlen durchlässigen Material gefertigt werden. Neben diesen Problemen ist bei einem Röntgenverfahren immer der Gesundheitsaspekt zu beachten [30].

- **Ultraschall Messsystem**

Bei der Ultraschall Messtechnik zur Bestimmung der Fließfront in Dickenrichtung muss zwischen zwei Arten unterschieden werden: Einerseits der Puls-Echo Modus und andererseits der Durchschallungsmodus. Beide Messmethoden basieren auf der Messung der Laufzeit des Ultraschallimpulses. Zur Ermittlung der Fließfront des Fluids wird das Phänomen der unterschiedlichen Schallgeschwindigkeiten in getränkter und trockener Faser angewandt. Beide Verfahren sind unter dem Überbegriff Time of Flight (TOF) Mode bekannt.

Der Puls-Echo Modus arbeitet mit einem einzelnen US Sensor, der sowohl als Sender als auch als Empfänger fungiert. Der US Impuls wird an der unteren Seite der Kavität ausgesandt und trifft nach einer bestimmten Laufzeit auf die Fließfront des Fluids. Aufgrund der unterschiedlichen Schallgeschwindigkeiten der getränkten und trockenen Verstärkungsstruktur wird ein Teil des Impulses reflektiert und ein weiterer an der Grenzfläche transmittiert. Der reflektierte Im-

puls erreicht nach einer Zeit wieder den US Sensor, wo er detektiert wird. Abbildung 6 stellt das Messprinzip schematisch dar [30].

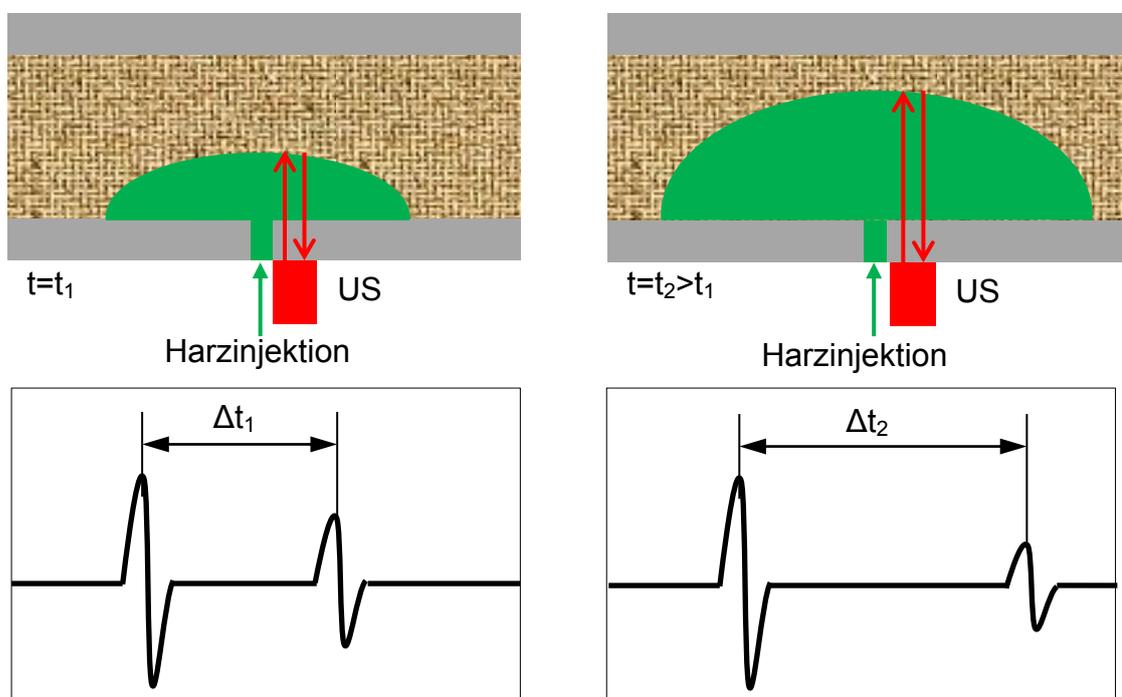


Abbildung 6: Messprinzip des TOF Puls-Echo Modus [30].

Aufgrund des Messprinzips kommt es bei dieser Messung in zweierlei Hinsicht zu einem Amplitudenverlust des Ultraschallimpulses. Einerseits wird nur ein Teil des Impulses reflektiert und andererseits geht durch den doppelt zurückgelegten Weg in der imprägnierten Verstärkungsstruktur weitere Impulsenergie infolge von Absorption bzw. Streuung verloren [30].

Bei der Durchschallungsmethode wird ein anderer Ansatz gewählt. Es wird mit einem US Sender und einem US Empfänger gearbeitet, welche sich auf der Ober- bzw. Unterseite der Form befinden. Da sich die Schallgeschwindigkeit in der trockenen und imprägnierten Verstärkungsstruktur unterscheidet, kommt es zu einer Verschiebung der Ankunftszeiten des US Impulses beim Empfänger. Aus den bei der Messung ermittelten Daten kann die maximale sowie minimale Durchlaufzeit ermittelt werden. Mithilfe dieser Werte kann in weiterer Folge die Fließfrontposition errechnet werden. Abbildung 7 zeigt diesen Messaufbau schematisch. Hierbei stellen c_1 und c_2 die unterschiedlichen

Schallgeschwindigkeiten der imprägnierten und trockenen Verstärkungsstruktur dar. Dabei gilt c_1 ist größer als c_2 [18].

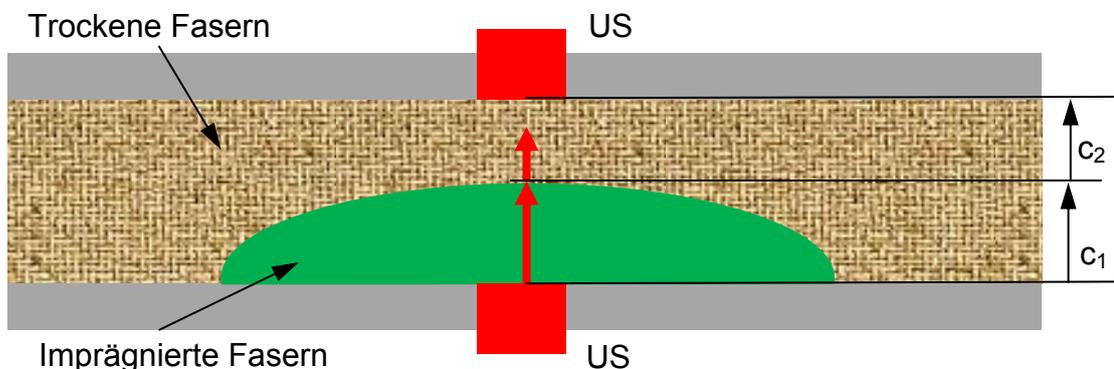


Abbildung 7: Messaufbau der TOF Durchschallungsmessung [29]

Die Durchschallungszeit verschiebt sich mit fortschreitender Fließfront zu geringeren Zeiten, was zu der in Abbildung 8 dargestellten Veränderung des US Signals in der TOF Darstellung führt.

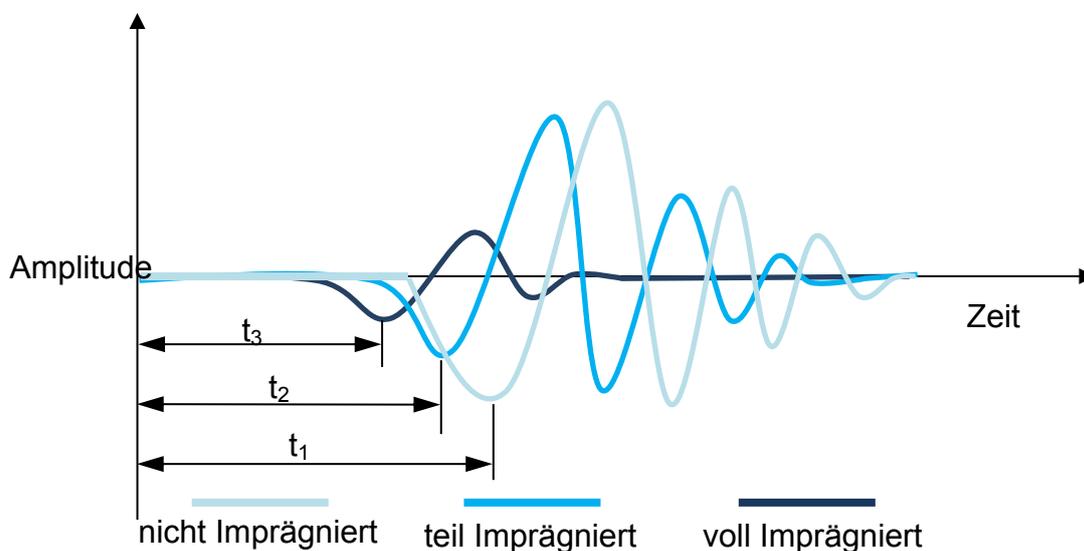


Abbildung 8: Veränderung des Ultraschallimpulses in TOF Darstellung während der Injizierung bei der Durchschallungsmethode [29].

3.3 Zusammenfassung Stand der Technik

Die Recherche zum Stand der Technik ergab, dass es für die Bestimmung des K_3 Parameters des 3D Permeabilitätssensors von ungetränkten Verstärkungsstrukturen nur eine Hand voll Messmethoden gibt. Hierbei sind vor allem folgende Verfahren anzuführen:

- Faseroptische Messmethode
- Röntgenstrahlenbasierte Messmethode ähnlich der Computertomographie
- Optische Messmethode
- Lineare Gleichstrommethode
- US Messmethode

Für den Aufbau dieser Messmethoden ist eine Reihe von Parametern notwendig, welche mithilfe unterschiedlichster Messverfahren bestimmt werden können:

Tabelle 1: Auflistung der diskutierten Messmethoden zur Bestimmung des K_3 Permeabilitätswertes.

| Injektionsdruck | Volumen des injizierten Fluids | Höhe des Fließfrontscheitels über dem Anguss |
|---------------------------|---------------------------------------|---|
| Magnetoelastische Messung | Volumetrische Messung | Lineare Gleichstrom Widerstandsmessung |
| Kapazitive Messung | Wirkdruckverfahren | Faseroptische Messung (EFPI, Evaneszents) |
| Piezoelektrische Messung | Coriolis-Durchflussmessung | Visuelle Messung |
| Piezoresistive Messung | Ultraschall-Durchflussmessung | Röntgen Spektroskopie |
| | | US Messung (Puls Echo, Durchschallung) |

Am vielversprechendsten zeigt sich dabei das US Messverfahren mit dem Durchschallungsprinzip, da es die meisten Messwerte über die Dicke erzeugt ohne die Verstärkungsstruktur zu verändern.

4 Umsetzung

Das fertige Dickenpermeameter setzt sich aus einer Vielzahl an mechanischen, aktuatorischen sowie sensorischen Bauteilen zusammen. Im folgenden Kapitel werden diese näher beschrieben. Des Weiteren wird auf den Entscheidungsprozess bei der Sensorauswahl eingegangen.

4.1 Design des Permeameters

Der Designprozess des Dickenpermeameters folgte einem iterativen Verbesserungsprozess unter Zuhilfenahme des Computer Aided Design (CAD) Programmes CATIA v6 2012 der Firma Dassault Systèmes. Die Dimensionierung der Bauteile stützte sich sowohl auf die Literatur als auch auf Erfahrungswerte der Mitarbeiter sowie der Firmen, deren Messsensorik implementiert wurde.

Es wurde eine modulare Bauweise gewählt, um eine nachträgliche Veränderung der Messsensorik oder Versuchsparameter zu ermöglichen. Dies wurde durch den Einsatz von Adaptersystemen realisiert.

Nachfolgend wird das Permeameter in von-unten-beginnender Reihenfolge beschrieben und auf die Besonderheiten der einzelnen Bauteile eingegangen.

