Interner Bericht

DLR-IB-SY-BS-2025-9

# Entwicklung und Bau eines 1D-Permeameters für Faserrovings mit anschließender Untersuchung der Funktionsfähigkeit mit verschiedenen Fasermaterialien

## Masterarbeit

Jannis Rebettge

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

Institut für Systemleichtbau

Deutsches Zentrum
DLR für Luft- und Raumfahrt

# Dokumenteigenschaften

| | |
|---|---|
| Titel | Entwicklung und Bau eines 1D-Permeameters für Faserrovings mit anschließender Untersuchung der Funktionsfähigkeit mit verschiedenen Fasermaterialien |
| Betreff | Masterarbeit |
| Institut | Systemleichtbau |
| Erstellt von | Jannis Rebettge |
| Beteiligte | Jan-Uwe Schmidt |
| Geprüft von | Prof. Dr.-Ing. Martin Wiedemann, Prof. Dr.-Ing. Klaus Dröder |
| Freigabe von | Prof. Dr.-Ing. Hans Peter Monner |
| Zugänglichkeit | ☐ Stufe 1: Allgemein zugänglich (in elib ohne Zugangsbeschränkung) |
| | ☒ Stufe 2: DLR intern zugänglich (in elib mit Beschränkung „nur DLR-intern zugänglich“) |
| Datum | 10.05.2024 |
| Version | 1.0 |
| Datei Info | IB_2025_9_MA_Rebettge.pdf |

Deutsches Zentrum
DLR für Luft- und Raumfahrt

# Entwicklung und Bau eines 1D-Permeameters für Faserrovings mit anschließender Untersuchung der Funktionsfähigkeit mit verschiedenen Fasermaterialien

**Masterarbeit**

am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.

Verfasser: Jannis Rebettge

im Studiengang: Master Maschinenbau an der TU-Braunschweig

Matrikelnummer:

Erstprüfer:
Prof. Dr.-Ing. Martin Wiedemann (DLR-SY)

Zweitprüfer:
Prof. Dr.-Ing. Klaus Dröder (TU Braunschweig-IWF)

Betreuer:
M.Sc. Jan-Uwe Reinhard Schmidt (DLR-SY)

Bearbeitungszeitraum: 6 Monate, Abgabedatum am: 10.05.2024

# Aufgabenstellung

# Aufgabenstellung fur Masterarbeit

in der Fachrichtung Maschinenbau

fiir Jannis Rebettge, Matrikel-Nr.:

Thema:

**Entwicklung und Bau eines 1D-Permeameters fiir Faserrovings mit anschlieBender Untersuchung der Funktionsfahigkeit mit verschiedenen Fasermaterialien**

Die steigenden Leichtbauanforderungen in der Luft- und Raumfahrt fuhren zu neuen Herausforderungen bei der Herstellung geeigneter Bauteile. Diese Strukturen sollen zunehmend mehrskalig, multimateriell und in komplexer Geometrie ausgefuhrt sein. Hierfur sind geeignete Fertigungsprozesse zu etablieren, welche eine kostengunstige Generierung solcher Strukturen ermoglichen. Zusatzlich entsteht ein immer ausgepragterer Fokus auf ressourceneffiziente und nachhaltige Prozesse.
Die effiziente Erzeugung von faserverstarkten, thermoplastischen Strukturen mit komplexen Geometrien bildet einen Fokus aktueller Forschungsvorhaben. Dabei gelten unter anderem additive Extrusionsverfahren als vielversprechend. In diesem Zusammenhang wurde am Institut fur Systemleichtbau des Deutschen Zentrums fur Luft- und Raumfahrt ein Verfahren zur Impragnierung von endlosen Faserrovings mit hochviskosen thermoplastischen Polymeren entwickelt. Fur diese Technologie stehen mehrere Ultraschallimpragnierungszellen zur Verfugung, die nach einer Co-Extrusionsheit eingebaut sind. Im Anschluss erfolgt der Einsatz verschiedener Dusen und Temperierzonen, urn die finale Qualitat der Filamente optimal einstellen zu kbnnen. Bisher erfolgt die Analgenparametrierung auf Grund gesammelter Erfahrungen. In Zukunft soil eine quantifizierbarere Auswahl der Parameter mbglich sein, wofiir die Durchflussfahigkeit von Polymer durch das zu impragnierende Fasermaterial zu bestimmen ist. Hierfur soil ein Permeameter fur die verwendeten 12K Faserrovings entwickelt werden. Das Permeameter soil gebaut werden und die Funktionsfahigkeit mit einer ersten Parameterstudie nachgewiesen werden. Das Permeamter soil zusatzlich die Moglichkeit besitzen, den infusionierten Roving nachtraglich durch z.B. Mikroskopie untersuchen zu kbnnen.

DLR

Die Arbeit umfasst folgende Punkte

1. Literaturrecherche und Einarbeitung in die Aufgabenstellung
2. Identifizierung der wesentlichen Einflussgrößen für die Auslegung eines Permeameters
3. Bau des Permeameters
4. Funktionstest des Permeameters in Form einer ersten Parameterstudie
5. Darstellung und Dokumentation der Ergebnisse in Form einer gebundenen Arbeit
6. Präsentation der erzielten Ergebnisse

Die Arbeit wird am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für Systemleichtbau, Braunschweig, durchgeführt und betreut.
Für Planung, Berechnung, Fertigung, Untersuchungen und Dokumentation können Labore, Werkzeuge, Einrichtungen, Programme und Rechenanlagen des DLR benutzt werden. Die Unterstützung durch das Institut für Systemleichtbau umfasst die Beratung sowie Hilfe bei der Einarbeitung in die Theorie und Praxis.

Die Ergebnisse sind entsprechend dem Fortschritt der Arbeit und im Bearbeitungszeitraum mehrfach vorzulegen.
Änderungen der Aufgabenstellung sind nur mit Zustimmung des Instituts möglich.
Die Arbeit ist elektronisch im WISA-Portal hochzuladen. Ein gebundenes Exemplar ist im Institut für Systemleichtbau und im Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik der TU Braunschweig einzureichen.

| | |
|---|---|
| Beginn: | 10.11.2023 |
| Ende: | 10.05.2024 |
| Erstprüfer: | Prof. Dr.-Ing. Martin Wiedemann<br>DLR e.V., Institut für Systemleichtbau |
| Zweitprüfer: | Prof. Dr.-Ing. Klaus Dröder, TU Braunschweig,<br>Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik |
| Betreuer: | M.Sc. Jan-Uwe Reinhard Schmidt<br>DLR e.V., Institut für Systemleichtbau |

Braunschweig, 10.11.2023

Unterschrift des Erstprüfers

DLR

# Danksagung

Ich möchte diese Gelegenheit nutzen, um meinen tiefsten Dank an all diejenigen auszusprechen, die mich während der Erstellung dieser Masterarbeit unterstützt und begleitet haben.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Martin Wiedemann für die Bereitstellung dieses spannenden Themas sowie für die Begutachtung der vorliegenden Masterarbeit.

Des Weiteren möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Dröder meinen Dank für die Begutachtung dieser Arbeit aussprechen. Ferner möchte ich Herrn Werner Berlin, der Herrn Prof. Dröder bei meinem Abschlussvortrag vertritt, bedanken.

Ein besonderer Dank geht auch an Jan-Uwe Schmidt, der mich während des gesamten Forschungsprozesses betreut und unterstützt hat. Sein Fachwissen und seine Anleitung waren während der gesamten Dauer meiner Forschung eine große Hilfe und Ermutigung. Seine Unterstützung war für das erfolgreiche Abschließen dieser Arbeit unerlässlich.

Mein tiefster Dank gilt meinen Eltern und Freunden für ihre Unterstützung während meiner gesamten Studienzeit. Ihre fortwährende Ermutigung und Hilfe ist für mich von unschätzbarem Wert.

# Eidesstattliche Erklärung

Masterarbeit

von: Jannis Rebettge

Matr.Nr.: 4510419

Titel: "**Entwicklung und Bau eines 1D-Permeameters für Faserrovings mit anschließender Untersuchung der Funktionsfähigkeit mit verschiedenen Fasermaterialien**"

Ich versichere eidesstattlich durch eigenhändige Unterschrift, dass ich die Arbeit selbständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Veröffentlichungen entnommen sind, habe ich als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen.

Ich weiß, dass bei Abgabe einer falschen Versicherung die Master-Prüfung als nicht bestanden zu gelten hat.

Braunschweig, den 9. Mai 2024

Jannis Rebettge

# Abgabebescheinigung

## Hochladebestätigung

Jannis Rebettge (Matrikelnr. 4510419)
geb. am 23.10.1994 in Bremen
Maschinenbau, Master

Die **Masterarbeit** im Studiengang **Maschinenbau Master** wurde am 09.05.2024 um 00:01 Uhr von Jannis Rebettge erfolgreich hochgeladen und gilt damit als abgegeben.
Beginn des Hochladevorgangs: 09.05.2024 00:01 Uhr
Ende des Hochladevorgangs: 09.05.2024 00:03 Uhr

Die Bewertung steht noch aus.

Sollte die Abgabe gedruckter Exemplare erforderlich sein, ist die unterschriebene Hochladebestätigung den gedruckten Exemplaren beizufügen.

Prüfungsamt der Fakultät für Maschinenbau
(Diese Bescheinigung wurde automatisch erstellt und ist ohne Unterschrift gültig.)

Hiermit bestätige ich, dass die hochgeladene Version meiner Masterarbeit mit der hier eingereichten gebundenen Version identisch ist (mit Ausnahme der eventuellen Anonymisierung meines Namens bzw. meiner Matrikelnummer) .

Jannis Rebettge

Unterschrift des Studierenden

# Sperrvermerk

Die vorliegende Masterarbeit mit dem Titel:
**"Entwicklung und Bau eines 1D-Permeameters für Faserrovings mit anschließender Untersuchung der Funktionsfähigkeit mit verschiedenen Fasermaterialien"** basiert auf internen, vertraulichen Daten und Informationen des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V.

Die Masterarbeit darf nur dem Erst- und Zweitgutachter sowie befugten Mitgliedern des Prüfungsausschusses zugänglich gemacht werden. Eine Veröffentlichung und Vervielfältigung der Masterarbeit ist - auch in Auszügen - nicht gestattet.

Eine Einsichtnahme der Arbeit durch Unbefugte bedarf einer ausdrücklichen Genehmigung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V.

# Zusammenfassung

Im Zuge des fortschreitenden technologischen Wandels und des wachsenden Bedarfs an innovativen Lösungen in der Luft- und Raumfahrtindustrie gewinnen die Anforderungen an Leichtbaustrukturen zunehmend an Bedeutung. Diese Entwicklung forciert die Forschung und Entwicklung neuer Fertigungsmethoden, welche in der Lage sind, mehrskalige und multimaterielle Bauteile mit komplexen Geometrien kostengünstig herzustellen. Der beschriebene Kontext spiegelt die Notwendigkeit wider, geeignete Fertigungsprozesse zu etablieren, welche nicht allein die technischen Anforderungen erfüllen, sondern ebenfalls den bedeutender werdenden Aspekten der Ressourceneffizienz und Nachhaltigkeit gerecht werden. Ein besonderer Forschungsschwerpunkt liegt in der effizienten Produktion von endlosfaserverstärkten, thermoplastischen Strukturen mit komplexen Geometrien. Unter anderem gelten additive Extrusionsverfahren zur Fertigung der genannten Strukturen als vielversprechend, dies bringt jedoch neue Herausforderungen mit sich. Die größte Herausforderung bei der Herstellung von Faser-Kunststoff-Verbunden mithilfe der additiven Fertigung ist die Herstellung des Ausgangsmaterials in geeigneter Form (z. B. 3D-Druckfilament) sowie die Wahl der Prozessparameter zur zuverlässigen Herstellung von Verbundwerkstoffkomponenten mit hohen mechanischen Eigenschaften und reproduzierbarer Qualität.

Die vorliegende Arbeit verfolgt das Ziel, die Grundlagen für eine quantifizierbare Auswahl von Anlagenparametern für den beschriebenen Herstellungsprozess zu schaffen. Dazu ist es erforderlich, die Permeabilität, also die Durchflussfähigkeit von Polymer durch das Fasermaterial, zu kennen. Mit der Kenntnis dieses Materialparameters lassen sich die bisherigen Erfahrungswerte durch messbare Parameter untermauern. Die Messung der Permeabilität stellt eine etablierte Methode dar, den Fertigungsprozess von Faser-Kunststoff-Verbunden zu verbessern, jedoch existiert bisher Stand der Forschung kein Verfahren, mit dem sich die Permeabilität von einzelnen Faserrovings bestimmen lässt. Zu diesem Zweck wird in der vorliegenden Masterarbeit ein 1D-Permeameter speziell für einzelne Faserrovings entwickelt, gebaut und seine Funktionalität durch eine erste Parameterstudie validiert. Darüber hinaus wird die Möglichkeit geschaffen, die in-

fusionierten Rovings nachträglich zu untersuchen, um tiefer gehende Einblicke in den Imprägnierungsprozess zu erhalten und die Grundlage für weitere Wissenszugewinne zu schaffen.

Der Entwicklungsprozess folgt in der Durchführung und Dokumentation der VDI-Richtlinie VDI 2221 und beginnt mit dem Herausarbeiten der wesentlichen Einflussgrößen für die Auslegung eines 1D-Permeameters. Das Resultat ist ein Gesamtentwurf des 1D-Permeameters mit Konzepten, Versuche unter Vakuum durchzuführen und eine während der Fertigung von 3D-Druckfilamenten wirkende Abziehkraft zu simulieren. Der Bau des Einzelentwurfs des 1D-Permeameters wurde beauftragt und das 1D-Permeameter geliefert.

In einer ersten Parameterstudie wird das 1D-Permeameter erprobt und die Funktionalität unter Berücksichtigung der Einflussfaktoren Viskosität und Volumenstrom sowie einer optischen Bildanalyse der entnehmbaren imprägnierten Kohlenstofffaserrovings bewiesen. Im Zusammenhang mit den Versuchsergebnissen werden konstruktive Verbesserungsvorschläge unterbreitet und Handlungsempfehlungen für folgende Forschungsarbeiten gegeben. Unregelmäßigkeiten in den Messergebnissen werden auf das Auftreten des "Race-Tracking-Effekts", dem Vorbeifließen der Testflüssigkeit am Faserroving, zurückgeführt und mögliche Steuerparameter zum Verringern dieses Effekts identifiziert.

Weiterer Forschungsbedarf ergibt sich aus der weitergehenden Fragestellung genaue Permeabilitätswerte mit dem entwickelten 1D-Permeameter zu bestimmen und zu untersuchen, inwieweit die Anlagenparameter optimiert werden müssen, um für den Fertigungsprozess von endlosfaserverstärktem 3D-Druckfilament hilfreich zu sein. Sind ausreichend viele Einflussparameter auf die Permeabilität von einzelnen Faserrovings zusammengetragen, besitzt die entwickelte Technologie das Potenzial, bei der optimalen Parametereinstellung beliebiger Faser-Thermoplast Kombinationen im Fertigungsprozess von endlosfaserverstärktem 3D-Druckfilament zu unterstützen.

# Abstract

In the context of ongoing technological change and the growing need for innovative solutions in the aerospace industry, the requirements for lightweight structures are becoming increasingly important. This development is driving the research and development of new manufacturing methods that are capable of producing multi-scale and multi-material components with complex geometries at low cost. The present context reflects the necessity to establish suitable manufacturing processes that not only meet the technical requirements, but also satisfy the increasingly important aspects of resource efficiency and sustainability. A particular focus is on the efficient production of continuous fiber-reinforced thermoplastic structures with complex geometries. Among other things, additive extrusion processes for the production of these structures are considered promising, but this brings with it new challenges. The most significant challenge in the production of fiber-plastic composites using additive manufacturing is the production of the starting material in an appropriate form (e.g., 3D printing filament) and the selection of process parameters for the reliable fabrication of composite components with high mechanical properties and reproducible quality.

The objective of this study is to establish a foundation for a quantifiable selection of system parameters. To this end, it is essential to ascertain the permeability, or flow capacity of polymer through the fiber material. Having this material parameter, previous empirical values can be substantiated by measurable parameters. The measurement of permeability is a well-established method for optimizing the production process of Fiber-reinforced plastic composites. However, there is no method for determining the permeability of individual fiber rovings. A one-dimensional permeameter has been developed and constructed for the specific purpose of measuring the permeability of individual fiber rovings. This instrument has been subjected to an initial parameter study to validate its functionality. Furthermore, the possibility has been created to subsequently examine the infused rovings in order to gain deeper insights into the impregnation process and create the basis for further knowledge gains.

The development process adheres to the VDI guideline VDI 2221 and begins with the identification of the key influencing variables for the design of a 1D permeameter. Consequently, the development process is carried out and documented in accordance with VDI 2221. The result is an overall design of the 1D permeameter, which incorporates concepts for carrying out tests under vacuum and simulating a pull-off force acting during the production of 3D printing filaments. The construction of the individual design of the 1D permeameter was commissioned and the 1D permeameter was delivered.

In an initial parameter study, the 1D permeameter is tested and its functionality is proven, taking into account the influencing factors of viscosity and volume flow. Furthermore, an optical image analysis of the removable impregnated carbon fiber rovings is conducted. In light of the test outcomes, constructive suggestions for enhancement are proffered, along with recommendations for future research. The occurrence of irregularities in the measurement results is attributed to the "race-tracking effect,"which refers to the phenomenon of the test liquid flowing past the fiber roving. Potential control parameters for reducing this effect are identified.

Further research is necessary to ascertain the precise permeability values with the newly developed 1D permeameter and to determine the extent to which the system parameters must be optimized in order to be beneficial for the production process of continuous fiber-reinforced 3D printing filament. Once a sufficient number of parameters influencing the permeability of individual fiber rovings have been compiled, the developed technology has the potential to support the optimal parameter setting of any fiber-thermoplastic combination in the production process of continuous fiber-reinforced 3D printing filament.

# Inhaltsverzeichnis

**Aufgabenstellung** **III**

**Danksagung** **IX**

**Eidesstattliche Erklärung** **XI**

**Abgabebescheinigung** **XIII**

**Sperrvermerk** **XVII**

**Zusammenfassung** **XIX**

**Abstract** **XXI**

**Abbildungsverzeichnis** **XXVI**

**Tabellenverzeichnis** **XXVIII**

**Nomenklatur** **XXIX**

**1 Einführung** **1**

**2 Theoretische Grundlagen und Stand der Technik** **3**

2.1 Verbundwerkstoffe mit thermoplastischer Matrix . . . . . 4

2.2 Herstellungsprozess von endlosfaserverstärktem Filament für die additive Extrusion, Stand der Technik . . . . . 8

2.3 Permeabilität in der Faserverbundfertigung . . . . . 10

2.3.1 Definition der Permeabilität nach D'Arcy . . . . . 10

2.3.2 Permeabilitätsmessung und gängige Messverfahren . . . . . 12

2.3.3 Grenzen des Permeabilitätsmodells nach D'Arcy . . . . . 15

2.3.4 Faserverbundspezifische Einflussgrößen auf die Permeabilität . . . 17

2.4 Einflussgrößen für die Auslegung eines 1D-Permeameters . . . . . 19

**3 Entwicklung und Bau eines 1D-Permeameters 20**
3.1 Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung . . . . . 21
3.2 Ermitteln von Funktionen und deren Strukturen . . . . . 24
3.3 Suchen nach Lösungsprinzipien und deren Strukturen . . . . . 26
3.3.1 Messung des Druckgradienten . . . . . 28
3.3.2 Messung des Volumenstroms . . . . . 28
3.3.3 Temperatur messen und halten . . . . . 29
3.3.4 Imprägnierte Fasern prüfen . . . . . 30
3.3.5 Faserrovings einlegen und entnehmen . . . . . 30
3.3.6 Fasern fixieren . . . . . 31
3.3.7 Anbindung . . . . . 31
3.3.8 Dichtheit gewährleisten . . . . . 31
3.3.9 Temperaturbeständigkeit . . . . . 32
3.3.10 Vakuum aufbringen . . . . . 32
3.3.11 Abziehkraft simulieren . . . . . 33
3.4 Gliedern in realisierbare Module . . . . . 35
3.5 Gestalten der maßgebenden Module . . . . . 36
3.5.1 Hauptmodul: Permeameter . . . . . 36
3.5.2 Nebenmodul: Vakuumoption . . . . . 44
3.5.3 Nebenmodul: Kraftsimulation . . . . . 45
3.6 Gestalten des gesamten Produkts . . . . . 46
3.7 Ausarbeiten der Ausführungs- und Nutzungsangaben . . . . . 48
3.8 Produktvorstellung: 1D-Permeameter . . . . . 50

**4 Funktionalitätsüberprüfung des 1D-Permeameters: Parameterstudie 51**
4.1 Verwendete Halbzeuge . . . . . 51
4.2 Anlagentechnik . . . . . 53
4.3 Versuchsvorbereitung . . . . . 54
4.3.1 Vorversuch . . . . . 55
4.3.2 Durch Beschädigung notwendige Anpassungen des Permeameters 58
4.4 Versuchsdurchführung und Aufbau . . . . . 60
4.5 Auswertung der Messdaten und Ergebnisse . . . . . 65
4.5.1 Bestimmung der eindimensionalen gesättigten Permeabilität . . . 66
4.5.2 Analyse der Schnittbilder . . . . . 70
4.5.3 Einfluss der Viskosität . . . . . 73
4.5.4 Einfluss des Volumenstroms . . . . . 77

**5 Zusammenfassung und kritische Betrachtung** **81**

**6 Ausblick** **85**

**Literaturverzeichnis** **86**

**A Zeitplan** **93**

**B Technische Zeichnungen** **94**

**C Rheologische Materialdaten** **112**

**D Datenblätter** **115**

# Abbildungsverzeichnis

2.1 Grundlegende Systemdarstellung der Halbzeugherstellung [10] . . . . . 6
2.2 Schematische Darstellung einer Ultraschall-Imprägnierungs-Zelle [2] . . . 9
2.3 Grundaufbau der Permeabilitätsbestimmung [12] . . . . . 10
2.4 Übersicht der Permeabilitäts- Messmethoden [3, 21] . . . . . 13

3.1 Allgemeines Modell der Produktentwicklung nach Richtlinie VDI 2221 . . 21
3.2 Hauptfunktionsschema des 1D-Permeameters, Ein- und Ausgangsgrößen . 25
3.3 Permeameter mit Vakuumanbindung . . . . . 33
3.4 Modulschema . . . . . 35
3.5 Anordnung der funktionalen Komponenten (nicht maßstäblich) . . . . . 36
3.6 Grundentwurf Anbindung (a: Symmetrische Teilung, b: Anbindung mit Versatz) . . . . . 39
3.7 Faserbefestigung (A: Symmetrische Teilung, B: Anbindung mit Versatz) . 39
3.8 CAD-Modell: Vorentwurf Permeameter, Grundkörper (blau) und Deckel (grün) . . . . . 40
3.9 Detailansicht: Faserbefestigung . . . . . 41
3.10 Befestigungsplättchen (a.), Schnittansicht Faserbefestigung (b.) . . . . . 41
3.11 Prototyp: Außenansicht . . . . . 42
3.12 Prototyp-Innenansicht: Gesamtüberblick (links), Detailansicht- Faserbefestigung (rechts) . . . . . 43
3.13 Trichter zum Einbringen der Kohlenstofffasern in das Rohr . . . . . 44
3.14 Konzept zur Simulation einer auf den Faserroving aufgebrachte Abziehkraft 45
3.15 Permeameter finaler Entwurf . . . . . 46
3.16 Gesamtentwurf: 1D-Permeameter mit Nebenmodulen . . . . . 47
3.17 Vorstellung des 1D-Permeameters . . . . . 50