4.1.1 Stehgerüst

Das Stehgerüst wurde großteils aus Item-Profilen mit einem Querschnitt von 40x40 mm gefertigt. Die Winkel und Standfüße wurden aus der gleichen Baureihe gewählt.

Abbildung 9 zeigt das Stehgerüst mit implementierter Aluplatte zur Befestigung des Durchflussmessers.

Bei der Auslegung wurde darauf geachtet eine möglichst kompakte Bauform zu erreichen und gleichzeitig einen stabilen Stand zu garantieren.

Die Stehfüße sind mittels Gewinde und Kontermutter befestigt um eine möglichst gerade Ausrichtung des Permeameters zu ermöglichen.



Abbildung 9: Stehgerüste des 3D Permeameters.

4.1.2 Angussystem

Das Angussystem wurde aus einem Edelstahlblock gefertigt und so konzipiert, dass eine Integration des Druck- sowie US Sensors ermöglicht wird. Abbildung 10 zeigt das Angussystem von oben. Die ovale Fräsung an der Oberseite dient der Aufnahme eines Dichtungsringes.

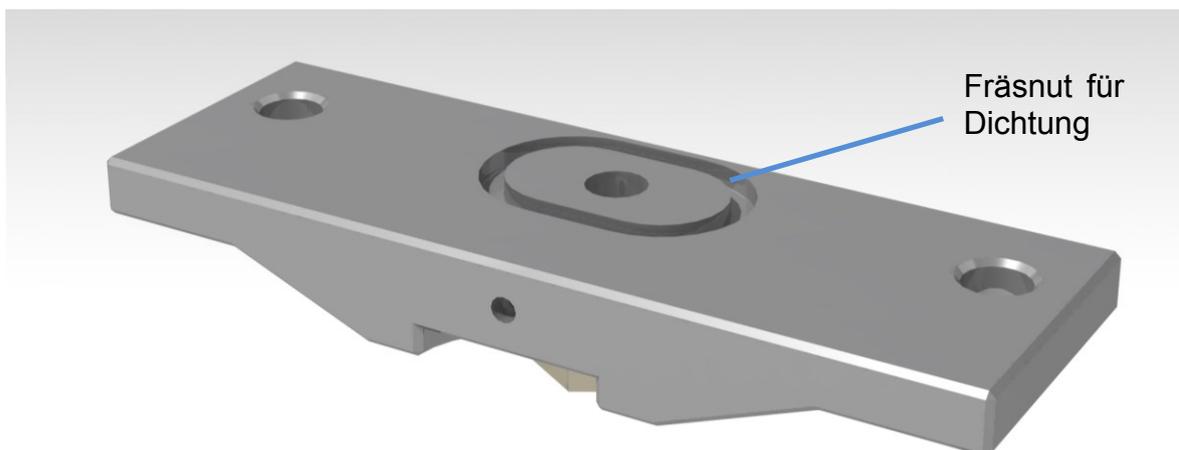


Abbildung 10: Angussystem von oben betrachtet.

In Abbildung 11 wird das Angussystem mit einem Schnitt entlang der Symmetrieachse dargestellt. Hierbei sind der Fließkanal für das Fluid, die Ausnehmung für den Drucksensor, sowie der Adapter für den US Sensor zu erkennen. Der orange dargestellte Bereich stellt dabei den aus Polyoxymethylen (POM) gefertigten Adapter dar, welcher mittels Gewinde in das Angussystem eingeschraubt wird. POM verfügt über ausgezeichnete akustische Dämpfungseigenschaften für Ultraschall und wurde verwendet um eine Entkoppelung des US Sensors vom restlichen System zu erreichen. Diese Dämpfung entsteht durch eine Verschiebung der Glasübergangstemperatur (T_g) in Richtung Raumtemperatur bei Frequenzen um 1 MHz. In diesem Bereich ist der Verlustmodul äußerst hoch, was zu einer hohen Dämpfung führt [44, 45]. Der hellblau dargestellte Einsatz für den Adapter wurde aus Polymethylmetacrylat (PMMA) gefertigt und wird in den Adapter eingesteckt. Durch das gute transmissive Verhalten von PMMA wird eine gute Durchschallung erreicht. Dieses Verhalten lässt sich gleich begründen wie das von POM, allerdings besitzt PMMA einen T_g von ca. 105°C . Der Verlustfaktor nimmt mit höheren Frequenzen bei Raumtemperatur ab [46]. Der US Sensor wird durch das PMMA vor Druck und Flüssigkeit geschützt. In die Ausnehmung an der linken Seite, die mit einer Durchgangsbohrung sowie einem Gewinde versehen sind, wird der Drucksensor eingeschraubt. Hierbei wurde für die Durchgangsbohrung der gleiche Durchmesser verwendet wie der, der beim Drucksensor als Messaufnehmer vorhanden ist. Dadurch wird ein möglichst kleines Totvolumen erreicht.

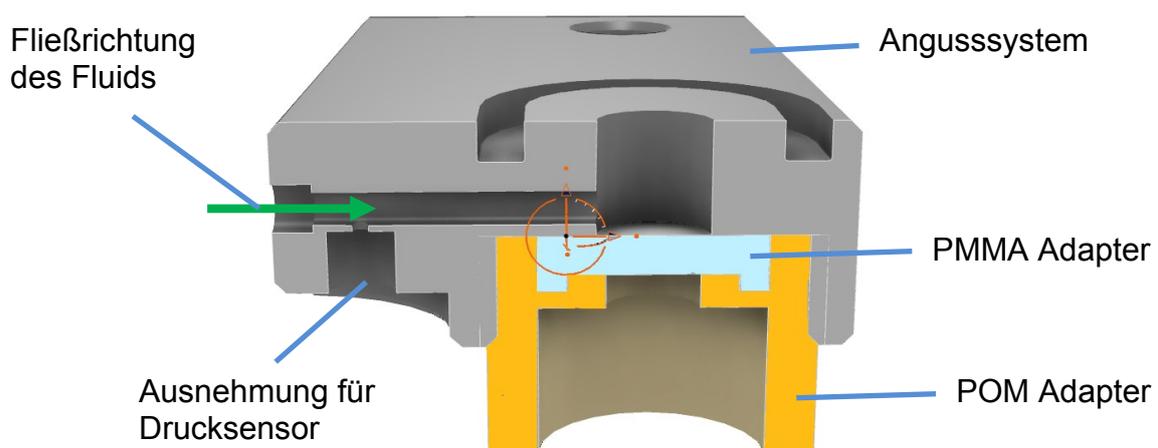


Abbildung 11: Schnitt des Angussystems mit orange dargestelltem POM und hellblau dargestelltem PMMA. Der grüne Pfeil definiert die Fließrichtung des Fluids.

Um eine ungehinderte Ausbreitung des US Signals zu gewährleisten wurde eine Flüssigkeitssäule über dem Sensor gewählt, die dem Durchmesser des US ähnelt. Dies stellt eine Änderung zur ersten Ausführung dar und gewährleistet eine höhere Schalldruckeinbringung in die Verstärkungsstruktur. Die Höhe dieser Säule wurde so gewählt, damit sich das Nahfeld des US darin ausbreiten kann und für die tatsächliche Messung das Fernfeld verwendet wird. Der Adapter, der für die Aufnahme des US Sensors im Angussystem konzipiert wurde, ist in Abbildung 12 dargestellt.

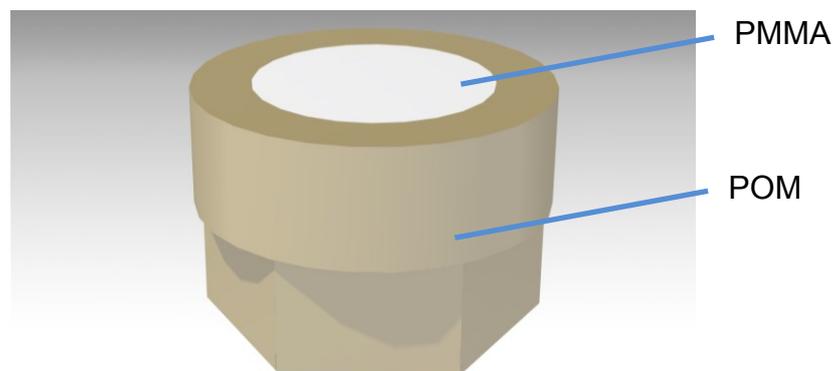


Abbildung 12: Adapter zur Aufnahme des US und zum Einschrauben in das Angussystem.

4.1.3 Grundplatte

Die Grundplatte wurde aus einem Edelstahlblock gefräst und ist in Abbildung 13 dargestellt. Um eine möglichst hohe Steifigkeit des Systems zu erreichen und zu gewährleisten, dass es bei der Messung zu keinerlei Deformationen der Kavität kommt, fiel die Ausführung äußerst massiv aus. Die Abmaße der Nestfläche wurden unter Verwendung der aus der Literatur bekannten Verhältnisse der Dickenpermeabilität zu den Permeabilitätswerten in der Ebene errechnet [18]. Dies soll dazu führen, dass die Ausbreitung des Halbellipsoides ungehindert erfolgen kann und die Flüssigkeitsfront erst nach Abschluss der Messung den Rand der Nestfläche erreicht. Der Rand der Nestfläche wurde mit einer Fräsnut abgegrenzt, an deren Ecken sich Bohrungen befinden. Dies ermöglicht das Abfließen des Fluids im Falle einer zu großen Injektionsmenge. Die Bohrungen dienen der Aufnahme von Schläuchen, die das Fluid in einen Auffangbehälter führen.

Die vier Gewindebohrungen an den Ecken dienen der Aufnahme von Gewindestangen, die zur Fixierung der Deckplatte dienen. Die großen Durchgangsboh-

rungen in der Mitte der Vorder- und Hinterseite werden verwendet um Passschrauben durchzuführen, die eine Fixierung des Angussystems ermöglichen. Die vier kleinen Gewindebohrungen dienen zur Aufnahme von Führungsstangen, die in weiterer Folge eine lineare Führung der Deckplatte gewährleisten sollen.

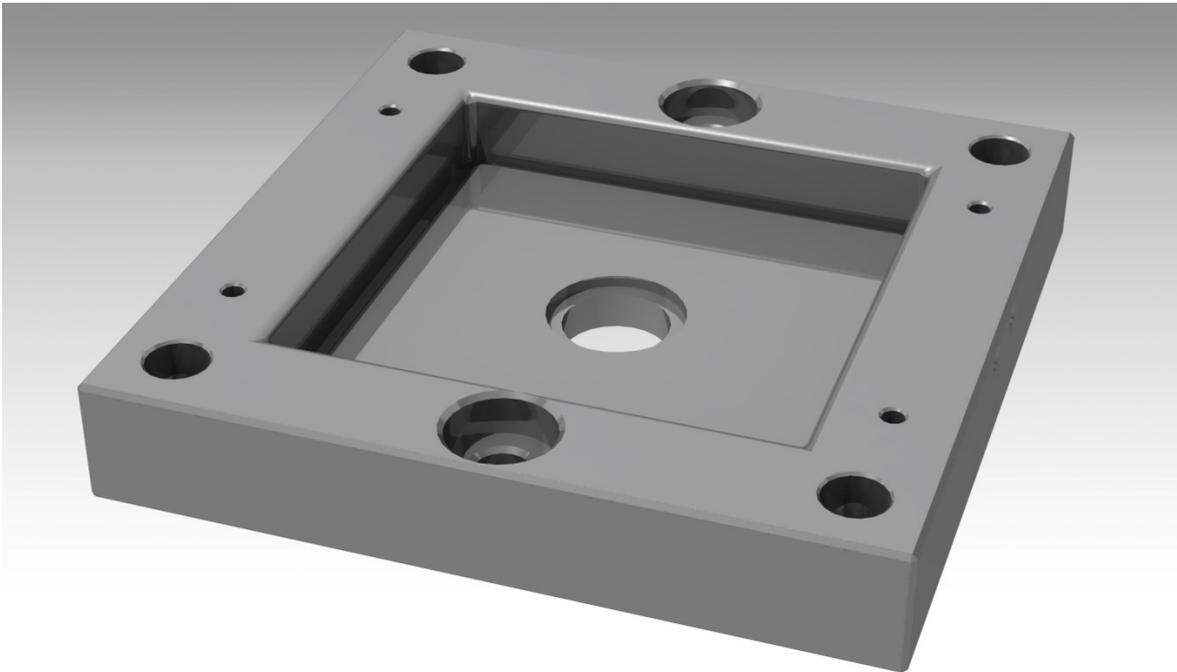


Abbildung 13: Grundplatte und Nest der Kavität des Dickenpermeameters.

Die Bohrung in der Mitte der Platte dient der Aufnahme eines Adapters aus PMMA. Der Adapter bildet den Abschluss der Flüssigkeitssäule über dem US und ist mit einer zentralen Bohrung versehen, deren Durchmesser 1,18 mm beträgt. Dieser Durchmesser wurde aufgrund der Empfehlungen von Nedanov und Advani ausgelegt [19]. Abbildung 14 zeigt diesen Adapter in einem Schnitt durch seinen Mittelpunkt.

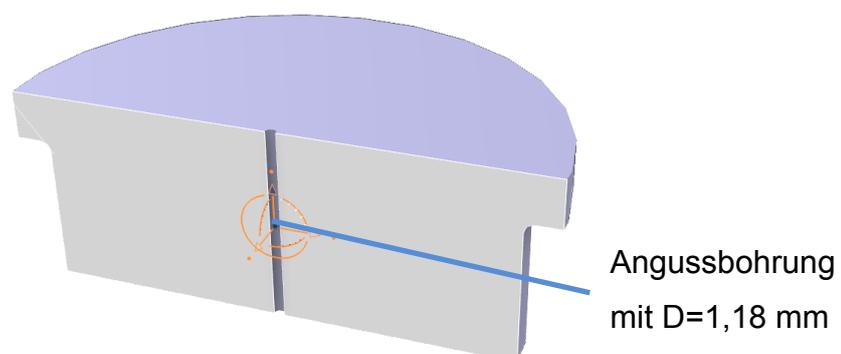


Abbildung 14: PMMA Adapter der Grundplatte mit Injektionsbohrung.

4.1.4 Deckplatte

Wie bereits schon bei der Grundplatte wurde auch bei der Deckplatte auf eine möglichst steife Bauweise geachtet. Abbildung 15 stellt die Deckplatte von unten betrachtet dar. Die vier Durchgangsbohrungen an den Ecken dienen zur Aufnahme der Gewindestangen. Die kleinen Durchgangsbohrungen auf der Vorder- bzw. Hinterseite dienen der Aufnahme der Führungsstangen. Die Gewindebohrung, die auf der Frontseite zu erkennen ist, ist auch auf der Hinterseite vorhanden und dient der Aufnahme einer Augenschraube, an der die Aktuatorik angreift. Bei der Deckplatte kommt ein ähnlicher Adapter wie beim Angussystem zur Anwendung. Dieser dient ebenfalls der Aufnahme des US Sensors und ist wiederum aus den Materialien POM und PMMA gefertigt. Der Adapter ist in der Mitte der Stempelfläche der Grundplatte zu erkennen.

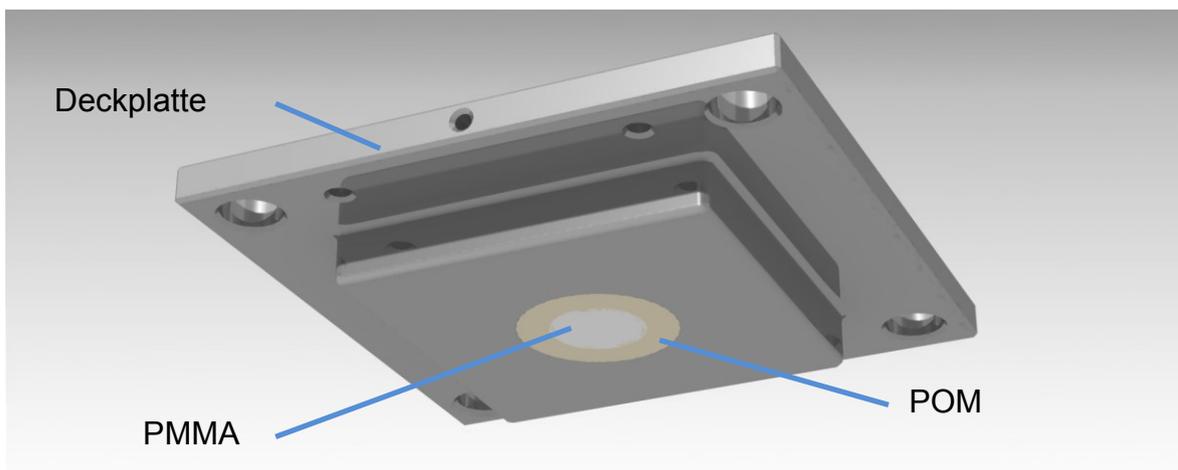


Abbildung 15: Deckplatte mit Sicht von unten. Mittig ist der Adapter für die US Aufnahme zu erkennen.

Abbildung 16 stellt den Adapter der Deckplatte in einem Schnitt durch seine Symmetrieachse dar. Der orange dargestellte Bereich wurde aus POM und der hellblaue Bereich aus PMMA gefertigt. Der Adapter wird mittels eines Gewindes in die Deckplatte eingeschraubt und schließt mit der Edelstahloberfläche eben ab. Das PMMA Teil wird ebenfalls mittels Gewinde in das POM Teil eingeschraubt.

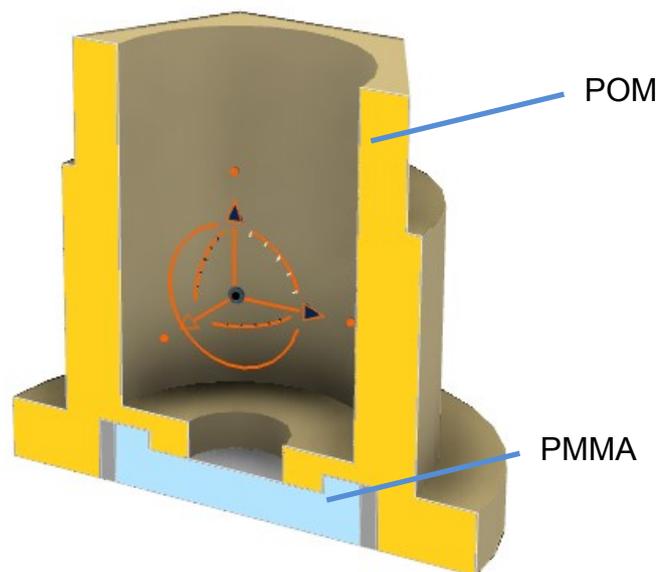


Abbildung 16: Adapter der Deckplatte mit orange dargestelltem POM und hellblau dargestelltem PMMA.

4.2 Aktuatorik

Aufgrund der massiven Bauweise wurde zur Erleichterung der Bedienung ein Mechanismus implementiert, der das automatisierte Öffnen und Schließen des Systems ermöglicht. Dieser wurde mithilfe zweier Pneumatikzylindern realisiert. Hierfür wurden, um die Arbeitssicherheit zu erhöhen, in Endstellung selbstsichernde Zylinder der Firma Festo mit der Modellbezeichnung DSBC-32-300-E2-PPVA verbaut. Die Zylinder wurden jeweils mittig auf den gegenüberliegenden Seiten des Permeameters angebracht. Um eine sanfte Bewegung der Deckplatte zu ermöglichen, wurden die Pneumatikzylinder mit Drosselventilen versehen. Die Versorgung der Zylinder mit Druckluft kann mittels eines Magnetregelventils (VUVG-L14-P53E-T-G18-1R1L) über LabView gesteuert werden.

4.3 Sensorauswahl

Der Sensorauswahl liegt das Kapitel 3.2 zugrunde. Es wurde abgewogen, welche Sensorik das bestmögliche Ergebnis bei der Messung erreichen kann. Hierfür wurde das Hauptaugenmerk auf die Messgenauigkeit, sowie die Anwendbarkeit des jeweiligen Systems auf das Messproblem gelegt.

Nach einer ausführlichen Recherche wurden zu jedem Messproblem mehrere Firmen kontaktiert und aus den angebotenen Geräten gewählt.

4.3.1 Drucksensor

Neben der Messgenauigkeit war auch die Möglichkeit der Integration des Drucksensors in das Angussystem wichtig. Dies führte schon vorab zum Ausschluss einiger Gerätevarianten. Die unter Kapitel 3.2.1 angeführten Messmethoden werden in Tabelle 2 hinsichtlich ihrer Eigenschaften und Anwendbarkeit auf das Messproblem verglichen und bewertet.

Tabelle 2: Vergleich der Druckmessmethoden [33, 35].

| Bauform | Magneto-elastisch | Kapazitiv | Piezo-elektrisch | Piezo-resistiv |
|----------------------------|-------------------|-----------|------------------|----------------|
| Statische Messung | + | + | - | ++ |
| Dynamische Messung | + | o | ++ | ++ |
| Langzeitstabilität | - | o | ++ | ++ |
| Eignung für 3D-Permeameter | + | o | + | ++ |

- Schlecht, o Mittel, + Gut, ++ Sehr Gut,

Prinzipiell ermöglichen alle Bauformen das Erreichen einer ähnlichen Messgenauigkeit. Allerdings kommt es dann zu deutlichen Preisunterschieden. Aus Tabelle 2 ist abzulesen, dass einzig das piezoresistive Messverfahren in statischer Messung, dynamischer Messung und Langzeitstabilität mit Sehr gut abschneidet. Des Weiteren führte der preisliche Vorteil der piezoresistiven Messsensoren zur Entscheidung zu deren Gunsten. In weiterer Folge wurden die Drucksensoren einiger Hersteller verglichen. Diese sind in Tabelle 3 dargestellt. Aufgrund der höchsten Messgenauigkeit wurde der Messsensor PTX5012-TA-A3-CB-H0-PB der Firma General Electrics (GE) in das Dickenpermeameter integriert.

Tabelle 3: Vergleich der Drucksensoren [47–49].

| Hersteller | Gerätebezeichnung | Messprinzip | Messbereich | Genauigkeit |
|------------|----------------------------|-----------------------------|-------------|--------------|
| Honeywell | FPG1JI,1AK,2P,5Q, 6A,9E | Piezoresistiv (Silizium) | 0-7 bar | $\pm 0,1\%$ |
| Omega | PXM419-007BAI | Piezoresistiv (Silizium) | 0-7 bar | $\pm 0,08\%$ |
| GE | PTX5012-TA-A3-CB- H0-PB | Piezoresistiv (Silizium) | 0-7 bar | $\pm 0,04\%$ |

4.3.2 Volumen- bzw. Massestromsensor

Die Messung des injizierten Volumens ist von grundlegender Wichtigkeit bei der Bestimmung der Dickenpermeabilität. Aus diesem Grund wurde bei der Bestimmung dieses Parameters das Augenmerk vor allem auf eine sehr hohe Messgenauigkeit gelegt.

Um die maximalen und minimalen Volumenströme abschätzen zu können, wurden vor der Wahl des Gerätetyps Vorversuche mit einem optischen 2D Permeameter durchgeführt [15]. Es wurden Versuche mit unterschiedlichen Faservolumengehalten und Dicken gemacht. Um die Menge des injizierten Fluids zu bestimmen, wurde die trockene und getränkte Verstärkungsstruktur gewogen. Aus der Differenz der Massen und der bekannten Dichte des Fluids wurde das injizierte Volumen errechnet. Außerdem wurden bei den Versuchen der Injektionsdruck und die Injektionszeit variiert. Durch die definierte Injektionszeit konnte ein durchschnittlicher Volumenstrom über die gesamte Injektionsdauer ermittelt werden. Das Ergebnis dieser Voruntersuchung ergab, dass sich der Volumenstrom in einem Bereich von 0,16 bis 16 Liter die Stunde bewegt. Dies ergibt ein Messbereichsverhältnis von 1:100. Das injizierte Volumen variierte dabei im Bereich von 7 bis 70 ml.