4.1 Anlagentechnik . . . . . 53
4.2 Permeameter mit Messingrohr und eingelegtem Kohlenstofffaserroving . . 55
4.3 Aufbau: Vorversuch . . . . . 56
4.4 Vorversuch: Permeameter Deckel mit Silikonfluss . . . . . 57

4.5 Abgebrochener Schmelzekanal mit Gewinde . . . . . 58
4.6 Notwendige Anpassung der Faserbefestigung . . . . . 59
4.7 Versuchsaufbau: Komplett . . . . . 60
4.8 Versuchsaufbau: Detailansicht . . . . . 61
4.9 Vorheizen des Permeameters . . . . . 61
4.10 Versuchsdurchführung: Erfassung des Massestroms . . . . . 62
4.11 Analyse der Versuchsdurchführung . . . . . 63
4.12 Permeameter geöffnet unmittelbar nach der Versuchsdurchführung . . . . 64
4.13 Verlauf der komplexen Viskosität von PLA (Ingeo 2003D) bei steigender Kreisfrequenz . . . . . 68
4.14 Gesättigte Permeabilität bei Annahme niedriger Schergeschwindigkeiten . 69
4.15 Ausschnitt Rohr 30 mm . . . . . 70
4.16 Eingebettete 15 mm Rohrabschnitte . . . . . 71
4.17 Schnittbilder in Fließrichtung: 200-fach und 2000-fach vergrößert . . . . . 71
4.18 Schnittbilder entgegen der Fließrichtung: 200-fach und 2000-fach vergrößert 72
4.19 Grenzen der Permeabilität bei höchster/ niedrigster Viskosität . . . . . 74
4.20 Dynamische Viskosität im sich überschneidenden Permeabilitätsbereich . 75
4.21 Permeabilität in Abhängigkeit der Viskosität über der zugehörigen Kreisfrequenz . . . . . 76
4.22 Vergleich zum Einfluss des Volumenstroms auf die Messergebnisse . . . . 77
4.23 Verlauf des Volumenstroms bei variabler Viskosität und gleichbleibender Permeabilität . . . . . 79

A.1 Zeitplan: Masterarbeit (10.11.2023-10.05.2024) . . . . . 93

# Tabellenverzeichnis

3.1 Anforderungsliste für ein 1D-Permeameter . . . . . 24
3.2 Zuordnung der Teilfunktionen . . . . . 26
3.3 Morphologischer Kasten zum Versionsvergleich eines 1D-Permeameters . 27
3.4 Morphologischer Kasten zum Versionsvergleich eines 1D-Permeameters mit Auswahlpfad . . . . . 34
3.5 Legende zu Abbildung 3.5 . . . . . 37
3.6 Stückliste zum Betrieb des 1D-Permeameters . . . . . 49

4.1 Randbedingungen für die Berechnung der Permeabilität . . . . . 66
4.2 Versuchswerte . . . . . 67
4.3 Gesättigte Permeabilität bei Annahme niedriger Schergeschwindigkeiten . 69
4.4 Permeabilität: Ober- und Untergrenze . . . . . 74
4.5 Änderungsfaktor des Volumenstroms für die gleiche Permeabilität . . . . 78

C.1 Rheologische Daten zu PLA "Natureworks Ingeo 2003D"bei 210 °C . . . 113
C.2 Rheologische Daten zu PLA ”Natureworks Ingeo 2003D” bei 230 °C [extrapoliert] . . . . . 114

# Nomenklatur

## Abkürzungen

| Abkürzung | Bedeutung |
|---|---|
| 1D | Eindimensional |
| 2D | Zweidimensional |
| 3D | Dreidimensional |
| CAD | Computer Aided Design (computergestütztes Erstellen von Zeichnungen) |
| CFK | Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff |
| DLR | Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt e.V. |
| FVG | Faservolumengehalt |
| FKV | Faser-Kunststoff-Verbunde |
| KW | Kalenderwoche |
| PA | Polyamid |
| PBT | Polybutylenterephthalat |
| PEEK | Polyetheretherketon |
| PEI | Polyetherimid |
| PET | Polyethylenterephthala |
| PLA | Polylactide |
| PP | Polypropylen |
| PPS | Polyphenylensulfid |
| PMMA | Polymethylmethacrylat |
| RTM | Harzinjektionsverfahren (Resin Transfer Molding) |
| Stk. | Stück |
| Sy | Institut für Systemleichtbau |
| TGA | thermogravimetrische Analyse |
| UD | Unidirektional |
| VDI | Verein Deutscher Ingenieure e.V. |
| vgl. | Vergleiche |

## Lateinische Formelzeichen

| Zeichen | Einheit | Bedeutung |
|---|---|---|
| $A_{eff}$ | $m^2$ | Effektiv durchströmte Fläche |
| $A_{Form}$ | $m^2$ | Querschnittsfläche Form |
| $Ca$ | 1 | Kapillarzahl |
| $E$ | $MPa$ | E-Modul |
| $F$ | $N$ | Kraft |
| $f$ | $Hz$ | Frequenz |
| $K$ | $m^2$ | Permeabilität |
| $l$ | $mm$ | Länge |
| $m$ | $g$ | Masse |
| $P$ | $1bar = 10^5 Pa$ | Druck |
| $\Delta P$ | $Pa$ | Druckdifferenz |
| $Q$ | $\frac{m^3}{s}$ | Volumenstrom |
| $r$ | $mm$ | Radius |
| $T$ | $°C$ | Temperatur |
| $T_m$ | $°C$ | Schmelztemperatur |
| $t$ | $s$ | Zeit |
| $V$ | $m^3$ | Volumen |
| $v$ | $\frac{m}{s}$ | Geschwindigkeit |
| $V_f$ | 1 | Faservolumengehalt |
| $\Delta X$ | $m$ | Fließstrecke |
| $x_{ff}$ | $m$ | Position der Fließfront |
| $\varnothing$ | $mm$ | Durchmesser |

## Griechische Formelzeichen

| Zeichen | Einheit | Bedeutung |
|---|---|---|
| $\rho$ | $\frac{g}{cm^3}$ | Dichte |
| $\dot{\gamma}$ | $\frac{1}{s}$ | Scherrate |
| $\sigma$ | $MPa$ | Oberflächenspannung |
| $\eta$ | $Pas$ | dynamische Viskosität |
| $\varepsilon$ | 1 | Porosität |
| $\omega$ | $\frac{rad}{s}$ | Kreisfrequenz |

## Indizes

| Zeichen | Bedeutung |
|---|---|
| 1 | Messreihe 1 |
| 2 | Messreihe 2 |
| 3 | Messreihe 3 |
| $b$ | Becher |
| $f$ | Faser |
| $ff$ | Fließfront |
| $inj$ | Injektionsöffnung |
| $max$ | maximal |
| $M$ | Matrix |
| $g$ | Gesamt |
| $V$ | Halbzeug |

# 1 Einführung

Im Zuge des fortschreitenden technologischen Wandels und des wachsenden Bedarfs an innovativen Lösungen in der Luft- und Raumfahrtindustrie gewinnen die Anforderungen an Leichtbaustrukturen zunehmend an Bedeutung. Diese Entwicklung treibt die Forschung und Entwicklung neuer Fertigungsmethoden voran, die in der Lage sind, mehrskalige und multimaterielle Bauteile mit komplexen Geometrien kostengünstig herzustellen. Der beschriebene Kontext spiegelt die Notwendigkeit wider, geeignete Fertigungsprozesse zu etablieren, die nicht allein die technischen Anforderungen erfüllen, sondern ebenfalls den immer bedeutender werdenden Aspekten der Ressourceneffizienz und Nachhaltigkeit gerecht werden.

Ein besonderer Forschungsschwerpunkt liegt hierbei auf der effizienten Produktion von endlosfaserverstärkten, thermoplastischen Strukturen mit komplexen Geometrien. Unter anderem gelten additive Extrusionsverfahren zur Fertigung der genannten Strukturen als vielversprechend, dies bringt jedoch neue Herausforderungen mit sich. Die größte Herausforderung bei der Herstellung von Faser-Kunststoff-Verbunden (FKV) mithilfe der additiven Fertigung ist die Herstellung des Ausgangsmaterials in geeigneter Form (z. B. 3D-Druckfilament) sowie die Wahl der Prozessparameter zur zuverlässigen Herstellung von Verbundwerkstoffkomponenten mit hohen mechanischen Eigenschaften und reproduzierbarer Qualität [1]. Daraus ergibt sich ein Hindernis für eine breite industrielle Anwendung, da für additive Extrusionsverfahren wenig kostengünstiges 3D-Druckfilament von nur wenigen Herstellern verfügbar ist [2]. In diesem Zusammenhang wurde am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR) im Institut für Systemleichtbau (SY) des ein Verfahren zur Imprägnierung von endlosen unidirektionalen (UD) Faserrovings mit hochviskosen thermoplastischen Polymeren entwickelt. Der Einsatz von Ultraschallimprägnierungszellen, die nach einer Co-Extrusionseinheit eingebaut sind, ist ein wesentlicher Bestandteil dieses Verfahrens. Die anschließende Anpassung verschiedener Düsen und Temperierzonen erlaubt eine optimale Einstellung der Filamentqualität. Jedoch basiert die Anlagenparametrierung auf bisherigen gesammelten Erfahrungen.

Die vorliegende Arbeit verfolgt das Ziel, die Grundlagen für eine quantifizierbare Auswahl von Anlagenparametern für den beschriebenen Herstellungsprozess zu schaffen. Da-

zu ist es erforderlich, die *Permeabilität*, also die Durchflussfähigkeit von Polymer durch das Fasermaterial, zu kennen. Mit der Kenntnis dieses Materialparameters lassen sich die bisherigen Erfahrungswerte durch messbare Parameter untermauern. Die Messung der Permeabilität stellt eine etablierte Methode dar, den Fertigungsprozess von FKV zu verbessern, jedoch existiert bisher kein Verfahren, mit dem sich die Permeabilität von einzelnen Faserrovings bestimmen lässt.

Zu diesem Zweck wird in der vorliegenden Masterarbeit ein 1D-Permeameter speziell für einzelne Faserrovings entwickelt, gebaut und seine Funktionalität durch eine erste Parameterstudie validiert. Darüber hinaus wird die Möglichkeit geschaffen, die infusionierten Rovings nachträglich zu untersuchen, um tiefer gehende Einblicke in den Imprägnierungsprozess zu erhalten und die Grundlage für weitere Wissenszugewinne zu schaffen.

Die vorliegende Masterarbeit verfolgt und beschreibt den vollständigen Entwicklungsprozess des 1D-Permeameters.

Das Kapitel 2 beginnt hierfür mit den theoretischen Grundlagen und dem Stand der Technik von FKV mit thermoplastischer Matrix sowie dem Herstellungsprozess von endlosfaserverstärktem Filament. Insbesondere die Bestimmung und Bedeutung der Permeabilität in der Faserverbundfertigung wird näher betrachtet. Das erarbeitete Wissen wird in die relevanten Einflussgrößen für die Auslegung eines 1D-Permeameters zusammengefügt. Dies stellt die Grundlage für den Entwicklungsprozess des 1D-Permeameters dar.

Dem Entwicklungsprozess des 1D-Permeameters widmet sich das Kapitel 3. Im Entwicklungsprozess wird der Richtlinie VDI 2221 zur Entwicklung technischer Produkte gefolgt und die Zwischenergebnisse des Prozesses der Richtlinie entsprechend dokumentiert.

In Kapitel 4 erfolgt die Funktionalitätsüberprüfung des 1D-Permeameters im Rahmen einer ersten Parameterstudie. Das experimentelle Vorgehen wird beschrieben und anhand der Auswertung der Ergebnisse mögliche Einflussgrößen auf die bestimmten Permeabilitätswerte identifiziert.

Mit der kritischen Betrachtung des Entwicklungsprozesses befasst sich Kapitel 5 in Form eines zusammenfassenden Fazits. Hier werden alle Zwischenschritte im Entwicklungsprozess im Kontext der Ergebnisse der Parameterstudie bewertet. Der Erfolg des Forschungsauftrags wird aufgezeigt und Verbesserungsvorschläge für eine Neuauflage des 1D-Permeameters und zukünftige Versuche erläutert.

Abschließend wird ein Ausblick auf das zukünftige Forschungspotential gegeben.

Der Bearbeitungszeitplan der vorliegenden Masterarbeit findet sich in Anhang A.

# 2 Theoretische Grundlagen und Stand der Technik

Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV) haben sich aufgrund ihres großen Leichtbaupotenzials in vielen Industriezweigen etabliert, insbesondere in der Automobil- und Luftfahrtindustrie [3]. Die Auswahl an Ausgangsmaterialien für die Matrix und die Verstärkungsfasern ist vielfältig. Am häufigsten werden innerhalb der FKV kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) mit einem duroplastischen Matrixsystem eingesetzt [3, 4]. Gründe hierfür sind z. B. die hohe Temperaturbeständigkeit, die hohe Lösungsmittelbeständigkeit duroplastischer Systeme sowie die hohen spezifischen Festigkeiten und Steifigkeiten von Kohlenstofffasern im Vergleich zu anderen Fasertypen [3, 4]. Trotz der Einsatzdominanz von duroplastischen Matrixsystemen [3, 4] finden auch thermoplastische Matrixsysteme eine immer größer werdende Verwendung. Die Gründe hierfür sind vielfältig. Unter anderem bietet die Verwendung thermoplastischer Matrixsysteme die Möglichkeit, neuartige Fertigungsverfahren für FKV, wie zum Beispiel die endlosfaserverstärkte additive Fertigung. Dieser Thematik widmet sich das dieser Masterarbeit übergeordnete Forschungsprojekt, welches sich insbesondere mit der herausfordernden Fertigung von endlosfaserverstärktem 3D-Druckfilament befasst, um mit dem hergestellten Filament komplexe Verbundstrukturen additiv fertigen zu können. Da bisher keine standardisierten Verfahren für diesen Herstellungsprozess existieren, ist es wichtig, die Verarbeitungsparameter der eingesetzten Materialien zu kennen. Diese Masterarbeit soll einen Beitrag dazu leisten und dabei helfen, den Werkstoffparameter verschiedener Faserrovings "Permeabilitätßu bestimmen. Für diesen Zweck wird ein Messgerät, ein Permeameter zur Bestimmung der Permeabilität entwickelt und gebaut. Für die Entwicklung des Messgeräts müssen die theoretischen Grundlagen zu den Einflussgrößen auf die Auslegung eines Permeameters bekannt sein.

Um dieses Grundwissen in den Entwicklungsprozess zu integrieren, werden in den folgenden Unterkapiteln die als für diesen als relevant erachteten Themen behandelt. Zunächst werden die Verbundwerkstoffe mit thermoplastischer Matrix allgemein hinsichtlich ihrer Vor- und Nachteile gegenüber duroplastischen Matrixsystemen betrachtet (Kapitel

2.1) und die wichtigsten Parameter und Prozessschritte bei der Verarbeitung erarbeitet. Daraufhin wird der Stand der Technik zum Herstellungsprozess von endlosfaserverstärktem Filament für die additive Extrusion vorgestellt (Kapitel 2.2). Insbesondere das im Institut für Systemleichtbau entwickelte Fertigungsverfahren wird hierbei betrachtet, da die Erkenntnisse dieser Masterarbeit für die Weiterentwicklung dieses Prozesses genutzt werden sollen. Im Folgekapitel 2.3 wird ausgehend von der Definition der Permeabilität über die Möglichkeiten die Permeabilität zu messen und zu berechnen bis hin zu den Grenzen des vorgestellten Permeabilitätsmodells nach D'Arcy ein umfassendes Wissensfundament gelegt. Die bis dahin erarbeiteten theoretischen Grundlagen werden als die relevanten Einflussgrößen auf die Auslegung eines 1D-Permeameters zusammengefasst (Kapitel 2.4).

Abschließend wird die zu lösende Problemstellung, welche sich aus der Aufgabenstellung und aus den Erkenntnissen der theoretischen Grundlagen ergibt, genannt und in eine Zielsetzung umformuliert. Auf der Basis dieser Zielsetzung findet nachfolgend die Entwicklung des 1D-Permeameters statt.

## 2.1 Verbundwerkstoffe mit thermoplastischer Matrix

Im Faserverbund werden kontinuierlich faserverstärkte Thermoplaste als Verbund aus gerichteten, kontinuierlichen Fasern sowie einer thermoplastischen Matrix verstanden. Dabei wird die Matrix als eine polymere Imprägnierung Fasern definiert [3, 5]. Im allgemeinen Faserverbund besteht diese Matrix zumeist aus duroplastischen oder thermoplastischen Materialien [6]. Ihre Hauptfunktion liegt darin, äußere Kräfte in die Fasern einzuleiten, sie von Faser zu Faser zu übertragen und somit die Fasern in ihrer Position zu stabilisieren, um eine Verformung des Bauteils zu verhindern [6]. Zusätzlich fungiert die Matrix als Schutzschild für die Fasern, indem sie sie vor schädlichen Einflüssen von außen schützt [6]. Dies unterstreicht die Bedeutung guter thermischer, physikalischer und mechanischer Eigenschaften für die Qualität der Matrix [6].

Ein weiterer Aspekt ist die Handhabbarkeit und Verarbeitbarkeit des Matrixwerkstoffs während des Fertigungsprozesses. Dieser ist von entscheidender Bedeutung für die Qualität und Leistung des FKV's [6]. Eine gute Verarbeitbarkeit trägt zu einer gleichmäßigen Benetzung der Fasern durch die Matrix bei, führt folgend zu einer zuverlässigen Bindung zwischen den beiden Komponenten und verbessert so die strukturelle Integrität des FKV's [3, 6]. Darüber hinaus wird durch die Verarbeitbarkeit die Möglichkeit der kontrollierten Faserausrichtung und so wiederum die mechanischen Eigenschaften des Werkstoffs beeinflusst [3, 6]. Eine reproduzierbare Verarbeitbarkeit ermöglicht zudem

eine gleichbleibende Qualität der hergestellten Teile und trägt zur Effizienz des Herstellungsprozesses bei, indem sie die Produktionszeit verkürzt und die Kosten senkt [3, 6]. Die Möglichkeit zur Nachbearbeitung und Reparatur von FKV hängt ebenfalls von der Verarbeitbarkeit der Matrix ab [3, 6]. Die Eigenschaften der Matrix unterscheiden je nach Einsatzmaterial. Faserverbundwerkstoffe mit thermoplastischer Matrix besitzen mehrere Vor- und Nachteile gegenüber Verbundwerkstoffen mit duroplastischer Matrix [7].

Zu den Vorteilen in der Verarbeitung von Verbundwerkstoffen mit thermoplastischer Matrix gehören die folgenden Punkte:

- Effizienz: Es wird keine Zeit für eine Aushärtungsreaktion benötigt, dadurch ist die Dauer des Formgebungszyklus bei einer thermoplastischen Matrix geringer als bei einer duroplastischen Matrix [7].
- Schweißbarkeit: Bauteile können durch Erhitzen hergestellt und miteinander verbunden werden [3, 4, 7, 8].
- Recyclingfähigkeit: Bauteile können eingeschmolzen und recycelt werden [3, 4, 7, 8].
- Umformbarkeit: Durch Erhitzen lassen sich die Verbunde in neue Formen bringen [3, 4, 7, 8].
- Thermoplaste haben eine höhere Zähigkeit und Schlagfestigkeit als Duroplaste [3, 4, 7, 8].
- Bei einer thermoplastischen Matrix ist in vielen Fällen keine zusätzliche Kühlung erforderlich, da keine exotherme Aushärtungsreaktion stattfindet [7].

Dies lässt sich im Allgemeinen auch auf Verbundwerkstoffe mit thermoplastischer Matrix übertragen [7].

Zu den Nachteilen der thermoplastischen Kunststoffe als Matrixmaterial gehören folgende Punkte:

- Die Verarbeitungstemperaturen und Drücke sind in der Regel höher als bei Duroplasten [7, 9].
- Steife und zähe Thermoplaste haften in der Regel schlechter an den Fasern als teilweise gehärtete Epoxidharze [7].

In FKV-Fertigung mit thermoplastischer Matrix kommen je nach Einsatzgebiet Standardpolymere wie Polypropylen (PP), technische Thermoplaste wie Polyamid (PA), Polyethylenterephthalat (PET), Polybutylenterephthalat (PBT), Polycarbonat (PC) bis hin zu Hochleistungsthermoplasten wie Polyetherimid (PEI), Polyetheretherketon (PEEK),

Polyphenylensulfid (PPS) zum Einsatz [3]. Die häufigsten eingesetzten Verstärkungsfasern in FKV sind Glas- und Kohlenstofffasern [3].

Die thermoplastische Halbzeugherstellung lässt sich unter prozesstechnischen Aspekten in kontinuierliche, semi-kontinuierliche und statische Pressverfahren gliedern, die sich alle in eine Imprägnierungs-, Konsolidierungs- und Solidifikationsphase unterteilen lassen [10]. Die Eigenschaften des Halbzeugs werden durch die jeweiligen Materialeigenschaften sowie dem Prozess der Verarbeitung bestimmt [3, 9]. Dabei ist die größte Herausforderung der Halbzeugherstellung die Imprägnierung der Fasern mit dem Thermoplast [3, 9]. Da die Verarbeitungsviskosität von thermoplastischen gegenüber duromeren Harzsystemen in der Regel um den Faktor 100 höher liegt, wird eine verhältnismäßig hohe Temperatur und Druck für die Herstellung benötigt [3, 7, 9]. Die Prozesstemperatur ist dabei so gewählt, dass der Thermoplast eine Zustandsänderung vom festen in einen fließfähigen, niedrigviskosen Zustand durchläuft [3, 9].

Eine Systemdarstellung der Halbzeugherstellung ist in folgender Abbildung 2.1 in Anlehnung an [10] zu sehen.