Tabelle 4 stellt die unter 3.2.2 vorgestellten Systeme gegenüber und bewertet sie nach ihrer Einsatzfähigkeit in einem Dickenpermeameter.

Tabelle 4: Gegenüberstellung der Messverfahren zur Bestimmung des Volumenstromes [31, 32].

| | Verdrängungsdurchflussmessung | Volumenstrommessung | | | | Massestrommessung |
|--|--|--|------------------------------|--|-------------------------------|---|
| | | Turbinendurchflussmesser | Schwebekörper | Wirkdruckverfahren | Ultraschall | |
| Bauform | Ovalradmesser | | | | | Coriolis |
| Messbereich | 1:20 | 1:10 1:1000 | 1:10 | 1:3 | 1:20 1:100 | 1:50 1:100 |
| Genauigkeit | ±0,5% bis ±1% | ±0,1% bis ±1% | ±2% bis ±4% | ±1% bis ±2% | ±2 bis ±5% | ±0,25% |
| Dynamikverhalten | ++ | - | - | ++ | 0 | + |
| Anmerkung | Hohe Genauigkeit, großer Bereich, Wartungsbedarf | Hohe Genauigkeit, großer Bereich, Wartungsbedarf | Direkt lesbar, robust, Labor | Druckverlust, begrenzter Bereich, Wartungsbedarf | Robust, großer Bereich, teuer | Hohe Genauigkeit, großer Bereich, teuer |
| Eignung für 3D-Permeameter | + | + | - | -- | 0 | ++ |
| <p>-- Sehr Schlecht, - Schlecht, 0 Mittel, + Gut, ++ Sehr Gut,</p> | | | | | | |

Weiters ist in Tabelle 4 zu erkennen, dass das Coriolismessverfahren besonders in dem für wichtig befundenen Punkt Messgenauigkeit punkten kann. Auch der Messbereich kann zur Gänze abgedeckt werden. Das Dynamikverhalten, das bei einer Injektion auftritt, führt bei diesem Messverfahren zu keinen Problemen.

Aufgrund der in Tabelle 4 dargelegten Entscheidungsfindung wurden Angebote für die Gut und Sehr Gut geeigneten Messgeräte eingeholt. Diese sind in Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5: Vergleich von Gut und Sehr Gut geeigneten Durchflussmesssensoren [50–52].

| Hersteller | Gerätebezeichnung | Messprinzip | Messbereich | Genauigkeit |
|------------|------------------------|-------------|--------------|---|
| Digma | EPI # 930-0201/V01 | Ovalrad | 3,9-321 l/h | Auflösung 2,1 ml Genauigkeit: ±1% |
| Sonotec | SONOFLOW IL.52/3 | Ultraschall | 0-180 l/h | Nullpunktstabilität: ±22,5 ml/h Genauigkeit: ±1% |
| Bronkhorst | mini CORI-FLOW™ M15 | Coriolis | 0,2-300 kg/h | Nullpunktstabilität: ±50 g/h Genauigkeit: ±0,2% |

Wie bereits aus Tabelle 4 zu erwarten war, stellte sich das Coriolis-Messgerät als bestmögliche Wahl heraus. Folglich wurde das mini CORI-FLOW™ M15 der Firma Bronkhorst in das Dickenpermeameter integriert. Ein weiterer Vorteil des Coriolis Messverfahrens ist, dass eine gleichzeitige Ermittlung der Dichte des Fluids möglich ist. Dies ermöglicht die genaue Bestimmung des injizierten Volumens zu jeder Zeit. Des Weiteren wurde das Gerät als Volumenstromregler ausgeführt. Dies ermöglicht die Durchführung von druckbasierten als auch volumenstrombasierten Messungen.

4.3.3 Detektion der Fließfront

Von den drei zu bestimmenden Parameter ist die Detektion der Fließfront wohl der mit dem höchsten technischen Aufwand verbundene. Grund hierfür ist hauptsächlich, dass die hierfür benötigten Messverfahren noch nicht als Komplettsysteme kommerziell erhältlich sind. Um den Entscheidungsfindungsprozess zu dokumentieren stellt Tabelle 6 die in Kapitel 3.2.3 vorgestellten Verfahren gegenüber und bewertet diese. Für die Fließfrontdetektion wurde ein Verfahren angestrebt, welches eine Messung ermöglicht, das die Struktur des Fasermaterials nicht verändert. Dadurch fiel eine Vielzahl der in Tabelle 6 angeführten Verfahren weg. Des Weiteren schienen zwei Messpunkte über die Dicke, wie man es bei einer Messung mittels Videokamera erhält, zu ungenau. Aufgrund des gesundheitlichen Risikos und der enorm hohen Anschaffungskosten wurde die Röntgenspektroskopie nicht in Betracht gezogen. Somit blieb als einziges Verfahren die Ultraschallmessung übrig.

Um möglichst hohe Kavitätenhöhen zu erreichen ist es notwendig, den Laufweg des Ultraschalls in der Verstärkungsstruktur möglichst kurz zu halten. Dies lässt das Puls-Echo-Verfahren ausscheiden. Somit wurde ein System, das auf die Durchschallung der Verstärkungsstruktur setzt, gewählt.

Nach der Kontaktaufnahme mit mehreren Firmen stellte sich heraus, dass sich einzig die Firma Olympus dazu in der Lage sah eine passende Messsensorik anzubieten.

Tabelle 6: Gegenüberstellung der Messverfahren zur Detektion der Fließfront [18, 30].

| Messprinzip | Gleichstrom | | Faseroptisch | | Visuell | Röntgen | Ultraschall | |
|---|-------------|--------------|--------------|------------|-------------|---------|-------------|----------------|
| | LDC | Smart Weave™ | EFPI | Evaneszent | | | Puls Echo | Durchschallung |
| Integration in Verstärkungsstruktur | Ja | Ja | Ja | Ja | Nein | Nein | Nein | Nein |
| Integration in Form | Nein | Nein | Nein | Nein | Nein (Glas) | Nein | Ja | Ja |
| Auflösung | + | LZ | LZ | LZ | -- | ++ | + | ++ |
| Reproduzierbarkeit | 0 | - | - | - | 0 | ++ | + | ++ |
| Anwendbarkeit für 3D-Permeameter | 0 | - | - | - | - | ++ | - | ++ |
| <div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> -- Sehr Schlecht, - Schlecht, 0 Mittel, + Gut, ++ Sehr Gut, </div> | | | | | | | | |

Durch die große Anzahl der verfügbaren Sensoren musste der passende durch Berechnungen und Dimensionierungsüberlegungen ausgewählt werden. Hierfür war es wichtig die Besonderheiten des US Verlaufes der einzelnen Sender zu kennen, um mittels Gleichung 25 den Brennpunkt des US Strahles zu bestimmen [53–55]. Hierbei definiert D den Durchmesser der US-Prüfkopfes, f seine Frequenz und c die Schallgeschwindigkeit im durchschallten Medium.

$$N = \frac{D^2 \cdot f}{4c} \quad (25)$$

N gibt den Abstand des Brennpunktes vom Sender an. Dieser gilt als Übergang vom Nahfeld in das Fernfeld des US Strahls und wird in ABBILDUNG XX dargestellt. Der Brennpunkt wurde so gewählt, dass er sich im PMMA Adapter der Grundplatte befindet. Die Messung findet somit ausschließlich im Fernfeld des US-Strahles statt.

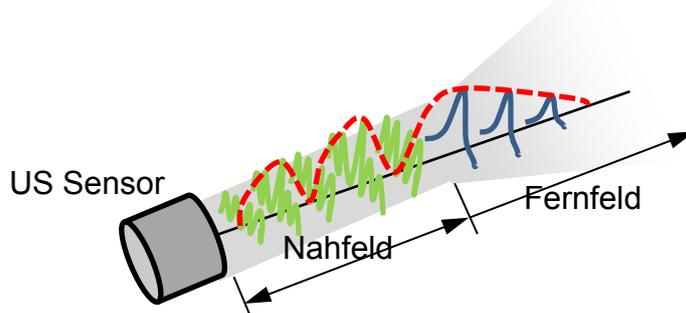


Abbildung 17: Nahfeld und Fernfeld des US.

Um einen möglichst hohen Schalldruck zu erreichen wurde der Sensor C539-SM ausgewählt. Die von ihm ausgesendeten Schallwellen haben eine Frequenz von 1Mhz, wodurch sie auch poröses Material durchschallen können. Der Sensor wurde zweimal verbaut und fungiert einerseits als Sender und andererseits als Empfänger für das US Signal.

Zur Generierung, Detektion und Anzeige des Ultraschallimpulses wurde das EP1000-B-EID-S Prüfgerät ausgewählt. Es hebt sich vor allem durch eine hohe Leistung des Ausganges und Empfindlichkeit des Einganges aus. Des Weiteren besitzt das Gerät eine Vielzahl an Filtern, mit denen ein Großteil des Rauschens aus dem Signal gefiltert werden kann. Über einen analogen Ausgang wird die Funktion der gemessenen Durchschallungszeit an eine LabView Applikation übergeben und kann dort weiter ausgewertet werden [56].

Um die Leistung des Ausgangs noch einmal zu erhöhen und somit den maximalen Schalldruck zu erreichen wurde ein Vorverstärker des Typs 5660B gewählt. Er ermöglicht eine Verstärkung von 40 bzw. 60 dB [57].

Eine weitere Besonderheit des US Messsystems ist, dass es komplett ohne externe Stromversorgung betrieben werden kann. Dies schließt Probleme, die durch die Schwankung der Stromversorgung impliziert werden, können aus.

Die Eckdaten dieses Ultraschallmesssystems sind in Tabelle 7 zusammengefasst.

Tabelle 7: Ultraschall Sensorsystem [56–58].

| Bauteil | Gerätebezeichnung | Verstärkung | Frequenz |
|----------------------|--------------------------|--------------------|-----------------|
| Prüfkopf | C539-SM | - | 1 MHz |
| Prüfgerät | EP1000-B-EID-S | 0-110 dB | 5-6000Hz |
| Vorverstärker | 5660B | 40 dB, 60 dB | 0,2-2 MHz |

4.4 Gesamtsystem 3D Permeameter

Werden die zuvor erläuterten Teile, die Gewinde- und Führungsstangen, sowie die Aktuatorik und Sensorik zusammengesetzt, ergibt sich das Permeameter als Ganzes. Dieses ist in Abbildung 18 dargestellt. Hierbei werden Aluminiumbauteile in silber, Edelstahlbauteile in dunkelgrau, sonstige Stahlbauteile in hellgrau, die POM-Adapter gelblich, die Aktuatorik in blau und die Sensorik rötlich dargestellt.

Zwischen Grund- und Deckplatte sind an den Ecken vier Distanzhülsen angebracht, die in ihrer Dicke variiert werden können. Dies ermöglicht die Einstellung der Kavitätenhöhe.

Um einen Kompaktierungsdruck von 2 kPa sichern zu können, müssen die Muttern an den Seiten mit einem Drehmoment von 30 Nm angezogen werden. Dieser Wert wurde gewählt, da bei den meisten Verstärkungsmaterialien ab diesem Punkt eine lineare Abnahme der Permeabilität mit der Zunahme des Kompaktierungsdrucks zu erwarten ist [59]. Hiermit können gleichbleibende Bedingungen bei jedem Versuch gewährleistet werden.

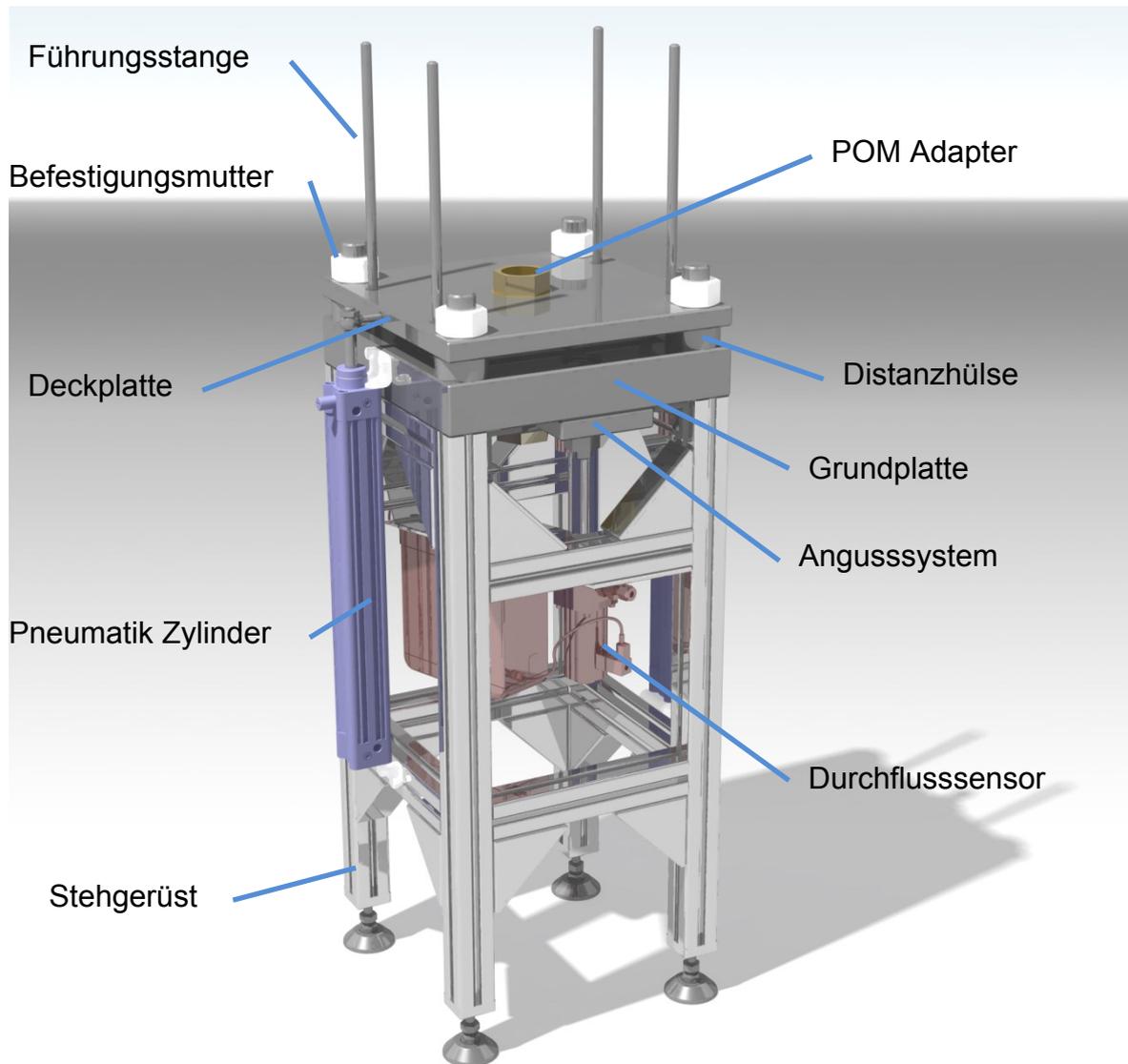


Abbildung 18: Gesamtsystem des Dickenpermeameters. In der Abbildung werden Aluminiumbauteile silber, Edelstahlbauteile dunkelgrau, andere Stahlteile in hellgrau, die POM Adapter gelblich, die Aktuatorik blau und die Sensorik rötlich dargestellt.

In Abbildung 19 wird ein Schnitt entlang der Symmetrieachse des Systems dargestellt. Hierbei wird ausschließlich auf den für die Messung relevanten Teil des Permeameters eingegangen. Rot hervorgehoben werden die Messsensoren dargestellt. Die grünen Pfeile stellen den Fließweg des Fluids dar. Die zur Fertigung der Adapter verwendeten Kunststoffe wurden in den Farben Gelb (POM) und Hellblau (PMMA) dargestellt.

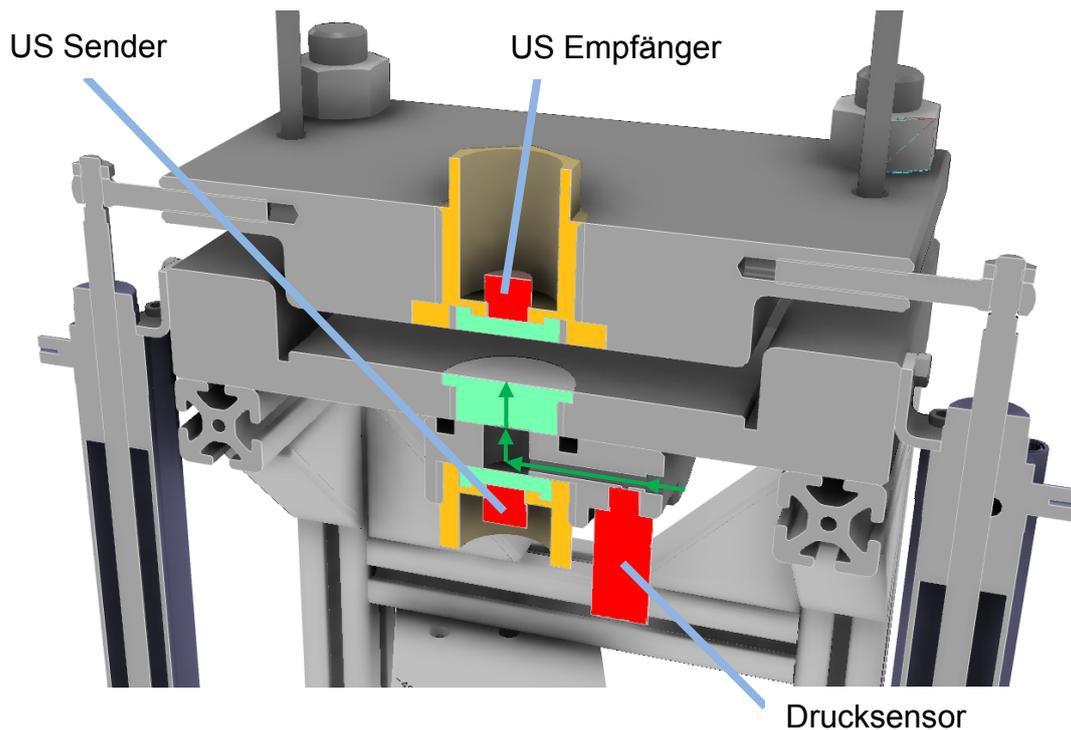


Abbildung 19: Schnitt durch die Symmetrieachse des Permeameters. Rot dargestellte Sensorik, hellblau dargestelltes PMMA und gelb hervorgehobenes POM. Die grünen Pfeile markieren den Fließweg des Fluids.

4.5 Inbetriebnahme

Um die Funktionstüchtigkeit des 3D Permeameters festzustellen, wurden Messungen durchgeführt. Diese Messungen dienten rein der Überprüfung der einwandfreien Funktion aller Bauteile, Aktuatoren und Sensoren. Die daraus errechneten Permeabilitätskennwerte fungieren nicht als Referenz, sondern dienen nur der Einschätzung, ob die Ergebnisse im Bereich der zu erwartenden Werte liegen.

Abbildung 20 stellt eine Fotografie des geöffneten 3D Permeameters mit eingelegter Verstärkungsstruktur dar.

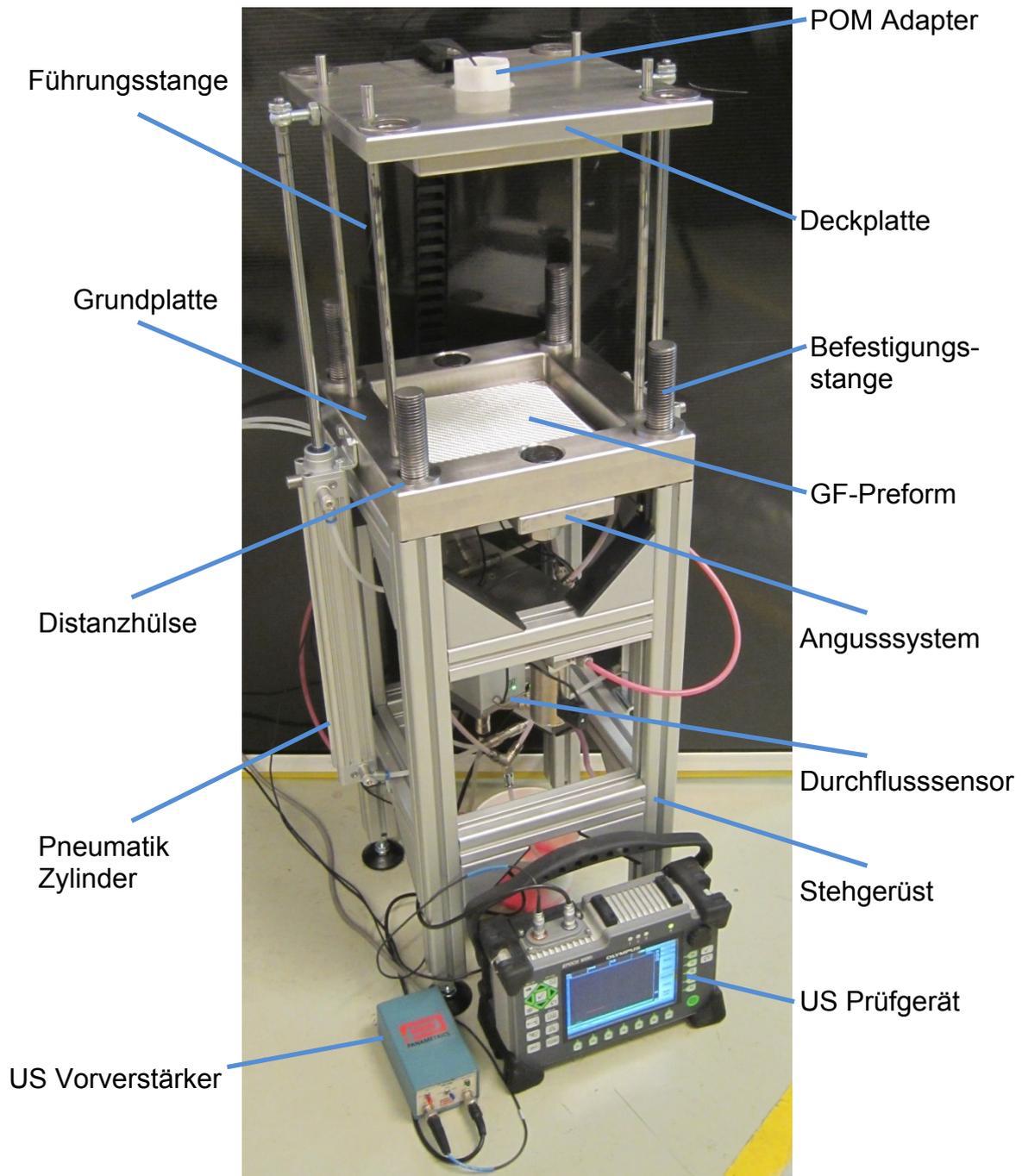
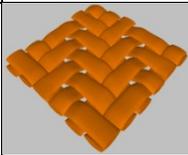


Abbildung 20: Fotografie des geöffneten 3D Permeameters mit eingelegter Verstärkungsstruktur.