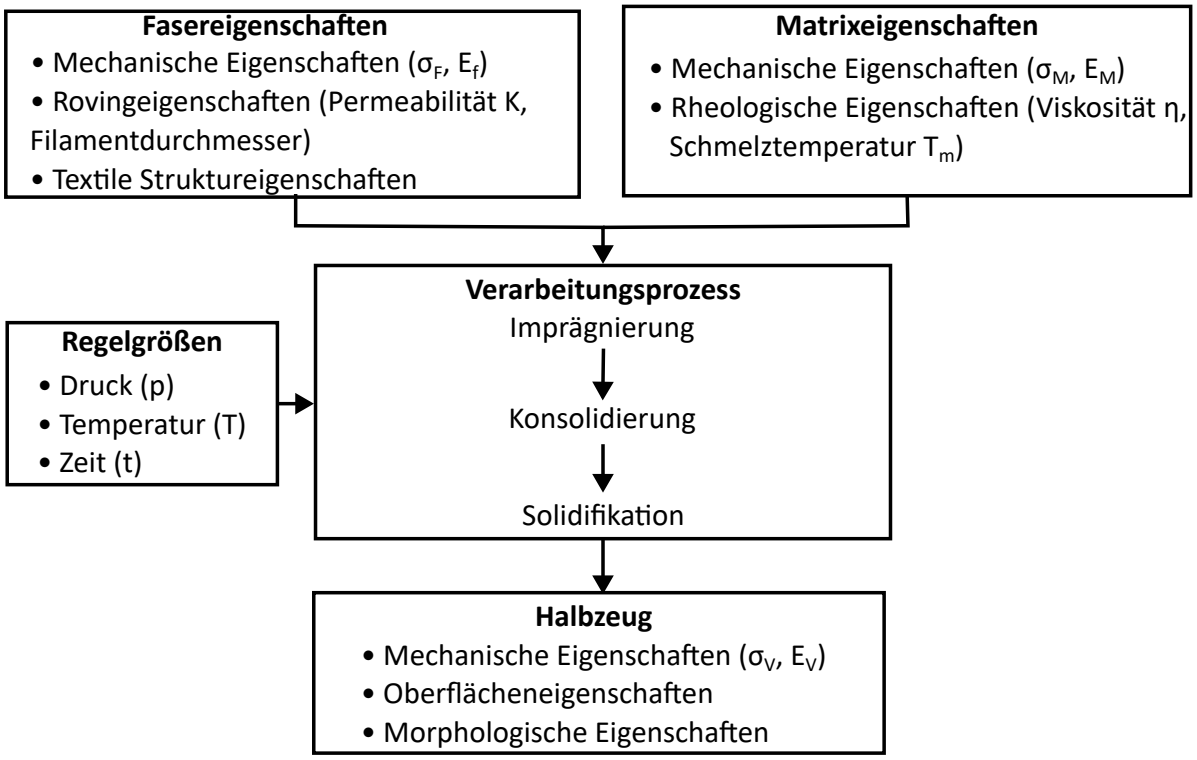



**Abbildung 2.1:** Grundlegende Systemdarstellung der Halbzeugherstellung [10]

Während des Verarbeitungsprozesses unterliegen Faser- und Matrixmaterialien den prozessgebenden Regelgrößen Druck (p), Temperatur (T) und Zeit (t), die die resultierenden Eigenschaften des Halbzeugs vorgebend beeinflussen [10]. Für die Imprägnierung

der Fasern mit dem Matrixmaterial wird das thermoplastische Matrixmaterial über die Schmelztemperatur ($T_m$) erhitzt und so in einen fließfähigen Zustand überführt [10]. Dieser sogenannte Tränkungsvorgang hat es zum Ziel, jedes einzelne Verstärkungsfilament mit Matrix zu benetzen und einen porenfreien Verbund herzustellen [10]. Die für den Tränkungsvorgang essenzielle Fließfähigkeit der Matrix hängt von der Matrixviskosität ($\eta$) ab, die wiederum von Temperatur ($T$), Zeit ($t$), Druck ($p$) und Schergeschwindigkeit ($\dot{\gamma}$) bestimmt wird [10]. Aufgrund der vergleichsweise hohen Schmelzviskositäten der thermoplastischen Matrixmaterialien (100-1000 $Pa \cdot s$) wird erst mithilfe einer parallelen Druckaufbringung der Benetzungs- und Tränkungsvorgang ermöglicht [10]. Durch diese Druckaufbringung dringt die schmelzflüssige Matrix in die Zwischenräume der Verstärkungsfilamente ein, verdrängt die Luft und benetzt die einzelnen Filamente unter Ausbildung einer Grenzfläche [10]. Für das Forschungsthema der vorliegenden Masterarbeit ist die Durchlässigkeit der Verstärkungsstruktur, die sogenannte Permeabilität ($K$), ein bestimmender Faktor für eine vollständige Imprägnierung [10].

Aufgrund der besonderen Relevanz der Permeabilität der Verstärkungsstruktur im Rahmen dieser Masterarbeit ist ihr ein eigenes Kapitel 2.3 gewidmet, weshalb sie an dieser Stelle nicht weiter definiert wird.

Während der Konsolidierungsphase wird unter Druck eine Verbindung zwischen den einzelnen Verstärkungselementen des Verbundmaterials hergestellt [10]. Dabei wirkt der Druck den elastischen Rückstellkräften in der Verstärkungsstruktur entgegen und verhindert so ein erneutes Wachstum von Lufteinschlüssen [10]. Nach Abschluss der Imprägnierungsphase und der Konsolidierungsphase liegt im besten Fall ein porenfreier Faserverbund vor, welcher abgekühlt und in einen festen Zustand überführt (Solidifikation) wird [10].

Dieses allgemeine Schema ist gültig für etablierte Herstellungsverfahren von FKV mit thermoplastischer Matrix, wie zum Beispiel bei der Platten- und Prepregherstellung [10]. Das Wissen um die Verarbeitungsparameter der in etablierten Verfahren eingesetzten Materialien und die Wirkweisen der einzelnen Stellgrößen ist essenziell zum Verständnis des in folgendem Kapitel 2.2 beschriebenen experimentellen Forschungsgebiet zum Herstellungsprozess von endlosfaserverstärktem Filament mit thermoplastischer Matrix für die additive Extrusion.

## 2.2 Herstellungsprozess von endlosfaserverstärktem Filament für die additive Extrusion, Stand der Technik

In Kapitel 2.1 wurden die Eigenschaften von FKV mit thermoplastischem Matrixmaterial sowie Vor- und Nachteile gegenüber der Verwendung von duroplastischem Matrixmaterial vorgestellt. Aus dem Vorteil der Umformbarkeit der Halbzeuge ergeben sich Möglichkeiten, die über die bisher etablierten Fertigungsverfahren wie z. B. Resin Transfer Molding (RTM) und dem Prepregverfahren zur Herstellung von Bauteilen in ihrer Endkontur hinausgehen. Ein vielversprechender Ansatz im Hinblick auf eine erweiterte Designfreiheit sowie eine Reduzierung der Werkzeugkosten wird am DLR am Institut für Systemleichtbau betrachtet [2]. Es wird untersucht, wie die additive Fertigung von endlosfaser verstärkten FKV einen Mehrwert für die Konstruktion und Fertigung von Leichtbaukomponenten aus FKV bieten können [2]. Die Technologie hat das Potenzial, eine breitere Anwendung von FKV zu fördern und eine höhere Ausnutzung der Materialleistung zu ermöglichen [2].

Die größte Herausforderung bei der Herstellung von FKV mithilfe der additiven Fertigung ist die Herstellung des Ausgangsmaterials in geeigneter Form (z. B. 3D-Druckfilament) sowie die Wahl der Prozessparameter zur zuverlässigen Herstellung von Verbundwerkstoffkomponenten mit hohen mechanischen Eigenschaften und reproduzierbarer Qualität [1]. Daraus ergibt sich ein Hindernis für eine breite industrielle Anwendung, da für additive Extrusionsverfahren wenig kostengünstiges 3D-Druckfilament von noch wenigen, in ihrer Anzahl jedoch zunehmenden Herstellern verfügbar ist [2].

Das Funktionsprinzip des am Institut für Systemleichbau entwickelten direkt Imprägnierungsverfahren basiert auf der Einleitung von hochfrequenten Schallwellen in eine thermoplastische Schmelze, die einen Faserroving umschließt und durchdringt [2]. Dabei wird ein von thermoplastischer Schmelze umschlossener Faserroving kontinuierlich durch eine Imprägnierkavität geführt, zu sehen in Abbildung 2.2 in Anlehnung an [2]. Innerhalb der Imprägnierkavität leitet die Sonotrodenspitze hochfrequente Schallwellen in die thermoplastische Schmelze ein. Die Schallwellen breiten sich in der Imprägnierkavität aus und verursachen hochfrequente Schmelzedruckschwingungen, welche die Imprägnierung und Verteilung der Fasern verbessern [2].Um einen direkten Kontakt mit der Sonotrodenspitze zu vermeiden, sind Faserpositionierpins erforderlich, die den Roving zentrieren und in Position halten [2]. Die endgültige Form des endlosfaserverstärkten Filaments wird durch eine formgebende Düse definiert [2].

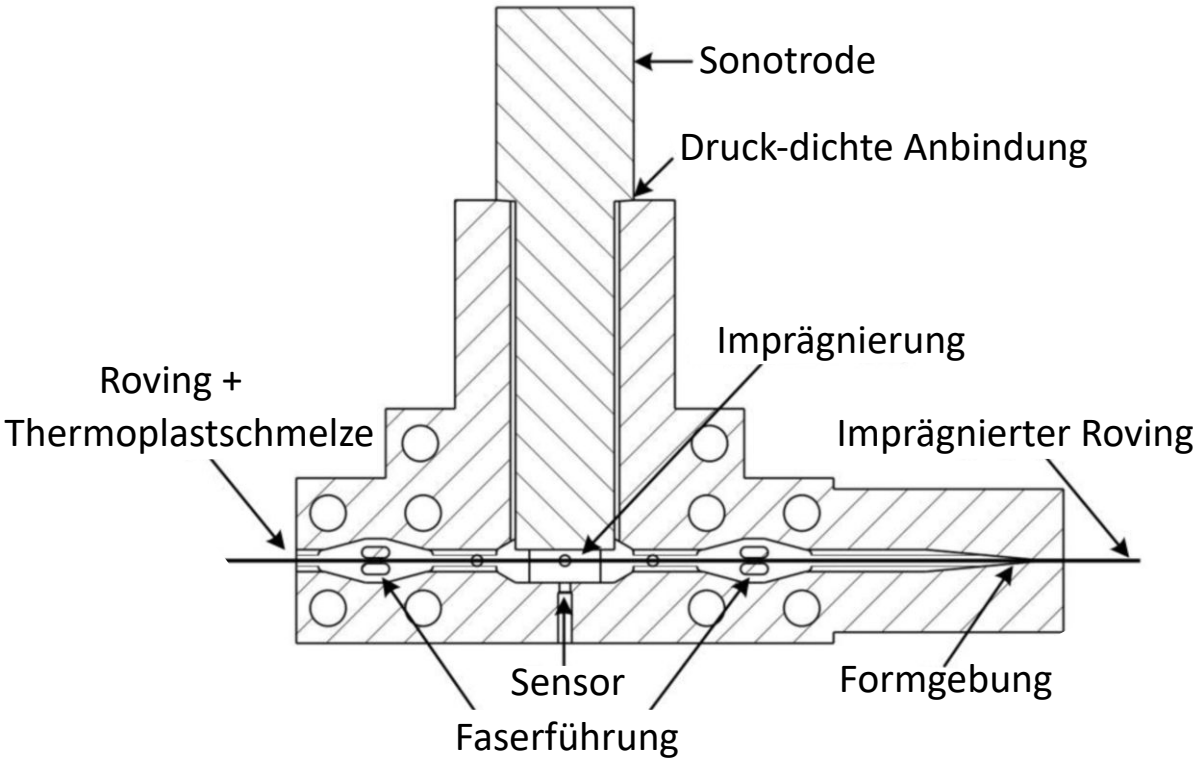



**Abbildung 2.2:** Schematische Darstellung einer Ultraschall-Imprägnierungs-Zelle [2]

Der wesentliche Vorteil eines solchen Prozesses besteht darin, dass er nicht selektiv auf verwertbare Rohstoffe ausgerichtet ist. Voraussetzung ist, dass der Roving von thermoplastischer Schmelze umgeben sein muss und ein ausreichender Abstand zwischen Sonotrodenspitze und Faserroving vorhanden sein sollte [2]. Dadurch ist die direkte kosteneffiziente Verarbeitung von leicht verfügbaren Thermoplast-Granulaten und trockenen Faserrovings mit hoher Einzelfilamentzahl möglich [2]. Zudem benötigt diese Art der Imprägnierung nur einen kleinen Bauraum. Die kompakte Bauweise erlaubt die Entwicklung einer Imprägnierdüse, die an bereits vorhandene Extrusionsanlagen adaptiert werden kann. Dadurch wird eine flexible Herstellung von endlosfaserverstärkten 3D-Druckfilamenten in großer Vielfalt ermöglicht [2].

## 2.3 Permeabilität in der Faserverbundfertigung

Für den Fertigungsprozess, insbesondere der Imprägnierung von Faserverbunden ist nicht allein die Kenntnis über das Viskositätsverhalten der Matrix von Bedeutung, sondern auch die charakteristische Materialkenngröße der Verstärkungsfasern, die Permeabilität. [3, 11]

### 2.3.1 Definition der Permeabilität nach D'Arcy

Die Permeabilität ist der zentrale Begriff, wenn es um die Betrachtung von Fließvorgängen in porösen Medien geht [11]. Die Begriffsherkunft der Permeabilität ist auf den französischen Wissenschaftler Henry D'Arcy zurückzuführen, der sich mit der Verteilung und dem Fluss des Grundwassers in Dijon beschäftigte [11]. Für seine Forschung ließ er mit einem konstanten Volumenstrom Wasser durch Sandschichten in einem Rohr fließen [11]. Mittels am Rohr angebrachter Steigrohre und deren Höhenunterschied bestimmte er den Druckabfall im porösen Medium, während er gleichzeitig den Volumenstrom des Wassers durch den Sand maß [11]. Der Grundaufbau dieser Methodik ist in Abbildung 2.3 in Anlehnung an [12] zu sehen.

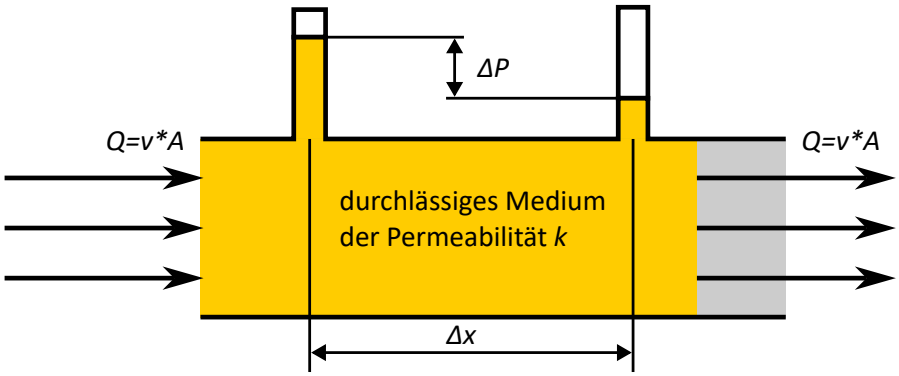



**Abbildung 2.3:** Grundaufbau der Permeabilitätsbestimmung [12]

Dieses Verfahren ermöglichte es, über eine Strecke $\Delta X$ eine Proportionalität zwischen der Fließgeschwindigkeit ($v$) bzw. dem Volumenstrom ($Q$) und der Treibkraft durch das Druckgefälle ($\Delta P$) experimentell festzustellen [11]. Das Untersuchungsergebnis bildet den Ausgangspunkt für das nach ihm benannte "D'Arcys Law"[11]:

$$Q = -\frac{KA_{eff}}{\eta} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta X} \tag{2.1}$$

Zusammengesetzt aus der dynamischen Viskosität $\eta$ der Flüssigkeit und der Permeabilität $K$ des durchströmten porösen Mediums stellt der Proportionalitätsfaktor $K/\eta$

einen Materialterm dar [11]. Die Permeabilität gibt hierbei ein Maß der *Durchdringbarkeit* eines porösen Feststoffes mit einer Flüssigkeit an [11]. In der Permeabilität werden so Einflüsse der meist komplexen Geometrie und Größe der Porosität ($\varepsilon$) auf den Fließwiderstand zu einem Kennwert zusammengeführt, der für jedes Material und jeden Materialaufbau einzeln bestimmt werden muss [11].

Mit der Umstellung von Gleichung 2.1 wird die Permeabilität in folgender Gleichung 2.2 definiert [11]:

$$K = -\frac{\Delta X}{\Delta P}\frac{\eta}{A_{eff}} \cdot Q \tag{2.2}$$

Allgemein gilt diese Beziehung für langsames (trägheitsfreies) Fließen eines Fluids mit niedriger Viskosität ($\eta$) durch ein poröses Medium [13].

Es gilt zu beachten, dass D'Arcys Law oft auf die Ausbreitung des Matrixsystems in der unimprägnierten Faserverstärkung angewendet wird [12]. Das Gesetz gilt allerdings lediglich für stationäre Strömungen im mit einer Flüssigkeit gesättigtem Medium [11, 12]. In der Modellierung der Flüssigimprägnierung führt diese Diskrepanz zu einer Vernachlässigung von Effekten, wie z. B. der Kapillarwirkung, die während des Imprägniervorgangs auftreten können[14, 15]. Eine Methode, die spezifischere Parameter wie die spezifische Oberfläche und die Porosität des Materials in die theoretische Berechnung mit einbezieht, ist die Konzeny-Carman-Gleichung [16]. Obgleich die Kozeny-Carman-Gleichung zur Berechnung der Permeabilität von faserverstärkten Materialien herangezogen wird, ist ihre direkte Anwendung in experimentellen Methoden aufgrund der Komplexität der miteinzubeziehenden Parameter begrenzt, insbesondere im Vergleich zu der breiteren und direkteren Anwendung von Darcys Gesetz in praktischen Experimenten [16]. Das Gesetz von D'Arcy hat sich in der experimentellen Bestimmung der Permeabilität als Fließmodell etabliert und ist in seiner Anwendbarkeit durch die Praxis belegt [17].

Für die Vorhersage des Fließvorgangs in einem textilen Faserhalbzeug müssen die Viskosität und die Permeabilität bekannt sein (Gleichung 2.1) [11]. Für die Ermittlung der Viskosität stehen etablierte, einfach handhabbare Messsysteme zur Verfügung [18]. Dabei ist die Temperaturabhängigkeit der Viskosität zu beachten [18]. Deutlich schwieriger gestaltet sich dagegen die Angabe von Permeabilitätskennwerten [12]. Für komplexere Faserarchitekturen (Gewebe, Gelege) lässt sich die Permeabilität bislang nur aus Versuchen mit bekannten Druckverteilungen, Viskositäten und Fließgeschwindigkeiten über das Gesetz von D'Arcy berechnen [11, 12]. Für verhältnismäßig einfache Geometrien können auch analytische Lösungen angegeben werden [19].

In der Praxis hat sich das Gesetz von D'Arcy als einfache, robuste, schnelle und hinreichend genaue Methodik zur experimentellen Berechnung der Permeabilität durchgesetzt [3, 20]. Die Grenzen des Modells nach D'Arcy werden in Kapitel 2.3.3 behandelt.

### 2.3.2 Permeabilitätsmessung und gängige Messverfahren

Die Messung der Permeabilität kann eindimensional (1D), zweidimensional (2D) oder dreidimensional (3D) erfolgen [11]. Die Dimension gibt die Ausbreitung des Messfluids in Richtung der Hauptachsen an. Dementsprechend wird bei der eindimensionalen Messung der Permeabilität der Fluss entlang einer Hauptachse betrachtet. Bei der zweidimensionalen Messung werden zwei Richtungen gleichzeitig untersucht, oft erfolgt bei diesem Verfahren der Anguss in der Mitte eines flächigen Faserhalbzeuges. Von dort findet eine elliptische Ausbreitung der Messflüssigkeit statt. Die Ausbreitung der Fließfront wird optisch erfasst und mithilfe des Gesetzes nach D'Arcy ausgewertet [3]. Bei der dreidimensionalen Messung wird entsprechen die Dickenpermeabilität, also die dritte Hauptachse, ergänzt [3]. Da das Forschungsthema dieser Arbeit die Entwicklung eines 1D-Permeameters ist, werden folgend die theoretischen Grundlagen der eindimensionalen Permeabilitätsmessung vertieft. Für die Messung der Permeabilität ist es wichtig, die mathematischen Grundlagen des eigentlichen Fließprozesses zu kennen, auf deren Basis zusammen mit den Messergebnissen die Permeabilität bestimmt werden wird.

Eine Übersicht der Messmethoden ist in Abbildung 2.4 in Anlehnung an [3, 21] zu sehen, hierbei sind die grau hinterlegten Felder die Verfahren mit der häufigsten Verwendung in der Praxis. Bei den Messmethoden ist zwischen transienten Messverfahren für die Bestimmung der ungesättigten Permeabilität und stationären Messverfahren für die Bestimmung der gesättigten Permeabilität zu unterscheiden, um auf Diskrepanzen hinweisen zu können, die bei der Bestimmung der Permeabilität zwischen Theorie und Anwendung bestehen [3, 21]. Hierbei wird im ungesättigten Fall die Messflüssigkeit in die trockenen Fasern eingeleitet und entspricht dem Imprägnierungsschritt in der Faserverbundfertigung [22, 23]. Bei der Bestimmung der gesättigten Permeabilität sind die Fasern bereits vollständig mit Flüssigkeit getränkt [22]. Aus diesem Grund existieren auch keine einfachen separaten Messverfahren für die mehrdimensionale Messung der gesättigten Permeabilität, da hierfür die Aufzeichnung einer Fließfront notwendig ist, die im stationären Fall nicht existiert [3]. Um mehrdimensionale, gesättigte Permeabilitätswerte zu erhalten, müssen mehrere eindimensionale Messungen in verschiedene Achsrichtungen durchgeführt werden [3].

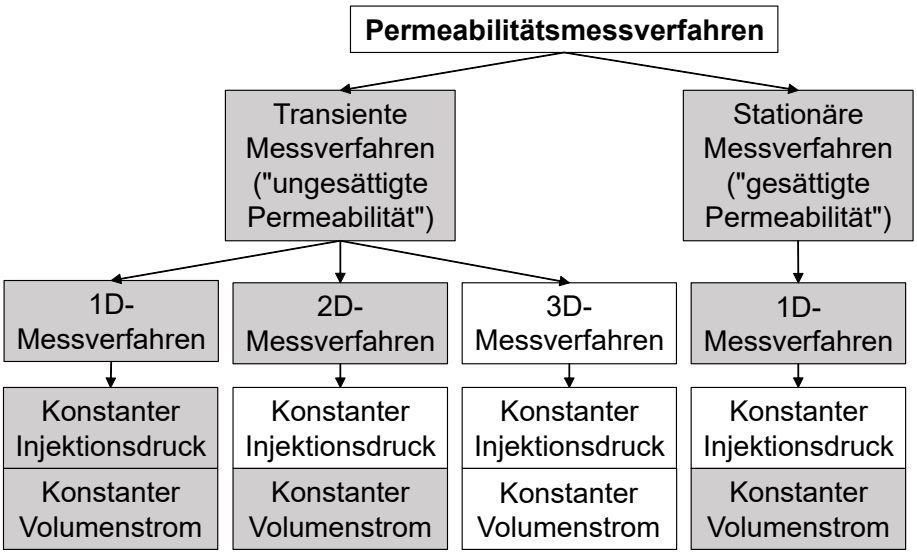



**Abbildung 2.4:** Übersicht der Permeabilitäts- Messmethoden [3, 21]

Eine eindimensionale Form des Gesetzes von D'Arcy für ein Permeabilitätsmessverfahren bei konstantem Volumenstrom ist in Gleichung 2.3 zu sehen [11, 12].

$$v = -\frac{K_x}{\eta} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta X} \tag{2.3}$$

Die Geschwindigkeit $v$ ist die Fließgeschwindigkeit des Fluids in X-Richtung. $\Delta X$ ist die Fließstrecke und $\Delta P$ ist die Druckdifferenz vom Start- und Endpunkt der gemessenen Strecke. Da die Querschnittsfläche des Fluidstroms um den eigentlichen Anteil des porösen Mediums, hier der Fasern, verringert ist, wird die Geschwindigkeit $v$ durch den Quotienten aus Volumenstrom $Q$ und der effektiven durchströmbaren Fläche des porösen Mediums $A_{eff}$ ersetzt (Gleichung 2.4). Gleichung 2.4 entspricht Gleichung 2.1 und wurde lediglich um den eindimensionalen Richtungsbezug für $K_x$ erweitert.

$$Q = -\frac{K_x A_{eff}}{\eta} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta X} \tag{2.4}$$

Die eindimensionale Permeabilität in X-Richtung ergibt sich somit zu Gleichung 2.5 [11]:

$$K_x = -\frac{\Delta X}{\Delta P} \frac{\eta}{A_{eff}} \cdot Q \tag{2.5}$$

Definiert ist die effektiv durchströmte Fläche als:

$$A_{eff} = A_{Form} \cdot \varepsilon \tag{2.6}$$

$A_{Form}$ steht für die angegossene Querschnittsfläche der Form. $\varepsilon$ ist die Porosität des zu durchströmenden Mediums [3].

$$\varepsilon = 1 - V_f \tag{2.7}$$

Im Falle, dass es sich bei dem zu durchströmenden porösen Medium um Fasern handelt, stellt $V_f$ in Gleichung 2.7 den Ausdruck des Faservolumengehaltes dar, der sich durch die geometrischen Eigenschaften der Kavität und der Fasern bestimmen lässt [3].