Für die Messungen wurde ein Glasfasergewebe (GF-Gewebe) verwendet, welches mithilfe eines Cutters auf eine Größe von 180x180 mm vorkonfektioniert wurde. Um eine gleichbleibende Orientierung der Lagen zu garantieren, wurde ein Eck abgeschrägt zugeschnitten.

In Tabelle 8 werden die Daten des untersuchten Materials zusammengefasst.

Tabelle 8: Materialdaten des untersuchten GF-Gewebes.

| Bezeichnung | Material | Webart | Filamentanzahl | Flächengewicht | Abbildung |
|--------------|-------------------------------------|-----------|----------------|----------------------|---|
| Vitrex TR291 | Glasfaser (2,55 g/cm ³) | 2/2 Köper | 300/300 tex | 296 g/m ² |  |

Für die Messungen wurde eine Preform aus 25 Lagen GF-Gewebe in das 3D Permeameter eingelegt. Dies ergibt bei einer eingestellten Kavitätenhöhe von 5 mm einen Faservolumengehalt von 56,15%. Für die Messung wurde ein Sonnenblumenöl als Fluid benutzt. Dieses wurde mit einem konstant gehaltenen Druck von 1 bar injiziert. Abbildungen 21 bis 23 zeigen die von den Sensoren aufgezeichneten Werte, Druck, Fließfrontheöhe über dem Anguss und injiziertes Volumen, über der Zeit einer ausgewählten Messung.

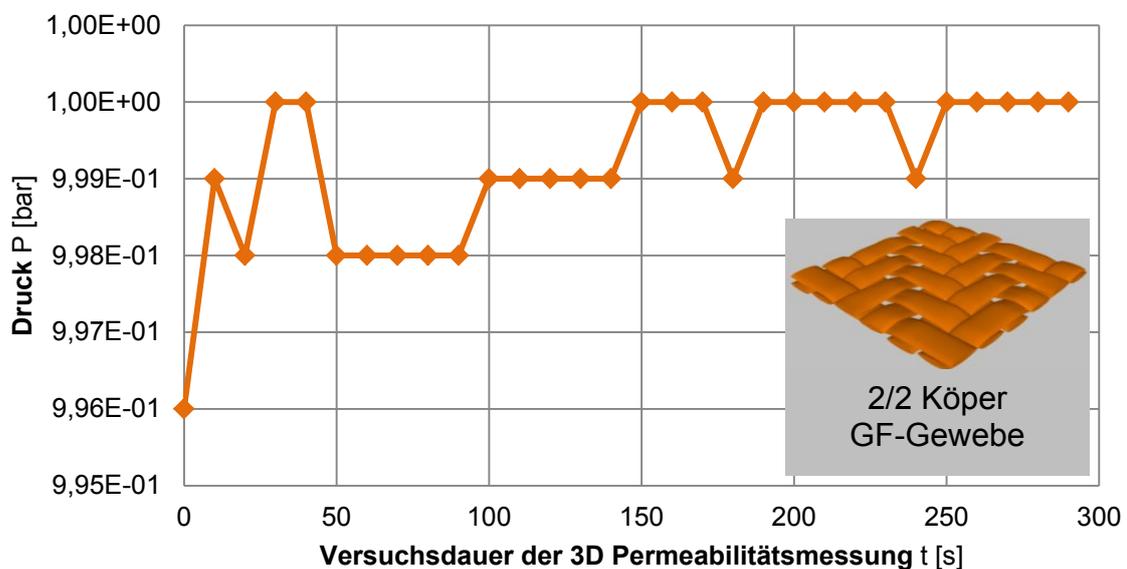


Abbildung 21: Injektionsdruck über der Versuchsdauer der 3D Permeabilitätsmessung.

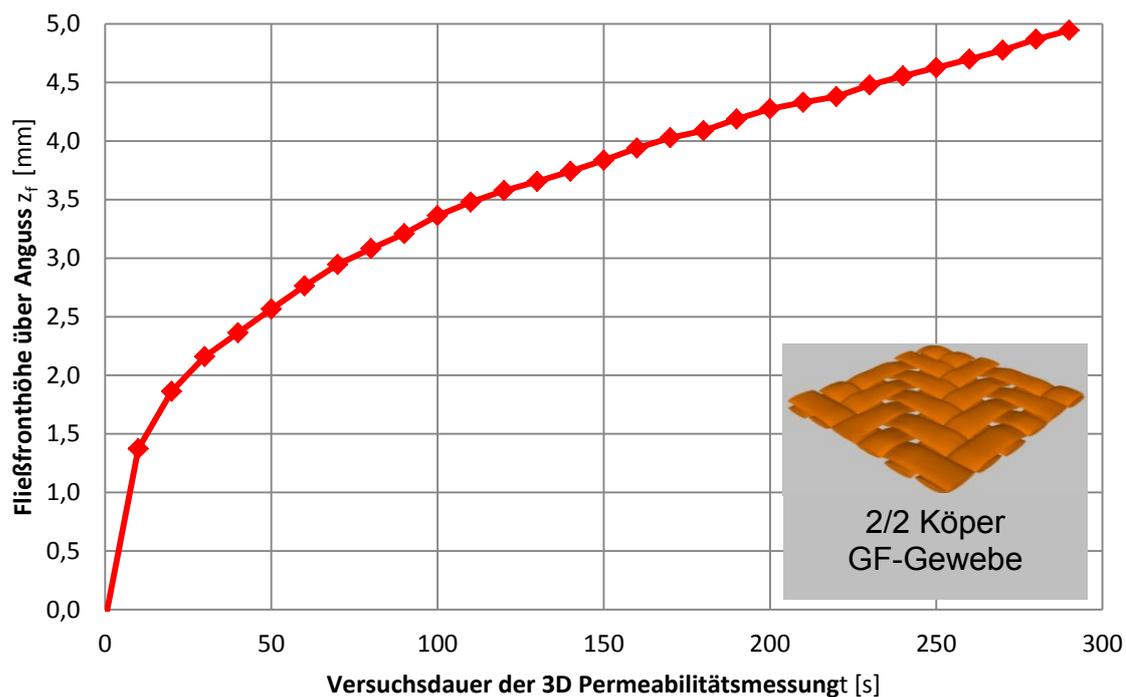


Abbildung 22: Fließfronthe über dem Anguss über der Versuchsdauer der 3D Permeabilitätsmessung.

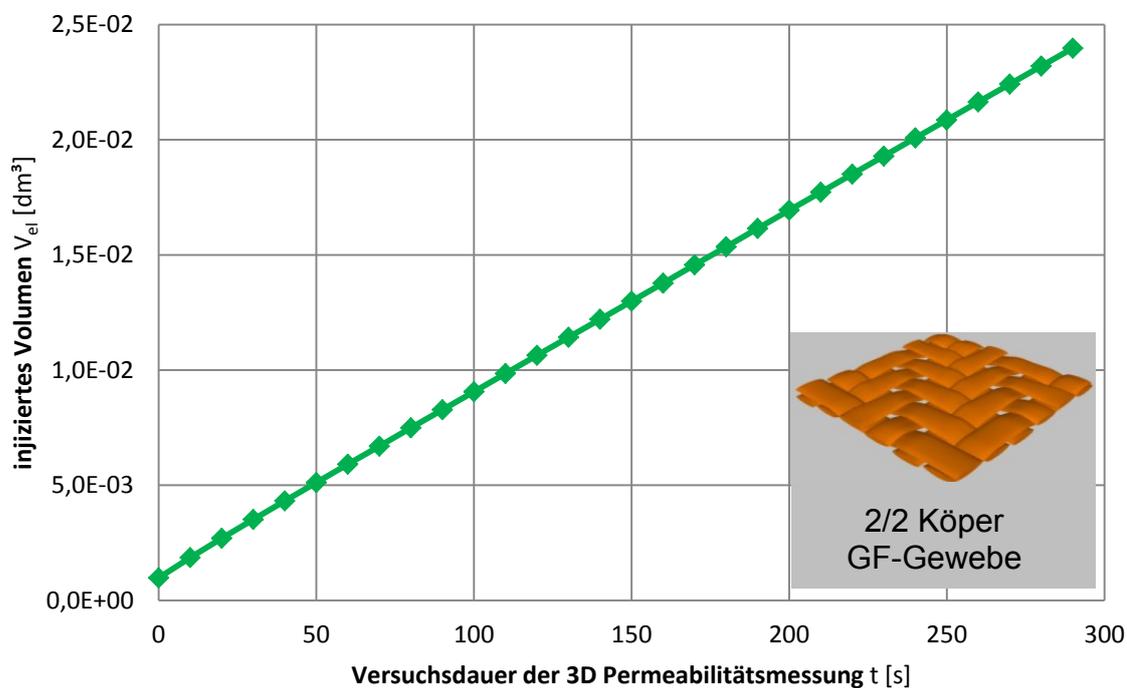


Abbildung 23: Injiziertes Volumen über der Versuchsdauer der 3D Permeabilitätsmessung.

Berechnet man aus diesen gemessenen Werten die Dickenpermeabilität über die Zeit, so erhält man den in Abbildung 24 dargestellten Verlauf.

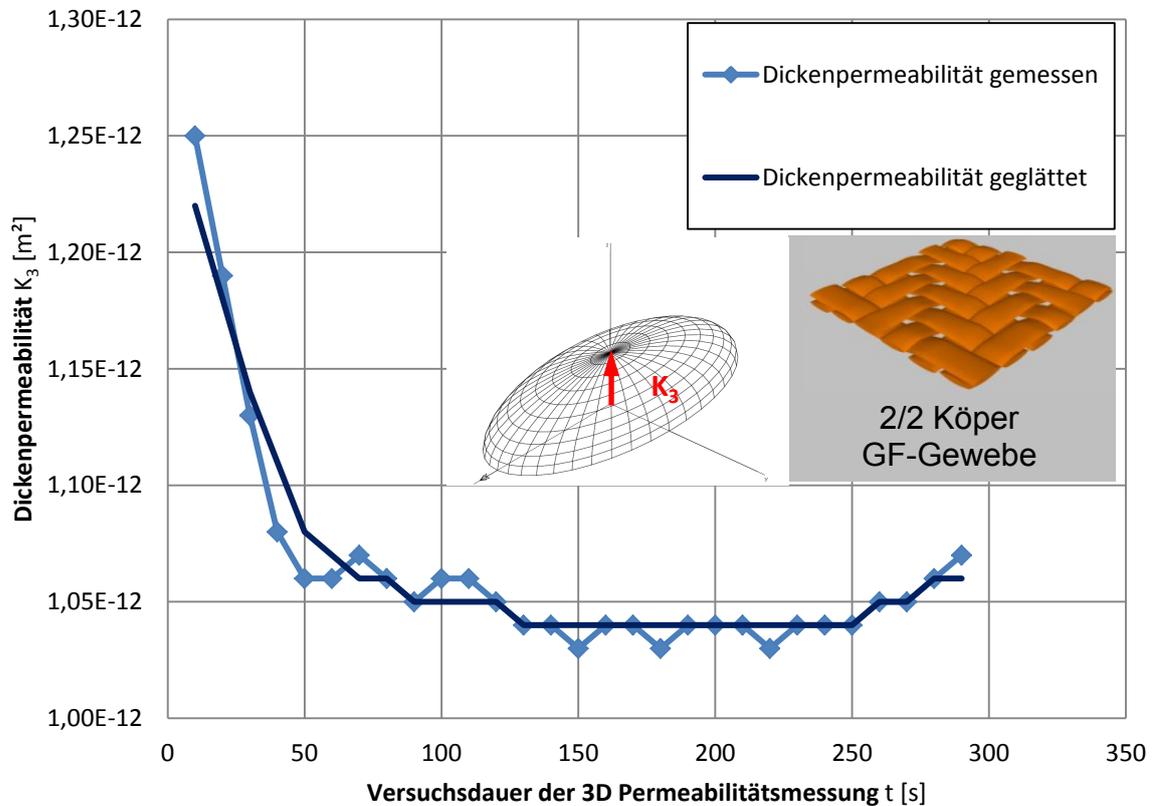


Abbildung 24: Gemessene und geglättete Dickenpermeabilität über der Versuchsdauer der 3D Permeabilitätsmessung.