Es ist von Vorteil, die in Gleichung 2.4 dargestellte Form des Gesetzes von D'Arcy für den eindimensionalen Fall einzusetzen, wenn über eine Strecke $\Delta X$ der Druckgradient und der Volumenstrom bekannt sind [3]. In der praktischen Anwendung ist dies umzusetzen, indem in einem definierten Abstand zwei Drucksensoren und ein Volumenstromzähler im Versuchsaufbau integriert werden [3]. Alternativ kann der Volumenstrom auch über die in einem definierten Zeitfenster geflossene und gewogene Fluid-Masse bestimmt werden [3, 11].

Eine weitere Variante bietet die Integration von Gleichung 2.4, bei der die Druckdifferenz durch den Eingangsdruck und dem an der Fließfront herrschenden Druck bestimmt wird [3]. Diese Art der Berechnung ist sehr verbreitet, wenn optische eindimensionale Verfahren bei konstantem Injektionsdruck zur Permeabilitätsmessung genutzt werden [21]. Dabei wird die Streckendifferenz in gleicher Weise bestimmt und ersetzt den Volumenstrom durch die Fließgeschwindigkeit und die durchströmte Fläche. Durch Umstellung ergibt sich die folgende Gleichung 2.8 [3]:

$$x_{ff}^2 = \frac{2K_x}{\eta(1 - V_f)}(P_{ff} - P_{inj})t_{ff} \tag{2.8}$$

$x_{ff}$ steht für die Position der Fließfront, $P_{ff}$ und $P_{inj}$ sind der Druck an der Fließfront und an der Injektionsöffnung. $t_{ff}$ ist die vergangene Zeit bis zum Erreichen der aktuellen Fließfrontposition [21].

Aus diesen beiden Arten der Messung ergeben sich zwei Versuchsaufbauten. Ein Versuchsaufbau mit visuell offener Kavität, bei der sich der Fließfrontverlauf optisch dokumentieren lässt und ein Versuchsaufbau mit geschlossener Kavität. Beide Aufbauten teilen sich die Gemeinsamkeit, dass ins Innere der Form das Faserhalbzeug eingelegt, befestigt und die Form geschlossen wird [3, 17]. Dabei gibt der Bauraum, also das Innenvolumen der Form, den Faservolumengehalt für die Messung vor. Beide Aufbauten benötigen einen Angusskanal, von dem aus das Testfluid gleichmäßig ins Faserhalbzeug fließen kann. Ebenfalls muss bei beiden Aufbauten der Injektionsdruck am Eingang des Permeameters und der Druck an der Fließfront, der in der Regel der Umgebungsdruck ist, durch z. B. integrierte Drucksensoren gemessen werden können [3, 22].

Bei dem Versuchsaufbau mit optischer Fließfrontdokumentation kann z. B. eine durchsichtige Abdeckplatte aus Acrylglas (PMMA) zum Schließen der Form genutzt werden. Ist die optische Dokumentation nicht notwendig oder nicht gewünscht, wird eine intransparente Abdeckung gewählt.

Für die optische Erfassung der Fließfront muss ein geeignetes Aufzeichnungsgerät, z. B. eine Videokamera vorhanden sein. Für die Bestimmung der ungesättigten Permeabilität muss die Fließfront $x_{ff}$ nicht unbedingt direkt gemessen werden, sondern kann auch durch Integration des bekannten Volumenstroms (oder des Massenstroms unter Berücksichtigung der Dichte) berechnet werden, wenn die effektiv durchströmte Fläche $A_{eff}$ bekannt ist [12]. Dieses Vorgehen ist denkbar, wenn eine optische Erfassung der Fließfront nicht möglich ist, weil z. B. Prozessparameter wie hohe Temperaturen oder hoher Druck den Einsatz von Acrylglas ausschließen. Das Acrylglas darf sich während der Messung nicht wölben, weil sich sonst der Faservolumengehalt in der Form ändert und die Messergebnisse verfälschen würde [21].

Für die Bestimmung der gesättigten Permeabilität sind beide Aufbauten geeignet. Eine optische Erfassung der Fließfront ist nicht möglich, da das Faserhalbzeug bereits vollständig mit der Testflüssigkeit imprägniert ist. Es kann sich ein Steady-State Zustand einstellen, bei dem sich Druck und Volumenstrom nicht mehr ändern. Für diesen Zustand gilt weiterhin das Gesetz von D'Arcy [24].

Bei der Messung der Permeabilität wird in vielen Forschungsarbeiten ein Voreilen der Fließfront entlang der Kanten der Kavität beobachtet. Dieses Phänomen wird als „Race-Tracking"-Effekt bezeichnet [25]. Dieses Voreilen macht in vielen Fällen die Versuchsergebnisse unbrauchbar [26, 27, 28, 29] und sollte in der Betrachtung der Messauswertung berücksichtigt werden. Ein weiteres Phänomen wird als „Fiber Wash-Out" bezeichnet [3, 30]. Dabei handelt es sich um das axiale Verschieben der Gewebeschichten innerhalb der Form, das auftritt, wenn der Faservolumengehalt zu gering ist und gleichzeitig hohe Druckdifferenzen vorliegen [3, 30]. Es ist wichtig, Fiber Wash-Out zu verhindern, da das D'Arcy-Gesetz diese Faserverschiebung nicht berücksichtigt [3, 30]. Eine ausreichende Befestigung der Faserhalbzeuge ist daher zu gewährleisten.

### 2.3.3 Grenzen des Permeabilitätsmodells nach D'Arcy

Wenn der Vorgang der Flüssigimprägnierung eines textilen Faserhalbzeugs allein auf Basis des Gesetzes nach D'Arcy beschrieben wird, kann dies nur innerhalb bestimmter Parametergrenzen mit einer hinreichenden Genauigkeit erfolgen [12]. Dies ist darin zu begründen, dass in der Herleitung des Gesetzes von D'Arcy getroffene Vereinfachungen einige strömungsmechanische Aspekte (Kapillareffekte) und charakteristische

Eigenschaften von Flüssigkeiten (nicht-Newtonsche Fluideigenschaften)und textilen Faserverstärkungen (Anisotropie) nicht berücksichtigen [12].

Die Einsatzgrenzen des Gesetzes von D'Arcy (Gleichung 2.1) lassen sich aus folgenden Bedingungen ableiten:

1. Die Vernachlässigbarkeit d'Alembertscher Trägheitskräfte der Flüssigkeitsströmung durch Streichung nicht linearer Terme im Gesetz von D'Arcy muss gegeben sein [13, 21, 31]. Die Reynoldszahl gilt hier als Entscheidungskriterium und sollte unter 1 liegen. Eine Reynoldszahl kleiner 1 entspricht einer schleichenden Strömung [13, 21, 31]. Für die Fließgeschwindigkeit resultiert daraus eine Obergrenze, die abhängig von der Faserart, dem Faservolumengehalt sowie der Faserarchitektur ist und mit einer Grenze von 2 bis 3 cm/s abgeschätzt wird [13].

2. Für die Flüssigkeit wird ein newtonsches Verhalten, also die Unabhängigkeit der Viskosität von der Scherrate, vorausgesetzt [13, 32].

3. Der durchströmbare Querschnitt des Faserhalbzeugs darf nicht durch die Reibung und den Flüssigkeitsdruck beeinflusst werden. Dies setzt voraus, dass das Faserhalbzeug mechanisch starr ist [33, 34]. Es resultiert eine Obergrenze des applizierbaren Injektionsdrucks, der näherungsweise von den durch das Formwerkzeug ausgeübten Kompaktionskräften auf das Faserhalbzeug bestimmt wird [33, 34]. Für höhere Faservolumengehalte sind höhere Injektionsdrücke zulässig [33, 34].

4. Die durch Kapillarwirkung eingeleitete Benetzung der Fasern darf keinen nennenswerten Einfluss auf die durch den Injektionsdruck gesteuerte Ausbreitungsgeschwindigkeit haben. Hieraus lässt sich eine Untergrenze für den Injektionsdruck und damit die Fließgeschwindigkeit ableiten [12]. Im Regelfall sollte der Injektionsdruck nicht kleiner als wenige zehntel bar sein, die Untergrenze wird im Wesentlichen durch die Architektur des Faserhalbzeugs bestimmt [12].

5. Es findet eine frontale Ausbreitung der Flüssigkeit im Verstärkungsmaterial statt, wobei die Faserbündel (Rovings) im ungesättigten Fall vor der Ausbreitungsfront trocken und direkt dahinter vollständig getränkt sind [35].

6. Die Permeabilität bleibt auch nach der Benetzung mit einer Flüssigkeit gleich [12].

Zusätzlich deuten Fließstudien darauf hin, dass die Permeabilität sich im gesättigten und ungesättigten Material voneinander unterscheidet. Ob sie jedoch im gesättigten Zustand höher oder niedriger ist als im ungesättigten Zustand, wird in der Literatur diskutiert, da abweichende Ergebnisse vorliegen [36, 37, 38]. Dies gibt Grund für die Annahme, dass dieser Effekt material- und fließrichtungsabhängig ist und somit für jeden konkreten Fall einzeln bestimmt werden muss [21]. Dies stellt einen Widerspruch zur Bedingung, dass die Permeabilität auch nach der Benetzung gleich bleibt [12] dar und muss in den Messungen berücksichtigt werden.

### 2.3.4 Faserverbundspezifische Einflussgrößen auf die Permeabilität

Die Permeabilität stellt eine Kenngröße des Faserhalbzeugs dar und gilt als theoretisch prozessunabhängig. Dies bedeutet, dass für jede Materialstruktur (Faserform, Lagenaufbau, etc.) unabhängig voneinander die Permeabilität individuell erfasst werden muss [3]. Je nach Ausprägung des Faserhalbzeugs variiert die Permeabilität erheblich. Die wesentlichen Fasereigenschaften sind [12]:

- Größe, Anordnung, Anzahl und Form durchströmbarer Querschnitte
- Fadentyp: Roving, Zwirn, Garn
- Orientierung und Schichtung des Lagenaufbaus
- Nähte und Binder
- Oberflächenbeschaffenheit der Einzelfilamente (Schlichte, Finish)

Erste Messungen, die einen Überblick über die Einflüsse verschiedener Textilparameter auf die Permeabilität in FKV geben, werden in [22, 39, 40] beschrieben. Der die Permeabilität am stärksten beeinflussende Faktor ist nach [41] jedoch der Faservolumengehalt im durchströmten Volumen. Messungen zeigen, dass sich die Permeabilität von Faserhalbzeugen bei steigendem Faservolumengehalt exponentiell verringert [41].

Die Materialauswahl für FKV umfasst neben der Wahl des Faser- und Matrixsystems auch die Wahl der Faseroberflächenbehandlungen und Beschichtungen (Schlichten), welche in hohem Maße die Art und den Grad der Faser-Matrix-Wechselwirkungen bestimmen. Schlichten stellen eine kritische Komponente von Materialsystemen dar, welche bei Fertigungsverfahren wie dem Resin-Transfer-Molding (RTM) verwendet werden, sowohl unter dem Aspekt des Fließens als auch der Benetzung [4, 42]. Da die Versuchsplanung dieser Masterarbeit Versuche von 12K-Kohlenstofffaserrovings einmal mit und einmal ohne Schlichte vorsieht, wird der zu erwartende Einfluss der Schlichte auf die Permeabilität der ansonsten identischen Rovings vertieft.

Die Hersteller bieten Fasern mit Schlichten einer bestimmten Dicke und Zusammensetzung an, um die Leistung zu verbessern. Diese sind für die Verwendung mit bestimmten Matrixsystemen konzipiert. Die Wahl der Schlichte und des Matrixmaterials beeinflusst die Leistung und die Verarbeitung der Teile erheblich [42]. Faserschlichten weisen in der Regel eine Dicke zwischen 0,1 und 0,2 µm auf und sind zumeist Epoxidharze mit niedrigem Molekulargewicht [42]. Hochtemperaturbeständige Matrixsysteme,deren Verarbeitungstemperatur bei über 300 °C bis 400 °C liegt, wie die Thermoplaste Polysulfon (PSU) oder Polyetheretherketon (PEEK), aber auch bereits beim Einsatz von Polyamid 6.6 mit einer Verarbeitungstemperatur unter 300 °C werden temperaturbeständige Schlichten benötigt [4]. Es ist erforscht, dass sowohl die Leistungsfähigkeit der Bauteile als auch das Verarbeitungsverhalten durch die Schlichte erheblich beeinflusst werden [42]. Dass dadurch auch die Permeabilität beeinflusst wird, wird in einigen Arbeiten behandelt. Hierbei ist der Einfluss nicht eindeutig belegt und führt zu unterschiedlichen Forschungsergebnissen. Lundström et al. [17] finden keinen signifikanten Einfluss der Schlichte, während Karbhari und Palmese [42, 43], Steenkamer et al. [44] und Sharma et al. [45] einen Einfluss messen können. Die Schlichten sind für die Kombination mit ausgewählten Matrixmaterialien optimiert und ihre Zusammensetzung oft Firmengeheimnis, wodurch sich keine generellen Aussagen über ihren Einfluss auf die Fließeigenschaften bzw. Permeabilität treffen lassen [46]. Es wird jedoch gezeigt, dass der Einfluss der Schlichte ab einem Injektionsdruck von über 2 bar vernachlässigbar klein wird [40] und damit keine Rolle in den Versuchen dieser Masterarbeit spielt, da mit demselben Injektionsdruck gearbeitet wird wie bei dem am Institut für Systemleichtbau entwickelten Herstellungsverfahren für endlosfaserverstärktem 3D-Druck-Filament, welcher weit über 2 bar liegt [2].

## 2.4 Einflussgrößen für die Auslegung eines 1D-Permeameters

Nachdem die theoretischen Grundlagen umfassend erörtert sind, gilt es die für die Entwicklung eines 1D-Permeameters für Faserrovings in Kapitel 3 wesentlichen Einflussgrößen zu identifizieren. Die Einflussgrößen gibt Gleichung 2.5 direkt vor. Für die experimentelle Bestimmung der eindimensionalen Permeabilität muss der Druckgradient $\Delta P$ über eine definierte Strecke $\Delta X$ gemessen werden. Das 1D-Permeameter muss also Bauraum für zwei Drucksensoren und eine festzulegende Messstrecke bieten sowie druckbeständig und druckdicht bis zu dem festzulegenden Prozessdruck des bestehenden Fertigungsprozesses sein. Es wird vorausgesetzt, dass bei der Permeabilitätsmessung die effektiv durchströmte Querschnittsfläche $A_{eff}$ als Kennwert für die Porosität bekannt und unveränderlich ist. Für Faserrovings bedeutet dies, dass sie gleichmäßig in einer Kavität verteilt vorliegen und auch während der Messung in dieser Position verbleiben. Daraus folgt für das Permeameter, dass Vorrichtungen zur Befestigung des Faserstranges integriert sind und dass die Geometrie der Messstrecke $\Delta X$ bekannt sowie unveränderlich ist, weil ansonsten $A_{eff}$ während der Messungen nicht konstant bleiben würde. Aus Gleichung 2.5 ergibt sich weiterhin die Notwendigkeit, eine konstante Viskosität $\eta$ zu gewährleisten. Dafür muss das eingesetzte Testfluid konstant auf einem Temperaturniveau gehalten werden. Da in den Versuchen dieser Masterarbeit mit schmelzflüssigen Thermoplasten gearbeitet wird, sind dafür Temperaturen bis hin zu 400 °C möglich. Dementsprechend hitzebeständig muss das 1D-Permeameter ausgelegt sein und die Möglichkeit bieten, Wärme einzubringen und zu messen.

Aufgrund der vergleichsweise geringen Permeabilitäten der in der Praxis verwendeten Faserhalbzeuge sind die erzielbaren Massen- bzw. Volumenströme gering und daher schwierig zu messen [21]. Dieses Problem lässt sich mit verschiedenen Maßnahmen abmildern. Die Beschränkung der Messlänge, besonders bei Messungen der Permeabilität in der Ebene des Halbzeugs sowie die Verwendung einer großen durchströmten Querschnittsfläche sind geeignet, den Volumenstrom zu erhöhen [21]. Die Verwendung eines niedrigviskosen Ersatzfluids ist ebenfalls gemäß dem Stand der Technik zu empfehlen [21].

# 3 Entwicklung und Bau eines 1D-Permeameters

In Kapitel 3 wird die Entwicklung des 1D-Permeameters zur Messung der eindimensionalen Permeabilität in UD-Faserrovings umfassend beschrieben. Die Entwicklung folgt dabei den Grundsätzen des Entwickeln und Konstruieren technischer Produkte nach der VDI-Richtlinie VDI 2221 [47].

Die Richtlinie VDI 2221 umfasst in ihrer Methodik insgesamt sieben Arbeitsschritte. Jeder Schritt beinhaltet eine Aufgabe, von der ausgehend Unterlagen (Arbeitsergebnisse) erarbeitet werden, die für die weitere Realisierung des Produktes erforderlich sind. Für die einzelnen Arbeitsabschnitte sind Prüf-, Bewertungs- und Auswahloperationen vorgesehen. Erfüllt ein Arbeitsabschnitt nicht die geforderten Kriterien, werden Iteration zum vorherigen Arbeitsschritt initiiert. Vor dem Hintergrund, dass zu Beginn des Entwicklungsprozesses eine begrenzte Anzahl an Informationen vorliegt und eine iterative Bearbeitung die Möglichkeit bietet, rückwirkend Arbeitsergebnisse zu verbessern. Das generelle Vorgehen, nach welchem sich auch die Führung der Unterkapitel in diesem Abschnitt richtet, ist schematisch in Abbildung 3.1 in Anlehnung an [47] dargestellt.

In jedem Unterkapitel wird die entsprechende Aufgabe erklärt, der Ablauf beschrieben und abschließend die jeweiligen Arbeitsergebnisse vorgestellt.

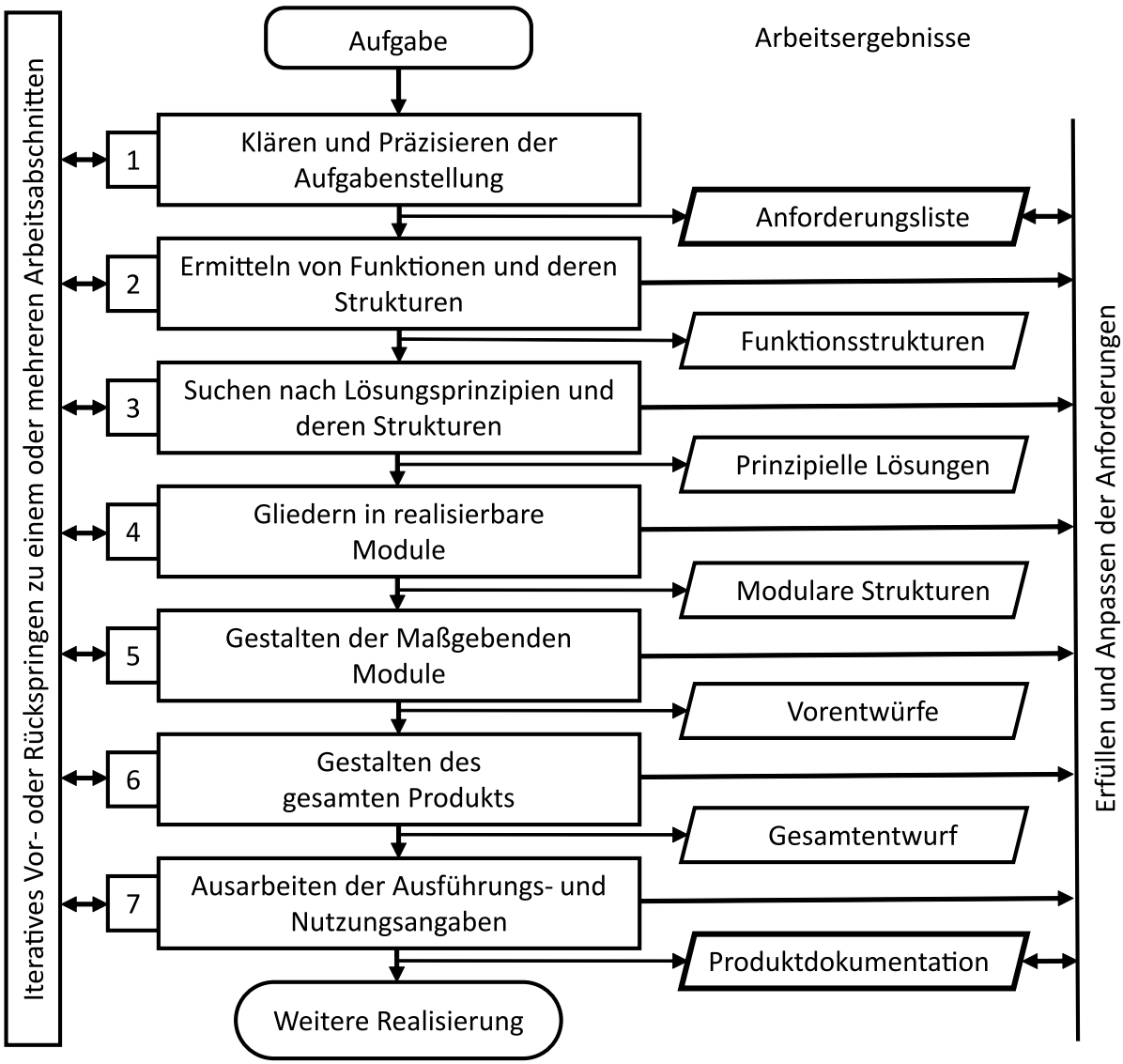



**Abbildung 3.1:** Allgemeines Modell der Produktentwicklung nach Richtlinie VDI 2221

## 3.1 Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung

In diesem Abschnitt wird die Aufgabenstellung dieser Masterarbeit konkretisiert. Alle verfügbaren Informationen werden gesammelt und bestehende Informationslücken ermittelt. Die Problemstellung wird mit einer Zielsetzung zur Lösung der Aufgabenstellung verknüpft. Die Dokumentation der gesammelten Informationen erfolgt in Form einer Anforderungsliste, die als verbindliche Grundlage für alle folgenden Arbeitsschritte dient. Erkenntnisse aus späteren Phasen der Produktentwicklung werden laufend ergänzt, um für jeden Abschnitt auf dem aktuellen Stand zu sein.

Wie der Titel dieser Masterarbeit bereits aussagt, ist die gestellte Aufgabe die Ent-

wicklung und der Bau eines 1D-Permeameters für Faserrovings. Die dafür notwendigen wesentlichen Einflussgrößen für die Auslegung eines Permeameters sind in Kapitel 2 identifiziert. Zuerst werden nun alle bekannten Informationen in Form einer Produktbeschreibung zusammengetragen. Anschließend werden diese in Anforderungen übersetzt und in einer Anforderungsliste dokumentiert. Es wird auf Informationen aus der Aufgabenstellung, dem in Kapitel 2 erarbeiteten Wissen und aus dem am DLR entwickelten Fertigungsprozess von 3D-Druck-Filament mit Endlos-Kohlenstofffaser-Verstärkung zurückgegriffen.

Ziel der vorliegenden Masterarbeit ist es, die Durchflussfähigkeit von hochviskosen thermoplastischen Polymeren durch Fasermaterial zu bestimmen. Dies leistet einen Beitrag für das Verständnis, wie die Imprägnierung der Kohlenstofffasern im hier entwickelten Fertigungsprozess für mit Endlosfasern verstärktem 3D-Druck-Filament abläuft und welche Parameter Einfluss in diesem Prozess nehmen. Dafür wird ein 1D-Permeameter für die in der bestehenden Anlage verwendeten 12K-Kohlenstofffaserrovings entwickelt und getestet. Die Umgebungsvariablen im Permeameter sollen dabei möglichst denen in der Fertigungseinheit entsprechen, um die lokalen Gegebenheiten bestmöglich zu imitieren.

Die grundlegenden Einflussgrößen für die Auslegung eines Permeameters sind in Kapitel 2.4 erarbeitet. Für die Messung der eindimensionalen Permeabilität im instationären und stationären Fall wird entweder der Volumenstrom oder der Druck, mit dem das Polymer durch das Messgerät fließt, gemessen und geregelt. Zusätzlich ist die Messung des Druckgradienten zu integrieren. Daraus ergibt sich auch, dass das Permeameter einem vorgegebenen Druck von 100 bar standhalten wird. Weiterhin setzt das Gesetz von D'Arcy [11] voraus, dass die Fasern ortsfest sind und aus dem Permeameter ausgewaschen werden.

Die weiteren für dieses Permeameter spezifischen Vorgaben, die ebenfalls die allgemeingültigen Voraussetzungen konkretisieren, sind an die im Fertigungsprozess des 3D-Druck-Filaments verwendeten Parameter gebunden. Für den Forschungsgebrauch ist es wichtig, dass die Eigenschaften verschiedener Fasermaterialien bei einem Faservolumengehalt von 50 % geprüft werden können. Zusätzlich ist vorgegeben, im selben Permeameter die Permeabilität verschiedener Fasermaterialien messen können. Eine weitere Vorgabe ist, dass die nach der Messung der Permeabilität mit Polymer imprägnierten Fasern optisch untersucht werden können, weshalb sie aus dem Bauteil entnehmbar sein müssen. Es darf kein flüssiges Polymer aus dem Messbereich innerhalb der Permeameters austreten, dementsprechende Vorkehrungen zur Gewährleistung der Dichtheit sind zu treffen.

Da geschmolzenes Hochleistungsthermoplast getestet wird, ist es erforderlich, dass das

Permeameter temperaturbeständig bis 400 °C ausgelegt ist und diese Temperatur permanent gehalten wird. Zusätzlich soll die Möglichkeit bestehen, Versuche unter Vakuum durchzuführen und eine Abziehkraft wie bei der Fertigung von 3D-Druck Filament zu simulieren. Des Weiteren muss das Permeameter in die bestehende Anlage integrierbar sein und die Möglichkeit bestehen, die Benutzer aufgrund der hohen Temperaturen vor versehentlicher Berührung des Gerätes zu schützen.

Aus diesen Beschreibungen lässt sich die folgende Anforderungsliste (Tabelle 3.1) für die Produktentwicklung des Permeameters ableiten. Soweit möglich werden den einzelnen Anforderungen auch die in Kapitel 2.3 erarbeiteten Variablen zugeordnet, die für die Erfüllung der jeweiligen Anforderung relevant sind.

| Auftrag-geber: DLR | Produkt: 1D-Permeameter für Faserrovings | | | | Datum: 13.12.23 Blatt-Nr.:1 |
|---|---|---|---|---|---|
| **Anforderungsliste** | | | | | Bearbeiter: Jannis Rebettge Revisionsnummer: 1-1 |
| **Gliederung** | **Nr.** | **Bezeichnung** | **Werte, Daten** | **Art** | **Quelle, Bemerkung** |
| Hauptmodul | 1 | Permeabilität messen | $K_x$ | F | Aufgabenstellung, Kapitel 2: Gundlagen |
| Hauptmodul | 2 | Faservolumengehalt von ca. 50 % | $V_f$ | F | Fertigungsprozess |
| Hauptmodul | 3 | Volumenstrom messen | $Q$ | F | Kapitel 2: Gundlagen |
| Hauptmodul | 4 | Ein- und Ausgangsdruck messen | $\Delta P$ | F | Kapitel 2: Gundlagen |
| Hauptmodul | 5 | Druckbeständigkeit | PN 100 | M | Fertigungsprozess |
| Hauptmodul | 6 | Unbewegliche Fasern | Befesti-gung | F | Kapitel 2: Gundlagen |
| Hauptmodul | 7 | Multifaser-kompatibilität | | F | Aufgabenstellung |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Hauptmodul | 8 | Zerstörungsfreie Entehmbarkeit der inprägnierten Fasern | | F | Aufgabenstellung |
| Gesamt-konzept | 9 | Dichtheit | Dicht bis PN 100 | F | Fertigungsprozess |
| Gesamt-konzept | 10 | Temperatur-beständigkeit | $T_{max}$ $\leq$ 400 °C | F | Fertigungsprozess |
| Hauptmodul | 11 | Temperatur halten | $T$ $\leq$ 400 °C | F | Fertigungsprozess, Kapitel 2: Gundlagen |
| Nebenmodul | 12 | Abziehkraft simulieren | | W | Fertigungsprozess, Kapitel 2: Gundlagen |
| Hauptmodul | 13 | Anbindung an bestehende Anlage | | F | Fertigungsprozess |
| Gesamt-konzept | 14 | Hitzeschutz für Anwendende | | M | |
| Hauptmodul, Nebenmodul | 15 | Vakkumfähig | | W | |

**Tabelle 3.1:** Anforderungsliste für ein 1D-Permeameter

## 3.2 Ermitteln von Funktionen und deren Strukturen

Das folgende Kapitel 3.2 befasst sich mit der auf der Hauptaufgabe des zu entwickelnden Produkts basierenden Realisierung der wesentlichen Teilfunktionen. Diese ermittelten Teilfunktionen werden geordnet zu Funktionsstrukturen verknüpft. Für die Ermittlung der Teilfunktionen wird zunächst ein Abstraktionsschema erstellt. Die Abstraktion dient zur Übersicht über alle Ein- und Ausgangsgrößen und gibt einen visuellen Überblick über die Hauptfunktion, wodurch mögliche Schnittstellen für Teilfunktionen offengelegt werden.

Die folgende Abbildung 3.2 stellt schematisch die für die Bestimmung der Permeabilität relevanten Ein- und Ausgangsgrößen, bekannt aus Kapitel2.3 sowie die Hauptkomponenten des Permeameters dar. Zu sehen ist das Permeameter in einer Black-Box Darstellung, die Messkomponente $Faserroving$ ist als feste Komponente mit eingezeichnet.

Die äußerste Umrandung stellt symbolisch das angelegte Vakuum dar. $\Delta X$ ist die für die Messung relevante Fließstrecke des Polymers durch die Fasern. Über die Messstrecke wird der Druckgradient $\Delta P$ gemessen. Als Ein- und Ausgangsgröße ist der Volumenstrom $Q$ des schmelzflüssigen Polymers zu sehen. $T$ ist die Temperatur, die im Permeameter gehalten werden muss, um die durchfließende Schmelze gleichmäßig viskos zu halten. $F$ ist die auf die Fasern aufgeprägte Kraft zur Simulation einer Abziehkraft in der Filamentfertigung.

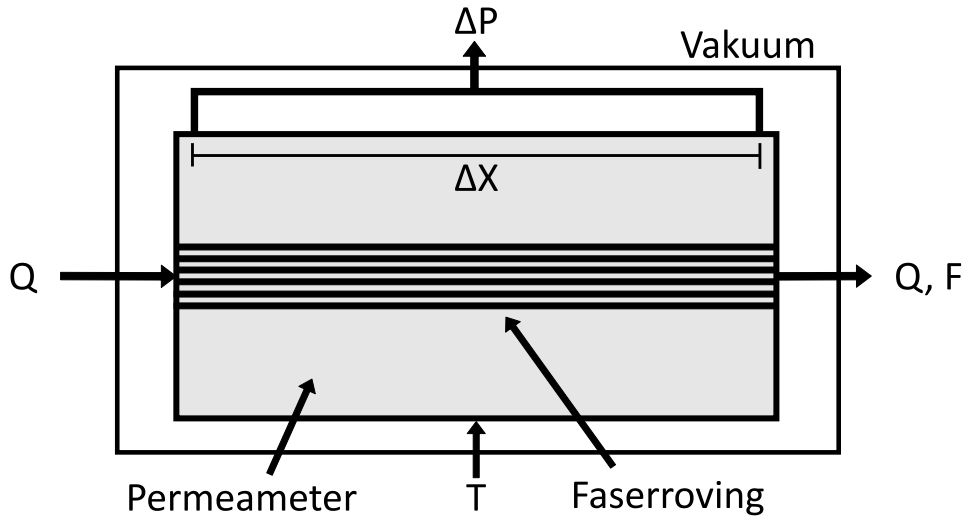



**Abbildung 3.2:** Hauptfunktionsschema des 1D-Permeameters, Ein- und Ausgangsgrößen

Die Hauptaufgabe ist die Messung der Permeabilität. Der Messung der Permeabilität lassen sich direkte Teilaufgaben zuordnen, die sich aus den Berechnungsmodellen in Kapitel 2.3 ableiten und in Abbildung 3.2 durch die relevanten Ein- und Ausgangsgrößen dargestellt sind. Neben denen zur Hauptaufgabe zuzuordnenden Teilaufgaben lassen sich Nebenaufgaben identifizieren, die nicht unmittelbar für die Messung der Permeabilität relevant, aber dennoch in der Anforderungsliste aufgeführt sind. Die Zuordnung ist folgender Tabelle 3.2 zu entnehmen. Die Grundvoraussetzung der Dichtheit und Temperaturbeständigkeit gilt für alle Komponenten.

| **Hauptfunktion:** | **Teilfunktionen:** | **Einflussgröße:** | **Einheit:** |
|---|---|---|---|
| Permeabilität messen | ·Druckgradient messen<br>·Volumenstrom messen<br>·Temperatur halten und messen<br>·Fasern einlegen und entnehmen<br>·Fasern befestigen<br>·Imprägnierte Fasern prüfen<br>·Anbindung an Anlage | Druck P<br>Volumenstrom Q<br>Temperatur T<br>Faservolumen $V_F$ | Pa<br>$\frac{m}{s}$<br>°C<br>$m^3$ |
| **Nebenfunktionen:** | **Teilfunktionen:** | **Einflussgröße:** | **Einheit:** |
| | ·Vakuum aufbringen<br>·Abziehkraft simulieren | | |

**Tabelle 3.2:** Zuordnung der Teilfunktionen

## 3.3 Suchen nach Lösungsprinzipien und deren Strukturen

In Kapitel 3.3 werden für die Teilfunktionen Lösungsprinzipien ermittelt und entsprechend der Funktionsstrukturen zu prinzipiellen Lösungen mit Wirkstruktur verknüpft. Um diesen Schritt übersichtlich darzustellen, eignet sich die Verwendung eines morphologischen Kastens [48, 49]. Hierbei werden in der Kopfspalte des morphologischen Kastens die Teilfunktionen untereinander eingetragen. In der jeweiligen Zeile werden mögliche technische Lösungen für die Teilfunktion aufgeführt. Die Lösungen orientieren sich an den allgemeinen Festanforderungen, die erfüllt sein müssen, um die Permeabilität zu messen. Sie werden an die in diesem konkreten Fall speziellen Anforderungen angepasst. Ebenfalls wird darauf geachtet, dass die in der bestehenden Anlage bereits eingesetzten Komponenten wiederverwendet und vorhandene Materialien genutzt werden, um zusätzliche Kosten zu vermeiden. Dabei handelt es sich um Drucksensoren für die Messung des Druckgradienten und um Thermoelemente und Heizpatronen zum Messen und Halten der geforderten Temperatur im Permeameter. Diese werden in Kapitel 3.5 während der Gestaltung des Hauptmoduls vorgestellt. Das Finden von Lösungsmöglichkeiten ist ein iterativer Prozess [47]. Die Lösungsmöglichkeiten wurden bewertet und in Tabelle 3.3 aufgeführt. Folgend werden die einzelnen Lösungsmöglichkeiten miteinander verglichen und überprüft, ob die Lösungen in Konkurrenz zu anderen Teilfunktionen stehen.

| Entwicklung: 1D-Permeameter | | | |
|---|---|---|---|
| **Teilfunktion:** | **Mögliche Lösungen:** | | |
| Druckgradient messen | Manometer vor und hinter dem Messkanal | Digitaler Sensor vor und hinter dem Messkanal | |
| Volumenstrom messen | Mittelwert der Austrittsmasse über Zeit | Ovalradzähler | Über Extruder regeln |
| Temperatur halten | Heißluft | Heizmanschette | Heizpatronen |
| Temperatur messen | Thermoelement | Infrarot Thermometer auf Oberfläche | |
| Imprägnierte Fasern prüfen | Imprägnierte Fasern ausschmelzen | Prüfstrecke durch entnehmbares Röhrchen | |
| Fasern einlegen und entnehmen | Permeameter teilen | In Permeameter einschieben | |
| Fasern fixieren | Fasern doppelt gelegt um Splint | Fasern außen einklemmen | Fasern innen einklemmen |
| Anbindung(bestehende Schnittstelle) | Schraubverbindung und Flansch | | |
| Dichtheit gewährleisten | Oberflächenqualität | Gummidichtung | |
| Temperatur-beständigkeit | Aluminium | Stahl | |
| Vakuum aufbringen | externe Harzfalle | Vakuumanschluss direkt am Permeameter | Permeameter komplett in Harzfalle |
| Abziehkraft simulieren | Kraftsensor/ Spannvorrichtung außerhalb des Permeameters | Feder | Kraftsensor/ Spannvorrichtung innerhalb der Harzfalle |

**Tabelle 3.3:** Morphologischer Kasten zum Versionsvergleich eines 1D-Permeameters

### 3.3.1 Messung des Druckgradienten

Die Grundlage zur Bestimmung der Permeabilität ist die Kenntnis des Druckgradienten über den Fließweg [11]. Zwei Verfahren eignen sich den der Druck vor und hinter dem Messkanal zu messen. Zum einen kann ein Manometer genutzt und die Druckwerte analog abgelesen werden oder aber ein digitaler Drucksensor genutzt werden. Ein Vorteil der analogen Manometer ist die Einfachheit der Implementierung. Ein Nachteil ist, dass auch die Dokumentation der Messwerte analog erfolgt, wodurch ein höherer Arbeitsaufwand entsteht.

Der Vorteil der Nutzung von Manometern ist der Nachteil von digitalen Sensoren, die eine Schnittstelle und Software benötigen, um die Messwerte dann aber automatisiert im Sekundentakt zu dokumentieren. Die Messfrequenz im Sekundentakt (1 HZ) ermöglicht eine ausreichend hohe Auflösung der Messergebnisse. Eine höhere Messfrequenz bringt keine Vorteile mit sich, da die stationäre Permeabilität mit Durchschnittswerten berechnet wird und sich bei einem voreingestellten konstanten Soll-Druck nach einer Einschwingphase ein steady-state Zustand einstellt, bei dem die Parameter gleich bleiben. Die Messfrequenz von 1 Hz wird als ausreichend hoch erachtet, um etwaige Effekte, die während der Versuche auftreten und die Permeabilitätsmessung beeinflussen, zurückverfolgen zu können. Für die Messung der ungesättigten Permeabilität kann es sinnvoll sein, die Messfrequenz zu erhöhen, da die Imprägnierung des Kohlenstofffaserrovings durch den kleinen Rohrdurchmesser nur eine kurze Zeit in Anspruch nimmt. Ein weiterer Vorteil der Nutzung digitaler Sensoren ist, dass sie im DLR vorliegen und dadurch Kosten- und Zeitersparnisse ermöglicht. Zusätzlich erfüllen sie die geforderten Anforderungen der Temperaturbeständigkeit.

Ein Nachteil beider Varianten ist die Notwendigkeit des Einschraubens in das Permeameter mit direktem Zugriff auf den Messkanal, wodurch das Risiko einer Leckage entsteht. Die Nutzung digitaler Sensoren wird zusammengefasst als geeigneter bewertet, da analoge Drucksensoren wie zum Beispiel Steigrohre nicht in das bestehende Messsystem integriert werden können.

### 3.3.2 Messung des Volumenstroms

Die zweite Relevanz ist die Kenntnis über den Volumenstrom des zu prüfenden Fluids [11]. Um diesen zu messen, sind drei Methoden denkbar.

Die erste Methode ist die Einbindung eines Ovalradzählers für hochviskose Fluide. Zwei ovale verzahnte Räder werden dabei vom durchströmenden Fluid angetrieben und aus der Drehgeschwindigkeit lässt sich der Volumenstrom bestimmen. Vorteile von Oval-

radzählern sind, dass sie für den Einsatz in hochviskosen Medien geeignet sind und der Volumenstrom zu jedem Messzeitpunkt bekannt ist. Nachteile sind, dass sie eine Zusatzkomponente darstellen, die an das Permeameter angebaut und dementsprechend auch beheizt werden müsste. In der Recherche nach geeigneten Ovalradzählern wurde kein Hersteller gefunden, der Zähler für eine Prozesstemperatur bis 400 $°C$ anbietet. Zusätzlich sind sie durch ihre Bauweise schwierig zu reinigen.

Die zweite Methode ist das Auffangen des geförderten Polymers über einen definierten Zeitraum. Aus der Masse und der Dichte des Polymers lässt sich das geförderte Volumen berechnen und zusammen mit der Zeit ergibt sich der Volumenstrom. Der Vorteil ist die Einfachheit dieser Methode. Bis auf eine Waage werden keine weiteren Geräte benötigt. Der Nachteil ist, dass nur ein Durchschnittswert bestimmt werden kann, es sei denn, es werden Zwischenwerte aufgezeichnet, z. B. durch eine messparallele Videoaufzeichnung und anschließender Auswertung der Zeitstempel im Messsystem.

Die dritte Möglichkeit, den Wert des Volumenstroms zu erhalten, ist die Regelung der Drehzahl des Extruders. Ist die Fördermenge des Fluids pro Umdrehung der Förderschnecke im Extruder bekannt, lässt sich der Volumenstrom genau einstellen. Aus Planungsgesprächen ist bekannt, dass die genaue Regelung des Volumenstroms über die Drehzahl des vorliegenden Extruders nur bedingt möglich ist.

Unter diesen Gesichtspunkten wird die Volumenstrombestimmung über die Wägung der aus dem Permeameter ausgetretenen Polymermasse und der Messzeit angestrebt.

### 3.3.3 Temperatur messen und halten

Für das Einbringen von Wärme zum Halten einer vorgegebenen Temperatur sind Heizelemente in Form von Hochleistungs-Heizpatronen, Heizmanschetten oder Heißluft geeignet. Heizpatronen können nahe dem Schmelzekanal in eine Bohrung gesteckt werden. Dies gewährleistet, dass dort ortsnah die Wärme eingebracht wird, um die Schmelze gleichmäßig viskos zu halten. Heizmanschetten bringen die Wärme von den Außenrändern ein. Beide Varianten müssen extern gesteuert werden. Der Einsatz von Heißluft aus z. B. einem Heißluftföhn ist sehr einfach umzusetzen. Allerdings dringt die Wärme beim Einsatz von Heißluft nicht gleichmäßig bis zum Schmelzekanal vor. Zusätzlich ist diese Methode ineffizient durch den hohen Energieverbrauch teurer als die anderen Lösungen. Heizmanschetten und Heizpatronen stehen im DLR zur Verfügung.

Da Heizpatronen vergleichsweise hohe Temperaturen erreichen können und über Bohrungen im Bauteil leicht zu integrieren sind, werden sie als favorisierte Lösung betrachtet.

Für die Regelung der Temperatur ist es notwendig, sie zu messen. Hierfür bietet sich die

Integration von Thermoelementen sowie die Messung mithilfe eines Infrarotthermometers an der Oberfläche des Permeameters an. Für den Einsatz eines externen Infrarotthermometers spricht die Einfachheit der Nutzung. Dagegen spricht, dass es lediglich die Temperatur an der Oberfläche misst. Ein Thermoelement misst die Temperatur im Bauteilinneren nah an dem für den Versuch relevanten Messkanal. Über eine gemeinsame Schnittstelle übergeben Thermoelemente die Temperatur an die Regelung der Heizpatronen. Geeignete Thermoelemente liegen im DLR vor und werden aufgrund der genannten Vorteile als die bessere Lösung gewählt.

### 3.3.4 Imprägnierte Fasern prüfen

Eine Vorgabe, die über die Messung der Permeabilität hinaus geht, ist, dass die imprägnierten Faserrovings nach der Messung zerstörungsfrei entnommen werden können, um sie weitergehend zu untersuchen (z. B. mit einem Mikroskop).

Dies kann durch ein vorsichtiges Anschmelzen der äußersten Schicht und Herauslösen des Verbundes umgesetzt werden. Hierbei leidet jedoch die Qualität der Probekörper und es entsteht ein unvollständiges Messbild.

Eine weitere Möglichkeit ist es, die Fasern über die gesamte Fließstrecke durch einen Einleger vom Hauptkörper des Permeameters zu trennen, welcher nach den Permeabilitätsmessungen komplett entnommen und zusätzlichen Prüfungen unterzogen werden kann. Vor dem Hintergrund, dass sich das übergeordnete Projekt mit der Herstellung von Filament für die additive Fertigung befasst, bietet es sich an, eine runde Form für diesen Kanal zu wählen. Dies kann z. B. ein Metallrohr sein, durch das die Fasern geleitet und in das Permeameter eingelegt wird.

Die zweite Lösungsmöglichkeit wird als geeigneter bewertet.

### 3.3.5 Faserrovings einlegen und entnehmen

Die Faserrovings müssen vor der Messung in das Permeameter eingelegt und danach auch wieder entnommen werden. Hierfür muss das Permeameter entweder orthogonal zur Messstrecke in X-Richtung geteilt werden oder aber direkt durch den Mess-/ Schmelzekanal eingefädelt werden. Die Teilung des Permeameters in zwei Hälften ermöglicht eine bessere Handhabung nach der Messung als beim geschlossenen Messgerät. Das Einlegen und Fixieren der Fasern sowie die Entnahme des Metallrohrs, gefüllt mit Faser und Matrix, ist im geöffneten Zustand umsetzbar, im geschlossen Zustand hingegen scheint es unter den bisher getroffenen Annahmen schwierig bis unmöglich. Die Teilung des Bauteils setzt voraus, dass die Dichtheit der gesamten Fläche gewährleistet wird.