Somit ergibt sich im Messbereich von 130 bis 250 Sekunden eine Dickenpermeabilität von konstanten $1,04 \times 10^{-12} \text{ m}^2$. Vergleicht man diese mit ähnlichen Messungen aus der Literatur befindet man sich im gleichen Wertebereich von 10^{-12} m^2 [18].

5 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurden der Entscheidungsfindungs- sowie der Konstruktionsprozess eines 3D Permeameters beschrieben. Hierfür wurde die dazu verfügbare Literatur durchleuchtet und in weiterer Folge ein Konzept zur Fertigung eines solchen Permeameters entworfen.

Um bestmögliche Ergebnisse zu erhalten, wurde gezeigt, wie unterschiedliche Werkstoffe durch ihr spezifisches Materialverhalten zu einer idealen Systemperformance des 3D Permeameters führen können.

Durch den Vergleich unterschiedlichster Sensorsysteme und Messmethoden wurde eine bestmögliche Bestimmung aller zur Berechnung der Dickenpermeabilität notwendigen Größen ermöglicht. Tabelle 9 listet die integrierte Messsensorik auf.

Tabelle 9: Zusammenfassung der integrierten Messsensorik.

| Sensortyp | Messprinzip | Hersteller | Bezeichnung |
|-------------------------|---------------------|-------------------|------------------------|
| Drucksensor | Piezoresistiv | GE | PTX5012-TA-A3-CB-H0-PB |
| Durchflusssensor | Corioliskraft | Bronkhorst | mini CORI-FLOW™ M15 |
| Fließfrontsensor | Ultraschallprüfkopf | Olympus | C539-SM |
| US Prüfgerät | Ultraschall | Olympus | EP1000-B-EID-S |
| US Vorverstärker | Ultraschall | Olympus | 5660B |

Nach dem konstruktiven Designprozess mittels CAD wurden die zur Fertigung benötigten Bauteile bestellt und in weiterer Folge der Prüfstand zusammengesetzt.

Um die Funktionsfähigkeit des 3D Permeameters festzustellen wurden Messungen durchgeführt. Diese ergaben Dickenpermeabilitätskennwerte, die sich im Bereich der zu erwartenden Werte befanden.

6 Literatur

- [1] Arbter, R., Beraud, J. M., Binetruy, C., Bizet, L., Bréard, J., Comas-Cardona, S., Demaria, C., Endruweit, A., Ermanni, P., Gommer, F., Hasanovic, S., Henrat, P., Klunker, F., Laine, B., Lavanchy, S., Lomov, S. V., Long, A., Michaud, V., Morren, G., Ruiz, E., Sol, H., Trochu, F., Verleye, B., Wietgreffe, M., Wu, W., Ziegmann, G.: Experimental determination of the permeability of textiles: A benchmark exercise, *Composites Part A*, 42, 2011, S. 1157–1168.
- [2] Vernet, N., Ruiz, E., Advani, S., Alms, J. B., Aubert, M., Barburski, M., Barari, B., Beraud, J. M., Berg, D. C., Correia, N., Danzi, M., Delavière, T., Dickert, M., Di Fratta, C., Endruweit, A., Ermanni, P., Francucci, G., Garcia, J. A., George, A., Hahn, C., Klunker, F., Lomov, S. V., Long, A., Louis, B., Maldonado, J., Meier, R., Michaud, V., Perrin, H., Pillai, K., Rodriguez, E., Trochu, F., Verheyden, S., Wietgreffe, M., Xiong, W., Zaremba, S., Ziegmann, G.: Experimental determination of the permeability of engineering textiles: Benchmark II, *Special Issue: Flow Processes in Composite Materials*, 61, 2014, S. 172–184.
- [3] Grössing, H., Becker, D., Kaufmann, S., Schledjewski, R., Mitschang, P.: An Evaluation of the Reproducibility of Capacitive Sensor Based In-Plane Permeability Measurements: A Benchmarking Study, *eXPRESS Polymer Letters*, 9 (2), 2015, S. 129–142.
- [4] Darcy, H.: *Les Fontaines publiques de la ville de Dijon*; Victor Dalmont, Paris, 1856.
- [5] Ritzi, R. W., Bobeck, P.: Comprehensive principles of quantitative hydrogeology established by Darcy (1856) and Dupuit (1857), *Water Resources Research*, 44, 2008.
- [6] Neitzel, M.: *Handbuch Verbundwerkstoffe: Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung*; Hanser, München, 2014.

- [7] Weitzenböck, J. R., Shenoj, R. A., Wilson, P. A.: Measurement of principal permeability with the channel flow experiment, *Polymer Composites*, 20, 1999, S. 321–335.
- [8] Scholz, S., Gillespie Jr. , John W., Heider, D.: Measurement of transverse permeability using gaseous and liquid flow, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38, 2007, S. 2034–2040.
- [9] Shenoj, R. A., Wu, X., Li, J.: A New Method to Determine Fiber Transverse Permeability, *Journal of Composite Materials*, 41, 2007, S. 747–756.
- [10] Buntain, M. J., Bickerton, S.: Compression flow permeability measurement: a continuous technique, *Composites Part A*, 34, 2003, S. 445–457.
- [11] Liu, Q., Parnas, R. S., Giffard, H. S.: New set-up for in-plane permeability measurement, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38, 2007, S. 954–962.
- [12] Grössing, H., Kaufmann, S., Schledjewski, R.: Continuous on-line analysis of the matrix flow through manipulated RTM preforms compared to numerical filling simulations, *Proceedings SAMPE Tech US 2014*, 2014.
- [13] Comas-Cardona, S., Cosson, B., Bickerton, S., Binetruy, C.: An optically-based inverse method to measure in-plane permeability fields of fibrous reinforcements, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 57, 2014, S. 41–48.
- [14] Lundström, T. S., Stenberg R., Bergström R., Partanen H., Birkeland P.A.: In-plane permeability measurements: a nordic round-robin study, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 31, 2000, S. 29–43.
- [15] Grössing, H., Fauster, E., Schledjewski, R.: Accurate 2D permeability measurement: Optical permeability characterisation, *SAMPE Tech Europe – Novel aspects in composite technologies*.
- [16] Weitzenböck, J. R., Shenoj, R. A., Wilson, P. A.: Radial flow permeability measurement. Part A: Theory, *Composites Part A*, 30, 1999, S. 781–796.

- [17] Adams K.L., Russel W.B., Rebenfeld L.: Radial penetration of a viscous liquid into a planar anisotropic porous medium, *International Journal of Multiphase Flow*, 14, 1988, S. 203–215.
- [18] Stöven, T.: Beitrag zur Ermittlung der Permeabilität von flächigen Faserhalbzügen, Dissertation an der Technische Universität Kaiserslautern, 2004.
- [19] Nedanov, P. B., Advani, S. G.: A method to determine 3D permeability of fibrous reinforcements, *Journal of Composite Materials*, 36, 2002, S. 241–254.
- [20] Weitzenböck, J. R., Shenoi, R. A., Wilson, P. A.: Measurement of three-dimensional permeability, *Composites Part A*, 29A, 1998, S. 159–169.
- [21] Jaganathan, S., Vahedi Tafreshi, H., Pourdeyhimi, B.: A realistic approach for modeling permeability of fibrous media: 3-D imaging coupled with CFD simulation, *Chemical Engineering Science*, 63, 2008, S. 244–252.
- [22] Song, Y. S., Youn, J. R.: Asymptotic expansion homogenization of permeability tensor for plain woven fabrics, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 37, 2006, S. 2080–2087.
- [23] Turner, D. Z., Hjelmstad, K. D.: Determining the 3D permeability of fibrous media using the Newton method, *Composites Part B: Engineering*, 36, 2005, S. 609–618.
- [24] Chen, Z., Ye, L., Liu, H.: Effective permeabilities of multilayer fabric preforms in liquid composite moulding, *Composite Structures*, 66, 2004, S. 351–357.
- [25] Meng Lu, Lin Ye, Chen, Z.-R.: Permeability Predictions for Woven Fabric Preforms, *Journal of Composite Materials*, 13, 2010, S. 1569–1586.
- [26] Morren, G., Bottiglieri, M., Bossuyt, S., Sol, H., Lecompte, D., Verleye, B., Lomov, S. V.: A reference specimen for permeability measurements of fibrous reinforcements for RTM, *Composites Part A*, 40, 2009, S. 244–250.
- [27] Ahn, S. H., Lee, W. I., Springer, G. S.: Measurement of the three-dimensional permeability of fiber preforms using embedded fiber optic sensors, *Journal of Composite Materials*, 29, 1995, S. 714–733.

- [28] Bréard, J., Saouab, A., Bouquet, G.: Dependence of the reinforcement anisotropy on a three dimensional resin flow observed by X-ray radioscopy, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 18, 1999, S. 814–826.
- [29] Stöven, T., Weyrauch, F., Mitschang, P., Neitzel, M.: Continuous monitoring of three-dimensional resin flow through a fibre preform, *Composites Part A*, 34, 2003, S. 475–480.
- [30] Luthy, T.: Three-dimensional permeability measurements based on direct current and ultrasound monitoring techniques, Dissertation an der Swiss Federal Institute of Technology Zurich.
- [31] Hesse, S., Schnell, G.: Sensoren zur Erfassung fluidischer Größen, In: Hesse S., Schnell G. (Hrsg.), *Sensoren für die Prozess- und Fabrikautomation*, 2012.
- [32] Isermann, R.: Sensoren, In: Isermann, R. (Hrsg.), *Mechatronische Systeme*, Berlin, Heidelberg, 2008.
- [33] Hering, E., Schönfelder, G.: *Sensoren in Wissenschaft und Technik*; Vieweg+Teubner Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Dordrecht, 2012.
- [34] Gebhardt, N.: *Messtechnik in der Hydraulik*, Messtechnik in der Hydraulik, Berlin, Heidelberg, 2008.
- [35] Gassmann, E., Gries, A.: *Elektronische Druckmesstechnik*; Verl. Moderne Industrie, Landsberg/Lech, 2009.
- [36] Dezhi Zheng, Shuai Wang, Shangchun Fan: Nonlinear Vibration Characteristics of Coriolis Mass Flowmeter, *Chinese Journal of Aeronautics*, 22, 2009, S. 198–205.
- [37] Bronkhorst Cori-Tec: mini Cori-Flow, Kompakte Coriolis-Massedurchflussmesser & -regler für Flüssigkeiten und Gase, Datenblatt, 2014 (abgerufen am 19. November 2014).

- [38] Luthy, T., Ermanni, P.: Flow monitoring in liquid composite molding based on linear direct current sensing technique, *Polymer Composites*, 2, 2003, S. 249–262.
- [39] Antonucci V., Giordano M., Nicolais L., Calabrò A., Cusano A., Cutolo A., Inserra S.: Resin flow monitoring in resin film infusion process, *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, S. 687–692.
- [40] Dunkers, J. P., Lenhart, J. L., Kueh, S. R., van Zanten, J. H., Advani, S. G., Parnas, R. S.: Fiber optic flow and cure sensing for liquid composite molding, *Optics and Lasers in Engineering (UK)*, 35, 2001, S. 91–104.
- [41] Giordano, M., Nicolais, L., Calabrò, A. M., Cantoni, S., Cusano, A., Breglio, G., Cutolo, A.: A fiber optic thermoset cure monitoring sensor, *Polymer Composites*, 21, 2000, S. 523–530.
- [42] Kim, S. K., Daniel, I. M.: Determination of three-dimensional permeability of fiber preforms by the inverse parameter estimation technique, *Composites Part A*, 34, 2003, S. 421–429.
- [43] Mekic, S., Bakke, B.: Radial infusion models for permeability measurements of compressed fibrous beds, *International Journal of Multiphase Flow*, 48, 2013, S. 1–10.
- [44] Psarras, G. C., Siengchin, S., Karahaliou, P. K., Georga, S. N., Krontiras, C. A., Karger-Kocsis, J.: Dielectric relaxation phenomena and dynamics in polyoxymethylene/polyurethane/alumina hybrid nanocomposites, *Polymer International*, 12, 2011, S. 1715–1721.
- [45] Flexman, E., Sauer, B., Keating, M.: Dynamic mechanical characterization of relaxations in poly(oxymethylene), miscible blends, and oriented filaments, *Journal of Macromolecular Science, Part B*, 36, 1997, S. 717–732.
- [46] Simões, Guedes, Gomes, M.: DMTA analysis for long-term mechanical behaviour prediction of PMMA-based bone cements, *Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition*, 17, 2006, S. 1173.
- [47] Honeywell: Model FP2000, Configurable Pressure Transducer, Datenblatt, USA-MN 55422 Golden Valley, 2011.