### 3.3.6 Fasern fixieren

Die Faserrovings dürfen nicht aus dem Permeameter ausgewaschen ("Fiber-Washout") werden [3, 21]. Um dies zu gewährleisten, ist eine Fixierung der Bündel notwendig.

Eine Möglichkeit ist es, die Fasern einzuklemmen. Hierfür existieren zwei Optionen: Die Fasern innerhalb oder außerhalb des Permeameters zu befestigen. Es ist von Vorteil, sie innen zu fixieren, da so keine weitere mögliche Leckage erschaffen wird. Nachteilig ist, dass die Klemmvorrichtung einen Hohlraum im Permeameter bildet und nach einer ersten Messung schwierig zu reinigen ist. Gegensätzlich verhält es sich mit der zweiten Option.

Eine dritte Option ist, 6K-Faserrovings mit vergleichbaren Eigenschaften zu nutzen und diese doppelt um einen Splint vor dem ersten Drucksensor innerhalb des Permeameters zu legen und diese im Messkanal so zu einem 12K-Roving zusammen zu führen. Dies ist konstruktiv einfach umzusetzen und beeinflusst die Dichtheit nach außen nicht. Allerdings ist zu befürchten, dass die Eigenschaften des zusammengeführten 6K-Rovings nicht genau denen des 12K-Rovings entsprechen. Wird ein 6K-Roving zusammengeführt, kommen die jeweils 6000 Fasern aus zwei verschiedenen Richtungen. Es treffen zwei Einzelstränge, einzelne Rovings auf die Schmelze und nicht nur einer, wodurch es wahrscheinlicher ist, dass die Schmelze zwischen den Rovings hindurch fließt [25]. Im zugrunde liegenden Fertigungsprozess findet ein einzelner 12K-Roving Einsatz.

Es wird angenommen, dass es einfacher ist, eine innen liegende Klemmung zu reinigen als bei einer außen liegenden Klemmung die Dichtheit zu gewährleisten, weshalb eine innen liegende Klemmung der 12K-Faserrovings gewählt wird.

### 3.3.7 Anbindung

Für die Anbindung an die bestehende Anlage existiert ein etabliertes System, welches verwendet wird. Dieses Anbindungssystem besteht aus einer Schraubverbindung mit Außengewinde, auf das eine Flansch aufgeschraubt wird. Ein zu diesem Flansch passendes Gegenstück wird auf das anzubindende Bauteil, hier das Permeameter, geschraubt. Die Flansche werden über eine Spannkette, druck- und leckagedicht miteinander verbunden.

### 3.3.8 Dichtheit gewährleisten

Wie bereits mehrfach in dem Lösungsprozess mit einbezogen, muss die Dichtheit des Permeameters nach außen auf der Eingangsseite des Fluids gewährleistet werden. An

der Schnittstelle zu der bestehenden Anlage wird dies durch das bereits erprobte System erfüllt. Die zu verwendenden Drucksensoren und deren Einbindung sind ebenfalls bereits erprobt und können konstruktiv übernommen werden. Für die Abdichtung der Teilungsfläche sind zwei Möglichkeiten denkbar. Zum einen die Dichtheit über eine umliegende Fläche mit einer sehr hohen Oberflächengüte, zum anderen über ein umliegendes Dichtungsmaterial zu erreichen. Jedoch sind nur wenige Dichtungsmaterialien so hitze- und druckbeständig, dass sie den geforderten Temperatur- und Druckanforderungen standhalten. Zusätzlich benötigt eine Dichtung eine exakte Maßhaltigkeit den filigranen Öffnungen im geteilten Permeameter entsprechend, um eine Bypassbildung (den Messkanal umgehend) zu vermeiden. Um dies auch direkt an dem vorgesehenen Metallrohr zu gewährleisten, ist ein Material für das Rohr zu wählen, das eine größere Wärmeausdehnung aufweist als das umgebende Material, aus dem das Permeameter gefertigt ist.

### 3.3.9 Temperaturbeständigkeit

Durch den hohen Wärmeeintrag in das Permeameter ist für dieses und alle damit verbundenen Komponenten eine vergleichsweise hohe Temperaturbeständigkeit notwendig. Dies wird für jede Komponente jeweils einzeln gewährleistet. Für das Permeameter selbst ist ein geeignetes Material zu wählen. Die Verwendung eines verzugsarmen, verschleißfesten Stahls, der bis 500 $°C$ warmbeständig ist, ist bereits für weitere Bauteile der Versuchsanlage erprobt und wird als Werkstoff für das Permeameter übernommen. Aluminium wird wegen der vergleichsweise geringeren Verschleißbeständigkeit ausgeschlossen.

### 3.3.10 Vakuum aufbringen

Eine mögliche Lösung zur Erfüllung der Nebenfunktion ein Vakuum aufbringen zu können, ist der Anschluss einer Vakuumpumpe direkt am Ausgang des Permeameters. Dies ist vergleichsweise einfach umzusetzen, birgt allerdings das Risiko, dass schmelzflüssiges Polymer in die Vakuumpumpe gelangt und diese beschädigt. Eine bessere Alternative ist die Integration einer Harzfalle zwischen Permeameter und Vakuumpumpe. Je nach Größe der Harzfalle kann das Permeameter auch vollständig in die Harzfalle konstruiert werden, dies bedeutet jedoch einen größeren Aufwand, da alle Ein- und Ausgänge abgedichtet werden müssten. Eine Harzfalle, die über eine Schnittstelle mit dem Permeameter verbunden wird, muss auch nur an dieser abgedichtet werden. Diese Lösung wird präferiert und für ein besseres Verständnis in Abbildung 3.3 visualisiert.

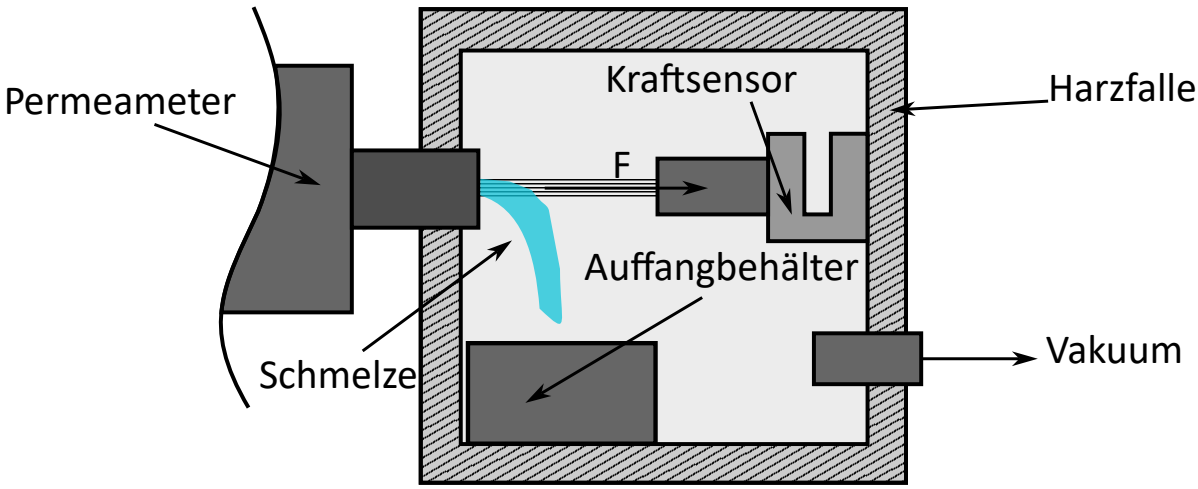



**Abbildung 3.3:** Permeameter mit Vakuumanbindung

### 3.3.11 Abziehkraft simulieren

Die zweite Nebenfunktion ist das Simulieren einer Abziehkraft während der Filamentherstellung. Hierfür wird eine Vorrichtung benötigt, die die Kraft auf die Fasern aufbringt und diese misst. Dies ist möglich durch den Einsatz einer Spannschraube, an der die Fasern außerhalb des Permeameters befestigt und mit einem Kraftsensorverbunden wird. Eine zusätzliche Option ist es, die Vorrichtung für das Aufbringen und Messen der Kraft in die Harzfalle zu integrieren, um sowohl mit als auch ohne Vakuumbedingungen arbeiten zu können. Auch die Umsetzung dieses Konzepts ist in Abbildung 3.3 dargestellt.

Der morphologische Kasten mit den ausgewählten grün markierten Lösungsmöglichkeiten ist in folgender Tabelle 3.4 zu sehen.

| **Entwicklung: 1D-Permeameter** | | | |
|---|---|---|---|
| **Teilfunktion:** | **Mögliche Lösungen:** | | |
| Druckgradient messen | Manometer vor und hinter dem Messkanal | Digitaler Sensor vor und hinter dem Messkanal | |
| Volumenstrom messen | Mittelwert der Austrittsmasse über Zeit | Ovalradzähler | Über Extruder regeln |
| Temperatur halten | Heißluft | Heizmanschette | Heizpatronen |
| Temperatur messen | Thermoelement | Infrarot Thermometer auf Oberfläche | |
| Imprägnierte Fasern prüfen | Imprägnierte Fasern ausschmelzen | Prüfstrecke durch entnehmbares Röhrchen | |
| Fasern einlegen und entnehmen | Permeameter teilen | In Permeameter einschieben | |
| Fasern fixieren | Fasern doppelt gelegt um Splint | Fasern außen einklemmen | Fasern innen einklemmen |
| Anbindung(bestehende Schnittstelle) | Schraubverbindung und Flansch | | |
| Dichtheit gewährleisten | Oberflächenqualität | Gummidichtung | |
| Temperatur-beständigkeit | Aluminium | Stahl | |
| Vakuum aufbringen | externe Harzfalle | Vakuumanschluss direkt am Permeameter | Permeameter komplett in Harzfalle |
| Abziehkraft simulieren | Kraftsensor/ Spannvorrichtung außerhalb des Permeameters | Feder | Kraftsensor/ Spannvorrichtung innerhalb der Harzfalle |

**Tabelle 3.4:** Morphologischer Kasten zum Versionsvergleich eines 1D-Permeameters mit Auswahlpfad

## 3.4 Gliedern in realisierbare Module

In diesem Abschnitt werden die in Kapitel 3.3 erarbeiteten Lösungsprinzipien in modulare Strukturen gegliedert, die den wesentlichen Aufbau des Permeameters und die Schnittstellen zu den anderen Systemkomponenten innerhalb des Systems, hier der bestehenden Anlage, aufzeigt. Dies dient dazu, dass einzelne Teilaufgaben entkoppelt von der Hauptaufgabe realisiert werden können.

Auf Grundlage der Funktionsstruktur und den erarbeiteten Lösungsmöglichkeiten lässt sich der Entwicklungsauftrag sinnvoll in drei Module aufteilen.

Zuerst das Hauptmodul, das Permeameter selbst. Es besteht aus zwei Teilen, weshalb eine Untergliederung in Hauptkörper-Permeameter und Deckel-Permeameter stattfindet. Als Hauptkörper wird die Hälfte betrachtet, in der die Faserrovings befestigt werden. Dieses erste Modul, das Hauptmodul, enthält die Sensorik für das Messen des Drucks und der Temperatur sowie die Vorrichtung zum Einbringen der Wärme.

Es ist teilbar gestaltet und lässt sich ausreichend dicht zusammenfügen, sodass kein geschmolzenes Polymer außerhalb der vorgesehenen Fließwege gelangt. Es ist baulich so gestaltet, dass ein Metallrohr eingelegt werden kann, durch das der Faserstrang geleitet wird. Dazu enthält es eine Klemmung zur Befestigung der Fasern im Inneren. Zusätzlich lässt es sich am Ein- und Ausgang dicht gegen Leckagen an die bestehende Anlage sowie die Nebenmodule anbinden.

Das zweite Modul konkretisiert die Nebenfunktion ein Vakuum aufbringen zu können. Dies beinhaltet die Umgestaltung einer Harzfalle, um sie an das Permeameter anschließen zu können. Über die Harzfalle wird eine Vakuumpumpe angeschlossen. Zusätzlich wird eine Anbindung für das dritte Modul zur Kraftaufbringung auf die Fasern integriert.

Das dritte Modul besteht aus dem Aufbau zur Simulation einer Abziehkraft während der Filamentfertigung. Dies soll sowohl innerhalb des zweiten Moduls, also innerhalb der Harzfalle, als auch unabhängig davon möglich sein. Es wird eine Schnittstelle geschaffen, die sowohl innerhalb als auch außerhalb der Harzfalle befestigt und betrieben werden kann. Somit hängen Modul 2 und Modul 3 miteinander zusammen, können aber auch unabhängig voneinander betrieben werden.

Ein schematischer Vorentwurf ist in folgender Abbildung 3.4 zu finden.

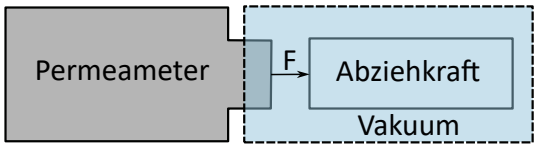



**Abbildung 3.4:** Modulschema

## 3.5 Gestalten der maßgebenden Module

In diesem Arbeitsschritt werden die Vorentwürfe der einzelnen Module vorgestellt. Nach VDI 2221 [47] wird hier die Basis für ein Gestaltungsoptimum geschaffen, auf der im nächsten Schritt die Feingestaltung erfolgt und die Module zum gesamten Produkt zusammengefügt werden. Der Konkretisierungs- und Vollständigkeitsgrad der stofflichen, geometrischen und informationstechnischen Festlegungen wird so weit erarbeitet, dass eben dieses Gestaltungsoptimum erkannt und ausgewählt werden kann.

### 3.5.1 Hauptmodul: Permeameter

Das erste zu gestaltende Modul ist das Permeameter, das Hauptmodul. Es erfüllt die Hauptfunktion und ist gleichzeitig der Ausgangspunkt für die Entwicklung der Nebenmodule. Dieser Schritt beginnt mit einer schematischen Abbildung 3.5 in der die einzelnen Komponenten zum Erfüllen der Teilfunktionen sinnvoll angeordnet werden. Die Legende zu der Nummerierung in Abbildung 3.5 ist in Tabelle 3.5 zu finden.

Für jede Komponente werden den in Kapitel 3.3 erarbeiteten Lösungsansätzen entsprechend konkrete Lösungen entwickelt. Zur Verdeutlichung werden die Lösungen anhand von Zeichnungen und CAD- Modellen beschrieben. Abschließend wird der gesamte Vorentwurf des Permeameters im CAD-Modell vorgestellt und anhand eines ersten Prototyps bewertet.

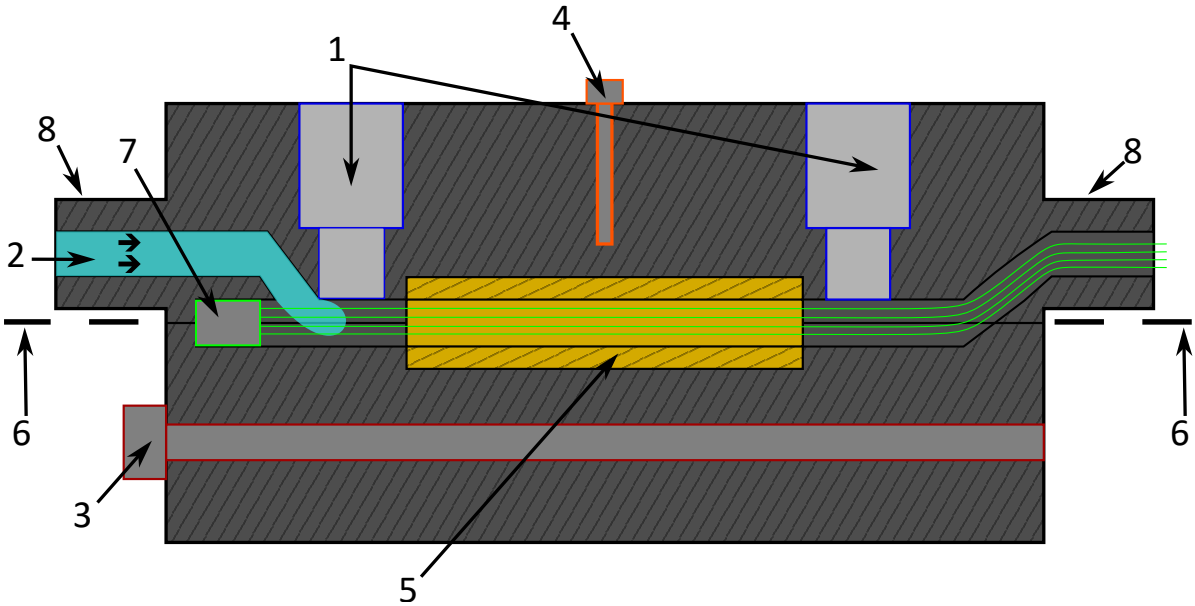



**Abbildung 3.5:** Anordnung der funktionalen Komponenten (nicht maßstäblich)

| | |
|---|---|
| 1 | Drucksensoren |
| 2 | Volumenstrom Polymer (Schmelzekanal) |
| 3 | Heizpatrone |
| 4 | Thermoelement |
| 5 | Entnehmbares Rohr |
| 6 | Horizontale Teilung |
| 7 | Faserklemmung mit Faserroving |
| 8 | Anbindung zu externen Komponenten |

**Tabelle 3.5:** Legende zu Abbildung 3.5

Die im Folgenden verwendete Nummerierung verweist auf die Nummerierung in Abbildung 3.5 und Tabelle 3.5.

Als Grundlage für die Anordnung wird das Permeameter als rechteckiger Block mit einem zentralen Schmelzekanal durch das schmelz-flüssige Polymer (2) fließt und von dem aus die Messungen durchgeführt werden, dargestellt. Abgehend vom Schmelzekanal werden die Drucksensoren (1) in einem festgelegten Abstand zueinander angeordnet. Um den Druck am Anfang und am Ende der Messstrecke aufzeichnen zu können, müssen sie direkten Zugang zum Schmelzekanal haben. Für die Gewährleistung einer gleichmäßigen Temperaturverteilung werden die Heizpatronen (3) möglichst nah und über die gesamte Fließstrecke entlang des Schmelzekanals integriert. Zum Messen der Temperatur wird der Messpunkt eines Thermoelements (4) nah am Zentrum des Permeameters platziert. Das entnehmbare Röhrchen (5) wird zwischen den Drucksensoren (1) positioniert, um einen möglichst großen Teil der Messstrecke abzudecken. Das gesamte Permeameter wird so angepasst, dass es horizontal teilbar (6) ist. Die Klemmung für die Faserrovings (7) wird so geplant, dass die Fasern im Inneren des Permeameters vor dem Beginn der Messstrecke befestigt sind und durch das Rohr (5) wieder aus dem Bauteil herausgeführt werden. Die Anbindungen zu den externen Komponenten (8) werden passend zu den bereits bestehenden Anlagenschnittstellen gestaltet.

Nach der Erarbeitung einer sinnvollen Anordnung für die einzelnen Komponenten folgt nun die Festlegung von geometrischen Abhängigkeiten. Diese Abhängigkeiten ergeben sich aus der Anordnung der Komponenten, mit bereits festgelegten Geometrien und den zu erfüllenden Anforderungen.

Da es sich bei den Drucksensoren (1), Thermoelementen (4) und Heizpatronen (3) um Bestandskomponenten handelt, geben diese entsprechende Konstruktionsmaße vor.

Die Heizpatronen und Thermoelemente nehmen hierbei keinen Einfluss auf den Bauraum des für die Messungen relevanten inneren Bereichs des Permeameters. Für sie werden

ihren Maßen entsprechend mehrere Öffnungen im Körper des Permeameters vorgesehen. Diese werden so eingebracht, dass sich sowohl Heizpatronen als auch Thermoelemente möglichst nah an der Messstrecke befinden, ohne den Schmelzekanal zu schneiden. Es werden zusätzliche Öffnungen vorgesehen, um auf mögliche Veränderungen im äußeren Aufbau vorbereitet zu sein und weiterhin eine Zugänglichkeit zu gewährleisten.

Anders verhält es sich bei den Drucksensoren. Da diese einen direkten Zugang zum Schmelzekanal (2) benötigen, gelten erhöhte Anforderungen an die Maßhaltigkeit, um weiterhin die Dichtheit zu gewährleisten. Die Sensoren werden eingeschraubt und schließen mit dem Rand des Schmelzekanals ab, wodurch sie die Mindestbreite des Schmelzekanals vorgeben.

Die Dimensionierung des Rohrs (5) wird durch den geforderten Faservolumengehalt von ungefähr 50 % innerhalb der Messstrecke bestimmt, er soll möglichst den Fertigungsbedingungen des beschriebenen, am SY entwickelten Fertigungsprozess entsprechen. Der Innendurchmesser des Rohrs, der notwendig ist damit ein Faservolumengehalt von ungefähr 50 % zu erreichen, lässt sich mithilfe der Fasereigenschaften über zwei Wege berechnen. Die verwendeten Kohlenstofffasern sind "HexTow AS7 Carbon Fibre"der Firma HEXCEL. Das Datenblatt mit den Fasereigenschaften findet sich im Anhang D.

Im Handel sind Metallrohre mit einem Innendurchmesser von 1,1 mm als Meterware erhältlich. Dies entspricht den Maßen des Schmelzekanals in der Fiber Insertion und gleicht damit den Fertigungsbedingungen im entwickelten Fertigungsverfahren. Der Faservolumengehalt beträgt circa 47 % .

Der Einsatz des Metallrohrs unterstützt die Vorgabe der Multimaterialkompatibilität. Jedes Fasermaterial in Roving-Form lässt sich im entwickelten 1D-Permeameter einlegen und prüfen. Die Voraussetzung hierfür ist, dass sich der Faserroving durch das Rohr schieben lässt und beim Einklemmen in der Faserfixierung nicht bricht.

Da das Permeameter über die Oberfläche der horizontalen Teilung abdichten soll, ist es wichtig, dass die Vertiefung in die das Rohr eingelegt wird, etwas größer als das Rohr ist. Dies bewirkt, dass die Dichtflächen direkt aufeinander und nicht auf dem Rohr aufliegen. Ein kleineres Rohr hätte das Risiko einer potenziellen Bypassbildung. Um dieses Risiko zu minimieren, wird ein Rohr aus einem Material mit einer höheren Wärmeausdehnung als das Material, aus dem das Permeameter selbst gefertigt ist, gewählt. Dies bewirkt, dass etwaige Spalte zwischen Rohr und Permeameter kleiner werden.

Die horizontale Teilbarkeit des Permeameters beeinflusst die Gestaltungsmöglichkeiten für die Faserklemmung, die Lage der Anbindung und den Verlauf des Schmelzekanals. Für den Grundentwurf wurden zwei Möglichkeiten in Betracht gezogen (Abbildung 3.6).

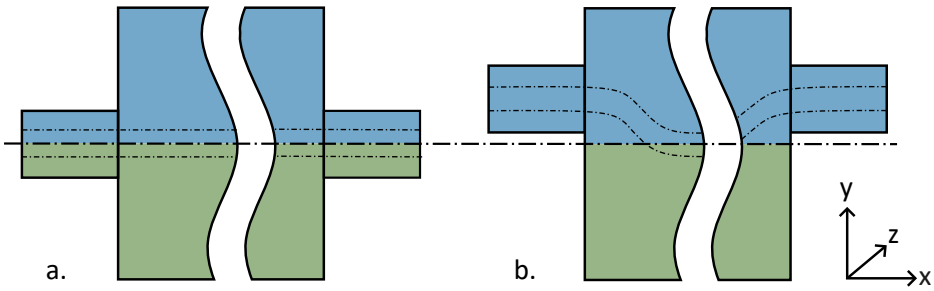



**Abbildung 3.6:** Grundentwurf Anbindung (a: Symmetrische Teilung, b: Anbindung mit Versatz)

In der linken in Abbildung 3.6 dargestellten Option (a.) ist eine symmetrische Anordnung von Schmelzekanal und der Anbindung vorgesehen, dies geht mit einer Teilung der Anbindung einher. Der Verbindungsmechanismus mit dem die externe Anlage angeschlossen wird, sieht jedoch keine Teilung der Anbindung vor und bringt keine Kraft mit Dichtwirkung orthogonal zu den Stirnflächen der Anbindung auf. Dies lässt befürchten, dass Leckagen in diesem Bereich auftreten werden. Eine symmetrische Anordnung bedeutet auch, dass die Faserklemmung nicht in einer Flucht mit dem Schmelzekanal und der Messstrecke erfolgen kann, sondern am Rand des Schmelzekanals mit einer Umlenkung der Fasern integriert werden muss (Abbildung 3.7(A.)).

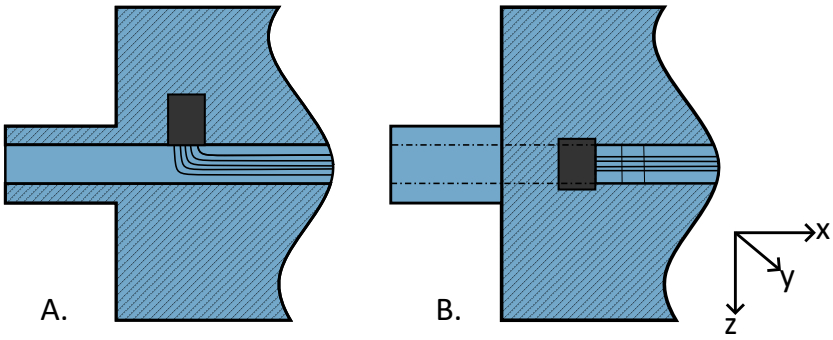



**Abbildung 3.7:** Faserbefestigung (A: Symmetrische Teilung, B: Anbindung mit Versatz)

Die rechte in Abbildung 3.6 dargestellte Option (b.) löst die soeben beschriebene Problematik, indem die Anbindungen am Ein- und Ausgang so versetzt werden, dass sie vollständig aus nur einer Hälfte des Permeameters entspringen. Die Anbindung muss nicht mehr geteilt werden und die Faserklemmung (Abbildung 3.7(A.)) kann in einer Flucht mit der Messstrecke erfolgen. Hierfür muss jedoch der Verlauf des Schmelzekanals, wie in Abbildung 3.6 (B.) dargestellt, angepasst werden. Ein relevanter Einfluss auf die Strömungseigenschaften des Polymers und dadurch veränderte Messergebnisse ist bei diesem Versatz nicht zu erwarten, da durch den Injektionsdruck die hydrodynamischen Kräfte ausreichen, die Schmelze durch die Kavität zu befördern [50].

Aufbauend auf die im Schema in Abbildung 3.5 festgelegte Anordnung der Komponenten und den anschließend aufgezeigten geometrischen Abhängigkeiten lässt sich das in Abbildung 3.8 dargestellte vorläufige CAD-Modell ableiten.

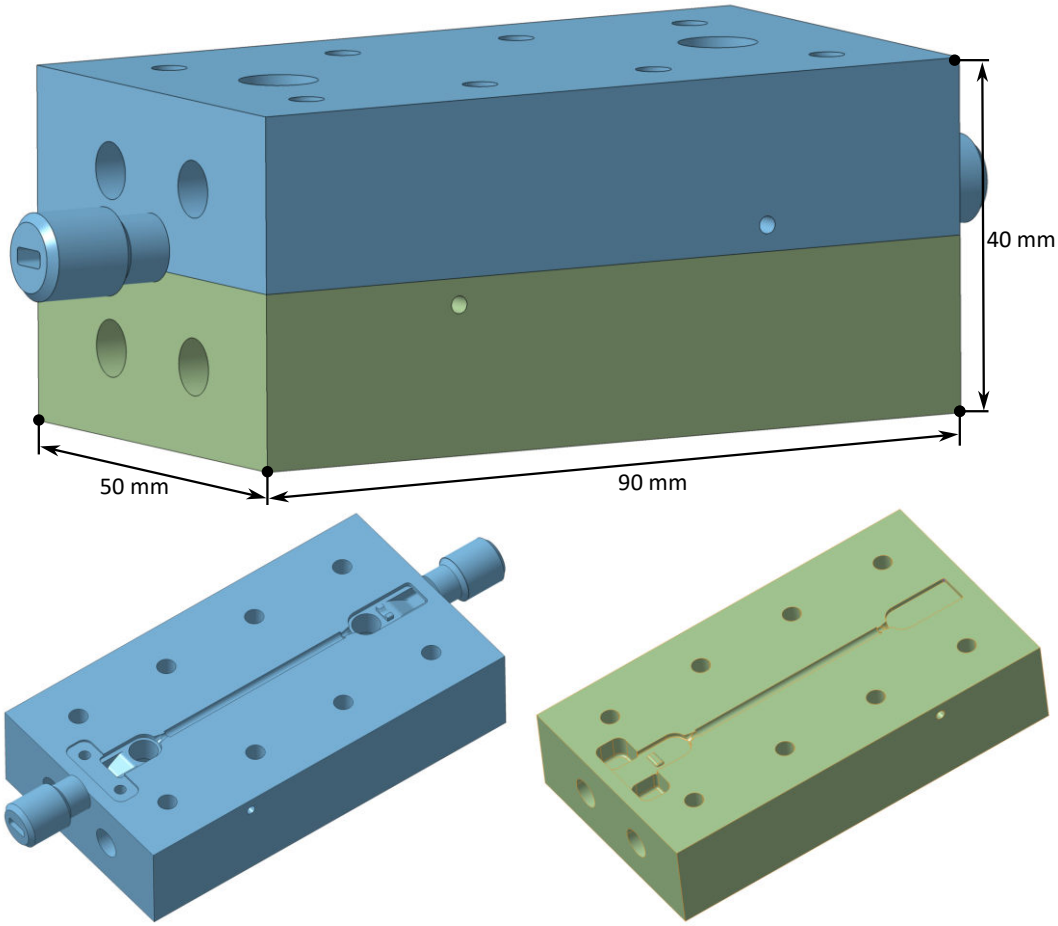



**Abbildung 3.8:** CAD-Modell: Vorentwurf Permeameter, Grundkörper (blau) und Deckel (grün)

Stirnseitig sind vier Öffnungen für die Heizpatronen zu erkennen. Diese Öffnungen sind durchgängig bis zur Rückseite des Permeameters, sodass von beiden Seiten bis zu vier Heizpatronen eingesetzt werden können. Längsseitig sind pro Hälfte des Permeameters jeweils zwei diagonal angeordnete Öffnungen für Thermoelemente zur Messung der Temperatur vorgesehen. Somit ergeben sich jeweils vier Optionen zum Einbringen der Wärme und zum Messen der Temperatur. In beiden Hälften sind jeweils acht durchgehende Bohrungen eingebracht. Durch diese können die beiden Bauteilhälften an den Innenflächen abdichtend miteinander verschraubt werden. Durch den versetzten Verlauf des Schmelzekanals lässt sich die Faserbefestigung in der zur Messstrecke passenden Höhe und Ausrichtung umsetzen, ohne dass das Faserbündel seitlich in den Schmelzekanal eingeführt und in Richtung der Messstrecke abgelenkt werden muss. Eine Detailansicht

ist in folgender Abbildung 3.9 zu sehen.

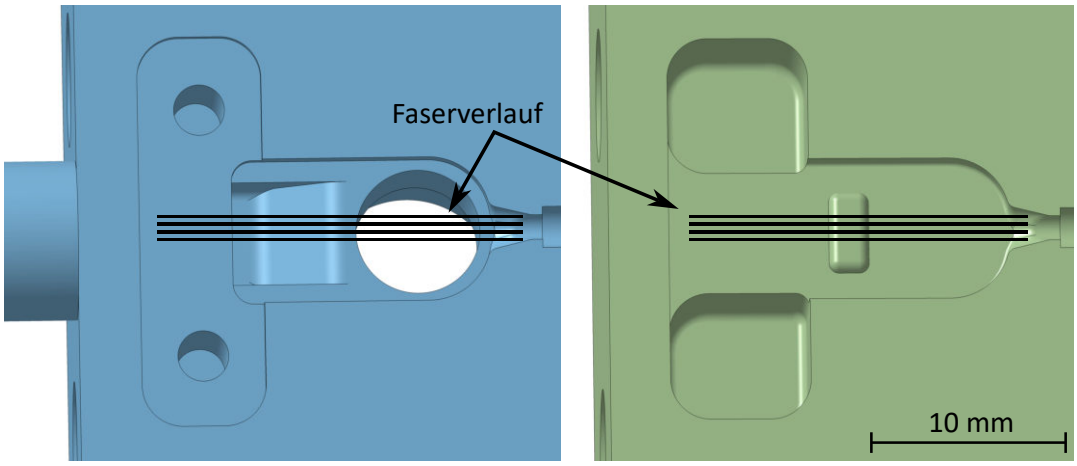



**Abbildung 3.9:** Detailansicht: Faserbefestigung

Die Befestigung besteht aus einer rechteckigen, zur Dichtfläche des Grundkörpers (blau) vertieften Fläche mit zwei Gewindebohrungen. Die Klemmung der Fasern erfolgt durch zwei Metallplättchen, die an die vertiefte Fläche angeschraubt sind und das Faserbündel zwischen sich einschließen. Im Deckel (grün) sind für diese Schrauben passende Aussparungen vorgesehen.

In Abbildung 3.9 ist exemplarisch eins der Klemmplättchen dargestellt (a.). Die Schnittansicht der Faserbefestigung (b.) wird mit dem Verlauf des Faserrovings zwischen Grundkörper und Klemmplättchen sowie zwischen den Klemmplättchen gezeigt. Durch den umgelenkten Verlauf und dadurch doppelte Klemmung des Faserrovings wird eine verbesserte Haftung der Fasern erwartet, wodurch ein Herausrutschen während der Versuchsdurchführung verhindert wird.

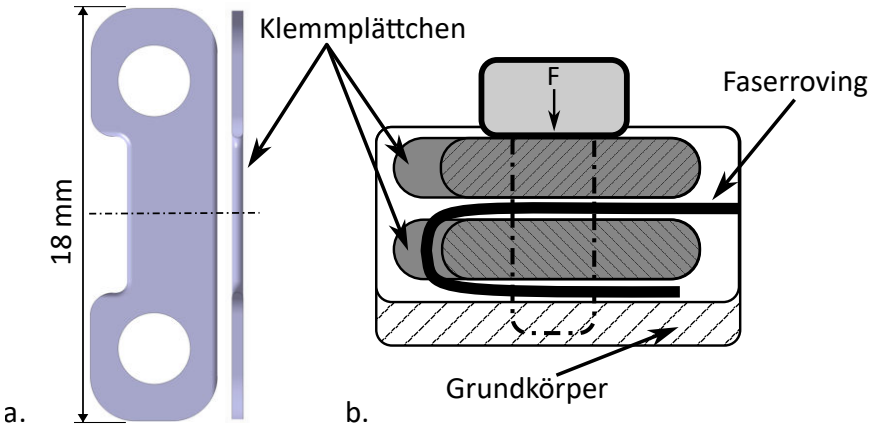



**Abbildung 3.10:** Befestigungsplättchen (a.), Schnittansicht Faserbefestigung (b.)

An zwei Stellen innerhalb des Permeameters werden die Fasern durch äußere Einflüsse abgelenkt. Vor Beginn der Messstrecke treffen Fasern und Polymerschmelze aufeinander. Die Fasern werden durch die schräg zuströmende Schmelze gegen den Deckel gedrückt. Hinter der Messstrecke werden die Fasern ebenfalls schräg abgelenkt, zusammen mit der Schmelze aus dem Permeameter hinaus geführt und zusätzlich von der optionalen simulierten Abziehkraft gegen den Grundkörper gedrückt.

Für die Zentrierung der Faserrovings innerhalb der Messstrecke sind Erhöhungen vorgesehen die die Ablenkung der Fasern innerhalb der Messstrecke begrenzen. Dementsprechend findet sich eine Erhöhung vor dem Beginn der Messstrecke im Deckel, um zu verhindern, dass die Fasern durch die eintretende Schmelze gegen diesen gedrückt werden. Das gleiche Prinzip findet sich hinter der Messstrecke im Grundkörper, eine Erhöhung verhindert eine vorzeitige Ablenkung der Fasern. Danach werden die Fasern gewollt abgelenkt und aus dem Permeameter hinaus geführt. Für die Bewertung der vorläufigen Geometrie und der Überprüfung, ob die einzelnen Komponenten wie geplant zusammenpassen, wird ein erster Prototyp mithilfe eines 3D-Druckers gefertigt. (Abbildung 3.11, Abbildung 3.12)

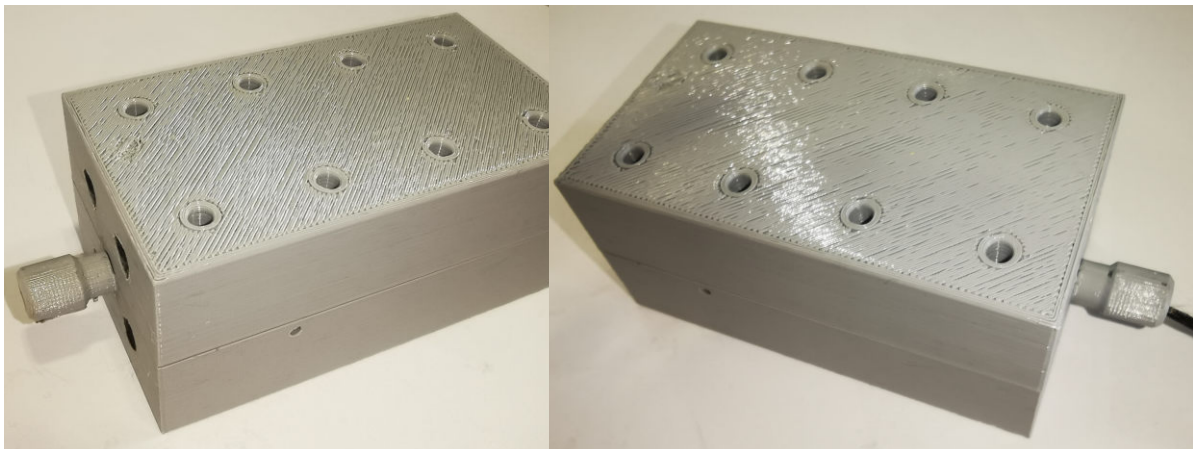


**Abbildung 3.11:** Prototyp: Außenansicht

Anhand des Prototyps werden grundlegende, der eigentlichen Messung vorgelagerte Funktionen getestet und bewertet wie die Befestigung und die Führung des Faserrovings durch das Permeameter. Der Verlauf des Faserrovings ist in Abbildung 3.12 zu sehen. Die Fasern werden Abbildung 3.10 entsprechend um das untere 3D-gedruckte Plättchen herum zwischen beiden 3D-gedruckten Plättchen hindurch geführt und mithilfe der Schrauben befestigt. Wird nun an dem Faserbündel gezogen, lässt sich ein merklicher Widerstand gegen das Herausziehen feststellen. Selbst in dieser Konfiguration ist kein Fiber-Washout während der Versuche zu befürchten. Es ist zu bedenken, dass die aus Polylactide (PLA) gedruckten Plättchen viel flexibler sind als die aus Stahl gefer-

tigten Befestigungsplättchen. Dadurch ist eine festere Klemmung im finalen Bauteil zu erwarten, da sich die Klemmkraft besser auf die Fasern überträgt. Aus den beschriebenen Versuchen mit dem Prototypen lässt sich zusammengefasst schlussfolgern, dass die entwickelte Befestigungsmethode den Anforderungen standhalten wird und der Faserroving während der Versuche nicht durch geschmolzenes Polymer aus dem Permeameter ausgewaschen wird.

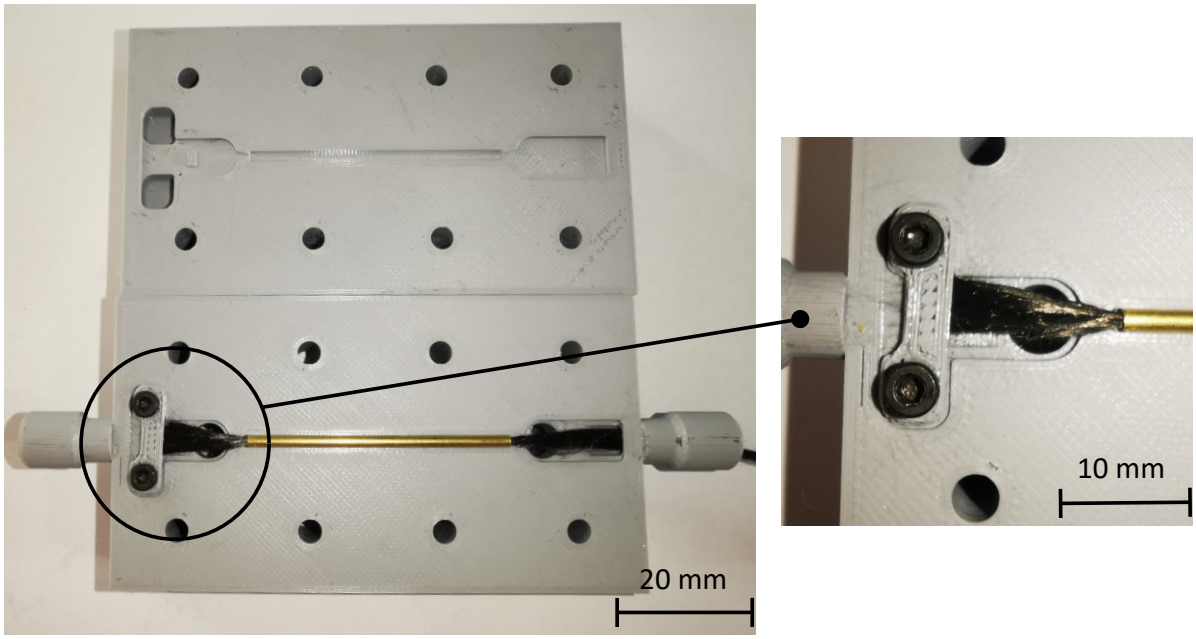



**Abbildung 3.12:** Prototyp-Innenansicht: Gesamtüberblick (links), Detailansicht- Faserbefestigung (rechts)

Von der Befestigung aus werden die Fasern über den Schmelzezulauf und den ersten Drucksensor(im Prototypen nur die Öffnung für den Drucksensor) durch eine kegelförmige Vertiefung in das Messingrohr geführt, am rechten Ende des Rohrs hinaus und dem Verlauf des Schmelzekanals folgend aus dem Permeameter geleitet.

Schwierigkeiten treten in den Prototypenversuchen beim Einfädeln des Faserstrangs in die $\varnothing 1,1mm$ große Öffnung des Rohrs auf. Dies ist ohne den Einsatz von Hilfsmitteln nicht möglich, sodass eine Vorrichtung konstruiert und 3D-gedruckt (Abbildung 3.13) wurde.

Diese Vorrichtung zum Einbringen der Fasern in das Rohr ist in Abbildung 3.13 zu sehen. Sie besteht aus einer Öffnung mit den gleichen Maßen wie das Rohr, in die dieses gesteckt wird. Auf der dem Rohr abgewandten Seite befindet sich ein länglicher Trichter, der bis auf die Größe der Öffnung des Rohres zusammen läuft.

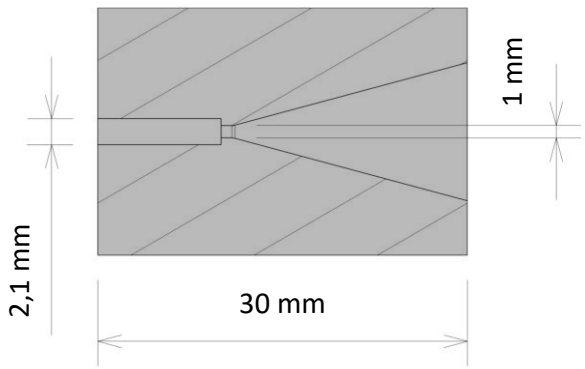



**Abbildung 3.13:** Trichter zum Einbringen der Kohlenstofffasern in das Rohr

Wird nun der in diesem Status vergleichsweise voluminöse Roving in den Trichter geschoben, kompaktieren die Fasern auf den Innendurchmesser des Rohrs und lassen sich in dieses einbringen. Wenn die Fasern nah genug am Rohr angefasst und geschoben werden, reicht dafür die Steifigkeit der Fasern aus. Ebenfalls ist darauf zu achten, dass die Faserrovings unter einer leichten, händisch eingebrachten Vorspannung stehen, wenn das Rohr zusammen mit den bereits befestigen Fasern, in die die entsprechende Vertiefung im Permeameter gelegt werden. Ansonsten ist das Volumen des Rovings zu groß für die Vertiefung, wodurch die Gefahr besteht, dass Fasern beim Zusammenfügen beider Permeameter-Hälften zwischen diesen eingeklemmt werden. Dies beeinflusst die Güte der Messung negativ, da geschmolzenes Polymer gegebenenfalls auf die Dichtflächen gelangen kann.

Ein weiterer Punkt zur Optimierung ist die Länge der Anbindungsgewinde am Prototypen, diese müssen verlängert werden, damit beim Aufschrauben der Flansche und bei der allgemeinen Benutzung des Permeameters mehr Freiraum herrscht und dadurch ein einfacherer Umgang erwartet wird.

### 3.5.2 Nebenmodul: Vakuumoption

Für die Erfüllung der Teilfunktion, ein Vakuum auf das Permeameter aufzubringen, wird folgend ein Konzept für ein Nebenmodul entwickelt.

Dieses Nebenmodul lässt sich an das Permeameter anbinden und enthält eine Befestigung für das zweite Nebenmodul zur Simulation einer Abziehkraft. Dieses Nebenmodul fungiert als Schnittstelle zwischen Permeameter und Vakuumpumpe. Dies ist notwendig, da ein direkter Anschluss einer Vakuumpumpe an das Permeameter in einem Verstopfen der Vakuumpumpe mit geschmolzenem Polymer resultiert und mit großer Wahrscheinlichkeit die Zerstörung der Pumpe bedeuten würde.