- [48] Omega: PXM409, PXM419, PXM459, Drucktransmitter/Druckaufnehmer mit hoher Genauigkeit, Datenblatt, 2014.
- [49] GE Measurement & Control Solutions: UNIK 5000, Drucksensorplattform, Datenblatt, 2011.
- [50] Digimesa AG: EPI_930-0201V01_D.indd, EPI PEEK, Datenblatt, CH-2563 Ipsach.
- [51] Bronkhorst Cori-Tec: mini CORI-FLOW M15, Kompakte Coriolis- Masse- durchflussmesser & -regler für Flüssigkeiten, Datenblatt, NL-7261AK Ruurlo, 2014.
- [52] SONOTEC Ultraschallsensorik Halle GmbH: SONOFLOWvIL.52 - Durch- flussensor, Technisches Datenblatt, D-06112 Halle (Saale), 2013.
- [53] Olympus NDT INC.: Ultrasonic Transducers, Technical Notes, USA-MA 02453, 2011.
- [54] Olympus NDT INC.: Ultraschall, URL: <http://www.olympus-ims.com/de/ndt-tutorials/flaw-detection/ultrasound/> (abgerufen am 24. November 2014).
- [55] Fowler, K. A.; Hotchkiss, F. H. C.; Yamartino, T. V.; Nelligan, T.: Important Characteristics of Sound Fields of Ultrasonic Transducers, Olympus NDT INC. ,USA-MA 02453, 2012.
- [56] Olympus NDT INC.: Ultraschallprüfgerät, Serie EPOCH 1000, Datenblatt, DE- 20097 Hamburg, 2011.
- [57] Olympus NDT INC.: Ultrasonic Preamplifiers, Models 5660B, 5660c, 5662, 5670, 5676, 5678, and 5682, Datenblatt, USA-MA 02453, 2009.
- [58] Olympus NDT INC.: Prüfgeräte, Winkelschallköpfe, 2014, URL: <http://www.olympus-ims.com/de/ultrasonic-transducers/angle-beam/> (abgerufen am 24. November 2014).
- [59] Potluri, P., Sagar, T. V.: Compaction modelling of textile preforms for compo- site structures: Fourteenth International Conference on Composite Structures ICCS/14, Composite Structures, 86, 2008, S. 177–185.

7 Verwendete Symbole und Abkürzungen

7.1 Symbole

| Symbol | Einheit | Bezeichnung |
|---------------------------|----------------------|---|
| v_x | [m/s] | Fließgeschwindigkeit des Fluids in x-Richtung |
| K_x | [m ²] | Permeabilität in x Richtung |
| Δx | [m] | Weg in x-Richtung |
| η | [Pa s] | Viskosität des Fluids |
| ρ | [kg/m ³] | Dichte des Fluids |
| v | [m/s] | Geschwindigkeitstensor |
| ∇P | [Pa/m] | Druckgradient |
| Q | [m ³ /s] | Volumenstrom |
| A_{ef} | [m ²] | effektiv durchströmte Fläche |
| A | [m ²] | Querschnittsfläche |
| ε | [1] | Porosität |
| V_f | [1] | Faservolumengehalt |
| n | [1] | Anzahl der Lagen des Faserhalbzeugs |
| S_0 | [kg/m ²] | Flächengewicht des Faserhalbzeugs |
| ρ_f | [kg/m ³] | Dichte des Faserhalbzeugs |
| h | [m] | Kavitätenhöhe |
| $\partial P / \partial r$ | [Pa/m] | Druckgradient über Radius |
| K_1 | [m ²] | Permeabilität parallel zur Hauptachse |
| K_2 | [m ²] | Permeabilität parallel zur Nebenachse |
| K_3 | [m ²] | Permeabilität parallel zur Höhenachse |

| | | |
|------------|-------------------|---|
| $K_{1,2}$ | [m ²] | Permeabilität eines ebenen-isotropen Materials |
| r_f | [m] | Radius der Fließfront |
| r_0 | [m] | Radius des Angusses |
| t | [m] | Zeit |
| ΔP | [Pa] | Druckdifferenz |
| x_f | [m] | Fließfrontfortschritt entlang der Hauptachse |
| y_f | [m] | Fließfrontfortschritt entlang der Nebenachse |
| x_0 | [m] | Hauptachsenlänge des Angusses |
| y_0 | [m] | Nebenachsenlänge des Angusses |
| z_0 | [m] | Höhenachsenlänge des Angusses |
| a | [m] | Fließfrontfortschritt entlang der Hauptachse |
| b | [m] | Fließfrontfortschritt entlang der Nebenachse |
| c | [m] | Fließfrontfortschritt entlang der Höhenachse |
| K_e | [m ²] | isotrope Ersatzpermeabilität in der Ebene |
| x,y,z | [m] | reale Koordinaten |
| X,Y,Z | [m] | Koordinaten des isotropen Raumes |
| r | [m] | Radius |
| V_{el} | [m ³] | Volumen des Ellipsoids |
| V_{ku} | [m ³] | Volumen der Kugel |
| r_{fe} | [m] | Radius der isotropen Kugel |
| z_f | [m] | Abstand des Fließfrontscheitels über dem Anguss |
| r_{xy} | [m] | Mittlerer virtueller Fließfrontradius in der xy-Ebene |
| K_{xy} | [m ²] | Mittlere virtueller Permeabilität in der xy-Ebene |
| c | [m/s] | Schallgeschwindigkeit |

| | | |
|-------|-------|--|
| c_1 | [m/s] | Schallgeschwindigkeit in der getränkten Verstärkungsstruktur |
| c_1 | [m/s] | Schallgeschwindigkeit in der trockenen Verstärkungsstruktur |
| D | [m] | Durchmesser des Ultraschallsensors |
| f | [1/s] | Frequenz |
| N | [m] | Abstand des Brennpunktes vom Sender |

7.2 Abkürzungen

| Abkürzung | Bezeichnung |
|--------------------------|---|
| LCM | Liquid Composite Moulding |
| RTM | Resin Transfer Moulding |
| VARTM | Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding |
| VARI | Vacuum Assisted Resin Injection |
| 1D | Eindimensional |
| 2D | Zweidimensional |
| 3D | Dreidimensional |
| US | Ultraschall |
| LDC | Linearer Gleichstrom |
| H-DMS | Halbleiter Dehnmessstreifen |
| SMARTweave TM | Sensor Mounted As Roving Threads System |
| EFPI | Extensic Fabry Perot Interferometer |
| TOF | Time of flight |
| CAD | Computer aided design |
| POM | Polyoxymethylen |
| PMMA | Polymethylmetacrylat |
| T_g | Glasübergangstemperatur |

| | |
|----|-------------------|
| GE | General Electrics |
| GF | Glasfaser |

8 Abbildungsverzeichnis

| | | |
|---------------|--|----|
| Abbildung 1: | Vergleich anisotrope Ausbreitung der Fließfront mit isotroper Ausbreitung im Ersatzmodell. | 7 |
| Abbildung 2: | Konfiguration des SMARTweave™ Systems [38]..... | 16 |
| Abbildung 3: | Darstellung des Messsprinzips einer EFPI Faser [30]..... | 17 |
| Abbildung 4: | Funktionsprinzip eines evaneszenten faseroptischen Messsprinzips [40]. | 17 |
| Abbildung 5: | Schematische Darstellung des Messaufbaus für eine visuelle Messung [19]. | 18 |
| Abbildung 6: | Messprinzip des TOF Puls-Echo Modus [30]. | 20 |
| Abbildung 7: | Messaufbau der TOF Durchschallungsmessung [29]..... | 21 |
| Abbildung 8: | Veränderung des Ultraschallimpulses in ToF Darstellung während der Injektion bei der Durchschallungsmethode [29]. | 21 |
| Abbildung 9: | Stehgerüste des 3D Permeameters. | 24 |
| Abbildung 10: | Angusssystem von oben betrachtet. | 24 |
| Abbildung 11: | Schnitt des Angusssystems mit orange dargestelltem POM und hellblau dargestelltem PMMA. Der grüne Pfeil definiert die Fließrichtung des Fluids. | 25 |
| Abbildung 12: | Adapter zur Aufnahme des US und zum Einschrauben in das Angusssystem..... | 26 |
| Abbildung 13: | Grundplatte und Nest der Kavität des Dickenpermeameters..... | 27 |
| Abbildung 14: | PMMA Adapter der Grundplatte mit Injektionsbohrung. | 27 |
| Abbildung 15: | Deckplatte mit Sicht von unten. Mittig ist der Adapter für die US Aufnahme zu erkennen. | 28 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 16: Adapter der Deckplatte mit orange dargestelltem POM und hellblau dargestelltem PMMA. | 29 |
| Abbildung 17: Nahfeld und Fernfeld des US. | 36 |
| Abbildung 18: Gesamtsystem des Dickenpermeameters. In der Abbildung werden Aluminiumbauteile silber, Edelstahlbauteile dunkelgrau, andere Stahlteile in hellgrau, die POM Adapter gelblich, die Aktuatorik blau und die Sensorik rötlich dargestellt. | 38 |
| Abbildung 19: Schnitt durch die Symmetrieachse des Permeameters. Rot dargestellte Sensorik, hellblau dargestelltes PMMA und gelb hervorgehobenes POM. Die grünen Pfeile markieren den Fließweg des Fluids. | 39 |
| Abbildung 20: Fotografie des geöffneten 3D Permeameters mit eingelegter Verstärkungsstruktur. | 40 |
| Abbildung 21: Injektionsdruck über der Versuchsdauer der 3D Permeabilitätsmessung. | 41 |
| Abbildung 22: Fließfronthöhe über dem Anguss über der Versuchsdauer der 3D Permeabilitätsmessung. | 42 |
| Abbildung 23: Injiziertes Volumen über der Versuchsdauer der 3D Permeabilitätsmessung. | 42 |
| Abbildung 24: Gemessene und geglättete Dickenpermeabilität über der Versuchsdauer der 3D Permeabilitätsmessung. | 43 |

9 Tabellenverzeichnis

| | |
|---|----|
| Tabelle 1: Auflistung der diskutierten Messmethoden zur Bestimmung des K_3 Permeabilitätswertes. | 22 |
| Tabelle 2: Vergleich der Druckmessmethoden [33, 35]..... | 30 |
| Tabelle 3: Vergleich der Drucksensoren [47–49]. | 31 |
| Tabelle 4: Gegenüberstellung der Messverfahren zur Bestimmung des Volumenstromes [31, 32]..... | 32 |
| Tabelle 5: Vergleich von Gut und Sehr Gut geeigneten Durchflussmesssensoren [50–52]. | 33 |
| Tabelle 6: Gegenüberstellung der Messverfahren zur Detektion der Fließfront [18, 30]. | 35 |
| Tabelle 7: Ultraschall Sensorsystem [56–58]. | 37 |
| Tabelle 8: Materialdaten des untersuchten Glasfasergewebes..... | 41 |
| Tabelle 9: Zusammenfassung der integrierten Messsensorik. | 44 |