Das hier verwendete Grundkonzept orientiert sich an dem in der Faserverbundfertigung üblichen Einsatz einer Harzfalle, die als Auffangbehälter für überschüssiges Matrixmaterial dient und so die Vakuumpumpe vor Beschädigung schützt. Der bloße Anschluss einer Harzfalle an das Permeameter ist in der Praxis vergleichsweise leicht umzusetzen. Jedoch gelten, wie der Anforderungsliste 3.1 zu entnehmen, erhöhte Anforderungen, denen eine handelsübliche Harzfalle in der Regel nicht ausgesetzt ist. Dies betrifft insbesondere die vergleichsweise hohe Temperatur, die entlang des gesamten Schmelzekanals gehalten werden muss.

Die Harzfalle muss also mit allen Komponenten so ausgelegt sein, dass diese im ausreichenden Maße hitzebeständig bis zur Verarbeitungstemperatur des zu testenden Polymers sind.

### 3.5.3 Nebenmodul: Kraftsimulation

Für die Simulation einer Abziehkraft, wie sie während der Filamentfertigung auf die Fasern aufgebracht wird, wird folgend beschriebener Aufbau gewählt.

Die aus dem Permeameter hinaus geführten Kohlenstofffasern werden in einer Klemmvorrichtung, ähnlich der Klemmung innerhalb des Permeameters befestigt. Zum Spannen des Rovings wird die Klemmvorrichtung in ein Spannschloss eingeschraubt, welches auf seiner zweiten Seite an einem Kraftsensor befestigt ist.

Durch ein Drehen des Spannschlosses lässt sich so eine Zugkraft gezielt aufbringen und messen.

Eine Konzeptzeichnung ist folgender Abbildung 3.14 zu entnehmen.

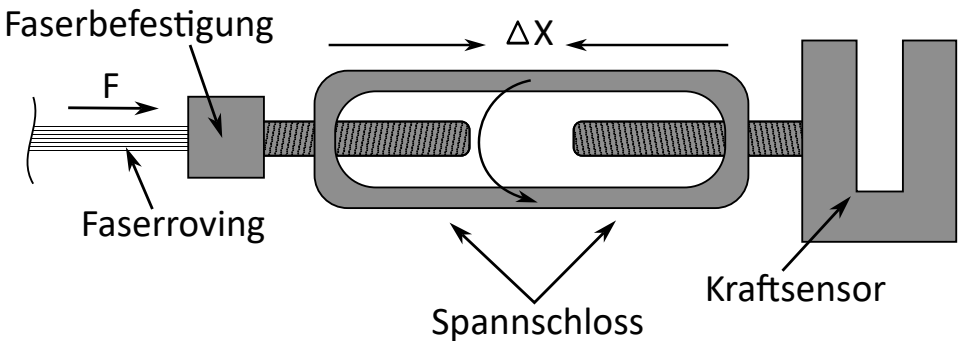



**Abbildung 3.14:** Konzept zur Simulation einer auf den Faserroving aufgebrachte Abziehkraft

## 3.6 Gestalten des gesamten Produkts

Der im vorherigen Kapitel 3.5 erarbeitete Vorentwurf des Permeameters wird in seiner finalen Form mitsamt der konzeptionellen Anbindung von einer Vakuumharzfalle und einer Vorrichtung zur Krafteinleitung und -messung in die Fasern vorgestellt.

In Abbildung 3.15 ist der finale CAD-Entwurf des Permeameters in verschiedenen Ansichten dargestellt.

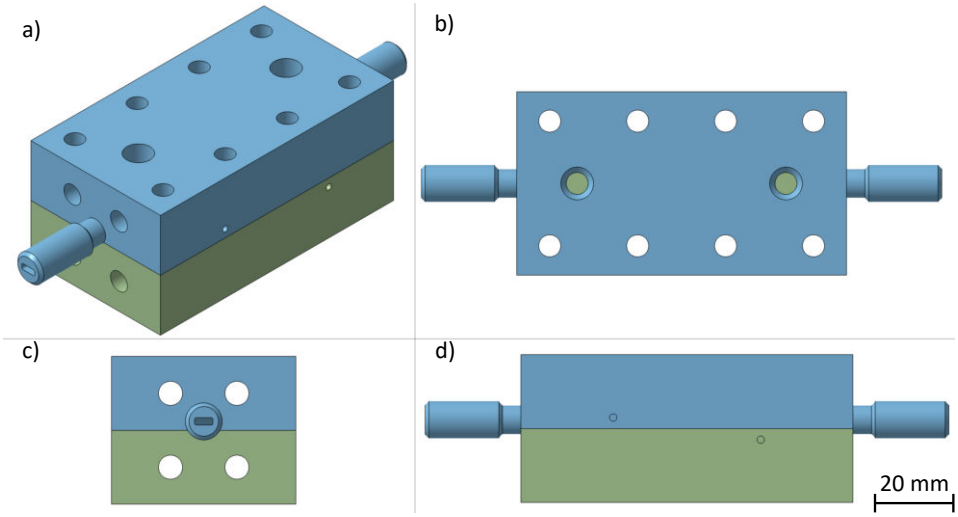



**Abbildung 3.15:** Permeameter finaler Entwurf
a) Isometrische Ansicht, b) Draufsicht, c) Vorderansicht, d) Seitenansicht

Im Vergleich zum bereits vorgestellten Vorentwurf wurden folgende zwei Anpassungen vorgenommen. Die Anbindungskanäle mit Außengewinde (die Gewinde werden im CAD-Modell nicht dargestellt) zum Aufschrauben der zu nutzenden Flansche wurden verlängert. Dies ermöglicht eine höhere Flexibilität beim Zusammenbau des Messaufbaus aufgrund der größeren Freiräume zwischen den Öffnungen im Permeameter und dem Befestigungsflansch. Die zweite vorgenommene Anpassung betrifft die Bohrungen für die Verbindungsschrauben. Im Vorentwurf wurde mit dem Einsatz von M4-Schrauben geplant. Da jedoch die Dichtflächen mit einem hohen Anpressdruck verbunden werden müssen, um eine Dichtheit der Flächen zu gewährleisten, wurde entschieden, den Schraubendurchmesser auf M6 zu erhöhen. Dies soll eine Beschädigung der Schrauben durch zu starkes Anziehen verhindern. Die weiteren Bestandteile des Permeameters entsprechen denen des Vorentwurfs.

Es wird in der Gestaltung der einzelnen Komponenten darauf geachtet, dass die Vorgaben, die sich aus der Nutzung der bereits vorhandenen und zu nutzenden Verbindungselementen, Drucksensoren, Thermoelementen und Heizpatronen ergeben, eingehalten

werden. Die gesamten und in der Praxis auf Funktionalität und Betriebssicherheit erprobten geometrischen Abmaße hierfür wurden den technischen Zeichnungen der Fibre Insertion, FlangeMale und FlangeFemale in Anhang B übernommen.

Das vollständige CAD-Modell wird für die Übermittlung an einen Fertigungsbetrieb in technische Zeichnungen überführt. Alle für die Fertigung notwendigen Zeichnungen mit den relevanten Ansichten sind in Anhang B zu finden. Das verwendete CAD-Programm überführt das CAD-Modell automatisch in die technische Zeichnung. Die Bemaßung wurde jedoch händisch vorgenommen, um die hohen Anforderungen an die Maßhaltigkeit besser einpflegen zu können. Die Allgemeintoleranzen werden nach DIN ISO 2768-1 [51] und DIN ISO 2768-2 [52] vorgegeben. Es werden mittlere Toleranzklassen gewählt. Überall, wo kleinere Toleranzen notwendig sind, sind diese in den technischen Zeichnungen vermerkt. Das Gleiche gilt für die Oberflächenbeschaffenheit, welche nach DIN ISO 1302 [53] definiert ist. Ein besonderer Fokus auf eine erhöhte Genauigkeit wird auf alle Bereiche gelegt, die externe Komponenten aufnehmen werden. Auch die Dichtflächen werden aufgrund der hohen Anforderungen zur Vermeidung von Leckagen mit einer höheren Oberflächengüte vorgegeben als für die restlichen Bauteilflächen erforderlich.

Mithilfe der vorgestellten Informationen lässt sich das Permeameter aus dem finalen Entwurf fertigen. Die grundsätzliche Funktionalität lässt sich erst in Vorversuchen bewerten. Diese werden in Kapitel 4 betrachtet.

Der Gesamtentwurf des Permeameters mit aufgebrachtem Vakuum und integrierter Kraftmessung wird in folgender Abbildung 3.16 schematisch (nicht maßstäblich) dargestellt. Aufgrund der zeitlichen Begrenzung dieser Masterarbeit wurde der gezeigte Aufbau nicht hergestellt und wird als Konzept für zukünftige Forschungsarbeiten übergeben.

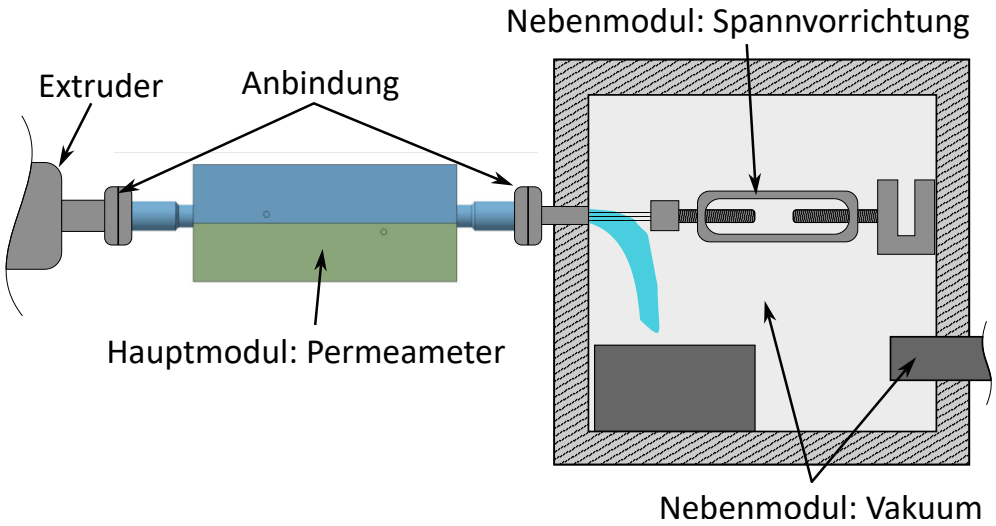



**Abbildung 3.16:** Gesamtentwurf: 1D-Permeameter mit Nebenmodulen

## 3.7 Ausarbeiten der Ausführungs- und Nutzungsangaben

Das Ergebnis dieses Abschnitts 3.7 ist eine umfassende Produktdokumentation. In dieser sind die für die Fertigung und den Betrieb des Permeameters relevanten Informationen zusammengetragen. Auch das fertige Permeameter wird in diesem Kapitel vorgestellt.

Die genauen Informationen, die Fertigung des Permeameters betreffend sind den technischen Zeichnungen in Anhang B zu entnehmen und werden folgend kurz zusammengefasst. Das zu verwendende Material, aus dem das Permeameter gefertigt wird, ist der warmbeständige und verzugsarme Werkzeugstahl "Toolox 33". Details des Werkstoffs sind im Datenblatt in Anhang D zu finden. Die Toleranzangaben richten sich nach den in den Zeichnungen angegebenen Normen, sofern sie nicht separat in der Zeichnungsbemaßung eingetragen sind.

Alle für das Permeameter notwendige Bestandteile ohne Beachtung der Nebenmodule sind in folgender Stückliste aufgeführt (Tabelle 3.6).

Während der Nutzung des 1D-Permeameters ist darauf zu achten, dass alle zu verschraubenden Anbauteile gleichmäßig und gewissenhaft befestigt werden, um ein ungewolltes selbstständiges Lösen und der damit einhergehenden Gefährdung der Nutzenden zu vermeiden. Um die Dichtheit des Permeameters zu gewährleisten und ein Austreten von flüssiger Polymerschmelze zu verhindern, müssen die Befestigungsschrauben fest (15 N) mit einem Drehmomentschlüssel angezogen werden.

| Stückliste: Zusammenbau und Betrieb des 1D-Permeameters | | | |
|---|---|---|---|
| **Art:** | **Bezeichnung:** | **Menge:** | **Kommentar:** |
| Hauptkörper | Permeamter | 1 Stück (Stk.) | |
| Messung | Drucksensor:<br>Schmelzedruckumformer<br>mit 4-20 mA Ausgang<br>DAI-2E4-10A-B10Z-S8-F5-R-N-6P | 2 Stk. | Druckbereich bis 100 bar |
| Messung | Thermoelement Typ K | 1 Stk. | |
| Messung | Heizpatrone Maier 456661<br>6,5D.60L.230V.300W | 1 - 4 Stk. | |
| Messung | Datenerfassung/Steuerung | | |
| Zusammenbau | Zylinderschraube<br>mit Innensechskant<br>DIN 912 M6x50 mm | 8 Stk. | Andere Kopfformen<br>auch möglich |
| Zusammenbau | Sechskantmutter DIN 934 M6 | 16 Stk. | |
| Zusammenbau | Unterlegscheibe<br>DIN 9021, 6,4 mm | 16 Stk. | |
| Verbrauch | Messing Rundrohr<br>Ø außen: 2,0 mm,<br>Ø innen: 1,1 mm,<br>Länge: 1000 mm | 45 mm pro Messung | Zugeschnitten<br>aus Meterware |
| Zusammenbau | Klemmplättchen | 2 Stk. | |
| Zusammenbau | Zylinderkopfschraube<br>mit Innensechskant<br>DIN 912 M3x5 mm | 2 Stk. | |
| Verbrauch | 12k- Roving | 150 mm pro Messung | Zugeschnitten<br>aus HexTow AS7<br>Carbon Fiber ohne<br>und mit Schlichte |
| Hauptkörper | Extruder | 1 Stk. | Bestehende Anlage |
| Zusammenbau | Flansch (m/w) | 2 Stk. | |
| Zusammenbau | Spannkette | 1 Stk. | |
| Verbrauch | Polymergranulat | | Je nach Versuch |
| Verbrauch | Auffangbehälter für<br>Polymerschmelze | 1 Stk. | |
| Vorversuche | Spritze | 1 Stk. | |
| Vorversuche | Silikonöl | 1 Liter | CST200, CST 350 |
| Vorversuche | Einspannvorrichtung<br>Permeameter | | |
| Vorversuche | Gewindeadapter M10x1 | 2 Stk. | Aufnahme<br>für Spritze<br>und Ablaufschlauch |
| Vorversuche | Auffangbehälter für Silikonöl | 1 Stk. | |

**Tabelle 3.6:** Stückliste zum Betrieb des 1D-Permeameters

## 3.8 Produktvorstellung: 1D-Permeameter

Dem Zeitplan entsprechend wurden in KW 51 2023 die Entwicklungs- und Planungsvorhaben für das 1D-Permeameter abgeschlossen und Vergleichsangebote für die Fertigung eingeholt. Nach der Lieferantenauswahl wurde das 1D-Permeameter bestellt und in KW 8 2024 geliefert. Das gefertigte 1D-Permeameter ist in Abbildung 3.17 zu sehen.

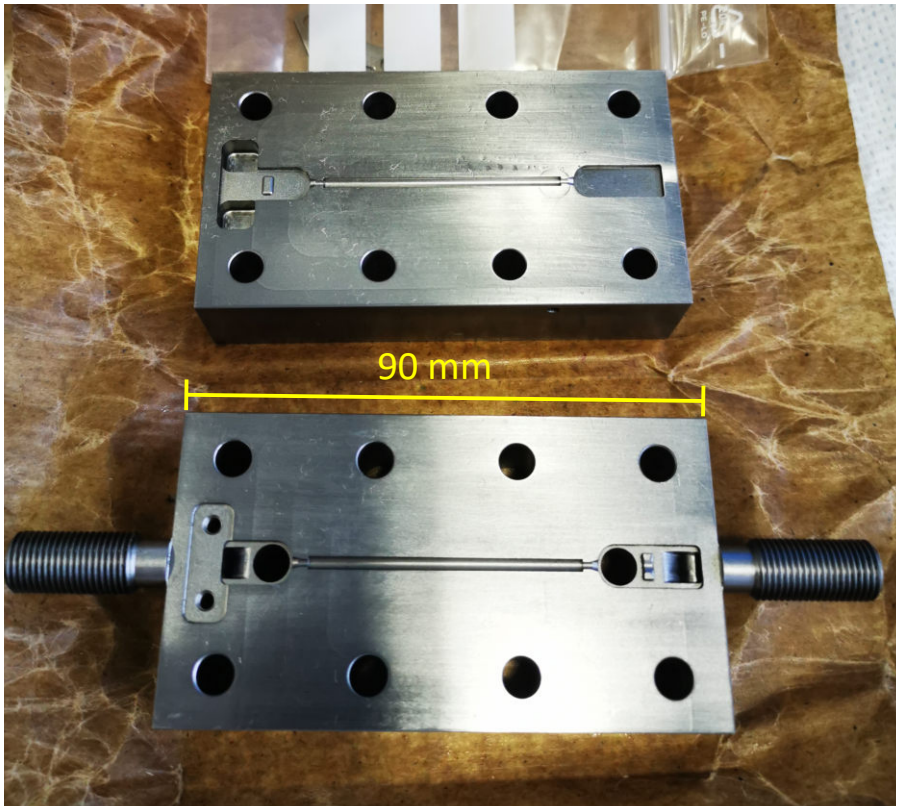



**Abbildung 3.17:** Vorstellung des 1D-Permeameters

Das 1D-Permeameter wurde einer Eingangskontrolle unterzogen, alle Maße überprüft, mit den technischen Zeichnungen verglichen. Zusätzlich wurden auf und in alle Gewinde die zugehörigen Anbauteile ein- bzw. aufgeschraubt. Alle Vorgaben wurden zufriedenstellend umgesetzt und alle Gegenstücke passen zueinander. Mit der Eingangskontrolle ist der Entwicklungs- und Bauprozess abgeschlossen. Der Folgeschritt ist die Funktionsüberprüfung im Rahmen einer ersten Parameterstudie (Kapitel 4).

# 4 Funktionalitätsüberprüfung des 1D-Permeameters: Parameterstudie

Kapitel 4 widmet sich der Funktionsüberprüfung des entwickelten 1D-Permeameters in Form der Durchführung und Auswertung einer ersten Parameterstudie.

Im Vorfeld der Versuche für die Parameterstudie unter Realbedingungen mit geschmolzenem PLA bei Temperaturen über 200 $°C$ wird der Aufbau und die Durchführung in Form eines Vorversuchs mit niedrigviskosem Silikonöl anhand eines Testaufbaus erprobt. Im Rahmen der Versuchsdurchführung erfolgt zunächst eine Beschreibung der verwendeten Halbzeuge hinsichtlich ihrer Form und ihrer Eigenschaften. Im Anschluss erfolgt eine Vorstellung der verwendeten Anlagentechnik. Im Folgenden wird die Versuchsdurchführung der Parameterstudie dargestellt und eine Auswertung der ersten Messergebnisse vorgenommen. In der Schlussbetrachtung werden die Ergebnisse der Versuchsdurchführung und der Messergebnisse präsentiert und diskutiert. Dabei wird erörtert, inwiefern die durchgeführte Parameterstudie die Funktionalität des 1D-Permeameters bestätigt.

## 4.1 Verwendete Halbzeuge

Eine genaue Kenntnis über die jeweiligen Materialdaten der verwendeten Halbzeuge ist entscheidend für die Qualität und Aussagekraft der Versuchsauswertung. Dies betrifft die Permeabilitätsberechnung und die Bewertung der Funktionalität des 1D-Permeameters.

Eine Vorgabe aus dem Entwicklungsauftrag ist die Multimaterialkompatibilität des 1D-Permeameters. Die Vorgabe besteht darin, dass Faserrovings aus unterschiedlichen Materialien zusammen mit unterschiedlichen polymeren Matrixmaterialien geprüft werden können müssen. Die Umsetzung der Multimaterialkompatibilität wird in Kapitel 3 behandelt.

Für die Versuche im Rahmen dieser Masterarbeit finden Halbzeuge Verwendung, die bereits im Praxiseinsatz zur Filamentherstellung erprobt sind. Die Versuchsplanung sieht

vor, dass als polymeres Matrixmaterial das PLA-Granulat "Ingeo™ Biopolymer 2003D" des Herstellers "NatureWorks" genutzt wird.

Bei diesem Material handelt es sich um ein Biopolymer mit hohem Molekulargewicht, das sich auf herkömmlichen Extrusionsanlagen leicht verarbeiten lässt. Ausführliche Informationen sind im technischen Datenblatt in Anhang D zu finden.

Für die Bestimmung der Permeabilität sind insbesondere die Dichte von 1,24 $g/cm^3$ und die temperaturspezifischen dynamischen Viskositätswerte wichtig. Die Werte der dynamischen Viskosität vom Hersteller stehen nicht zur Verfügung. Das Material wurde jedoch bereits institutsintern rheologisch untersucht, sodass für einen begrenzten Temperaturbereich Werte für die komplexe Viskosität vorliegen. Für die Nutzung dieser Daten sind Anpassungen erforderlich, auf die in der Versuchsauswertung in Kapitel 4.5 eingegangen wird.

Im ersten Versuch wird die eindimensionale gesättigte Permeabilität des Kohlenstofffaserrovings "HexTow® AS7" der Firma "HEXCEL" bestimmt. "HexTow® AS7" ist ein UD-Kohlenstofffaserroving aus Endlosfaser auf PAN-Basis mit hoher Festigkeit und hoher Dehnung. Das Material ist in Strängen mit 12000 (12K) Filamenten erhältlich. Gemäß des Datenblatts sind diese Kohlenstofffasern oberflächenbehandelt und geschlichtet erhältlich. Dies soll in der Praxis die interlaminare Scherfestigkeit, die Handhabungseigenschaften und die strukturellen Eigenschaften verbessern. Das Material wird für die Verwendung beim Weben, Prepregverfahren, Filamentherstellung, Flechten und Pultrusion empfohlen. Die Werkstoffdaten sind ebenfalls in Anhang D zu finden.

Im ersten Versuch werden Kohlenstofffasern ohne Schlichte geprüft, da der Einfluss einer Schlichte auf die Permeabilität des Materials Erkenntnisse darüber bringen kann, ob die geschlichteten oder ungeschlichteten Kohlenstofffaserrovings, des Herstellers besser für die Fertigung von 3D-Druck-Filament geeignet sind. Weitere Versuche mit geschlichtetem Fasermaterial sind für zukünftige Forschungsarbeiten vorgesehen. Wie in Kapitel 2.3.4 erörtert, ist jedes Faserhalbzeug mit und ohne Schlichte separat zu testen. Aufgrund der sich unterscheidenden Zusammensetzungen der Schlichte kann keine allgemeine Aussage über den Einfluss der Schlichte auf die Permeabilität getroffen werden [46].

Die für die Bestimmung der Permeabilität relevanten Werkstoffdaten werden in der Versuchsauswertung in Kapitel 4.5 näher betrachtet.

## 4.2 Anlagentechnik

Für die Versuchsdurchführung steht eine experimentelle Extrusionsanlage für die Fertigung von endlosfaserverstärktem 3D-Druck-Filament, zur Verfügung. Der Stand der Technik dieser Anlage und des angewandten Fertigungsverfahrens ist in Kapitel 2.2 beschrieben. In Kapitel 4.2 erfolgt eine Auseinandersetzung mit den versuchsrelevanten Anlagenteilen sowie deren potenziellen Modifikationen. Ein schematischer Aufbau der Anlage mit ihren Schnittstellen und Stoffflüssen ist in folgender Abbildung 4.1 dargestellt.

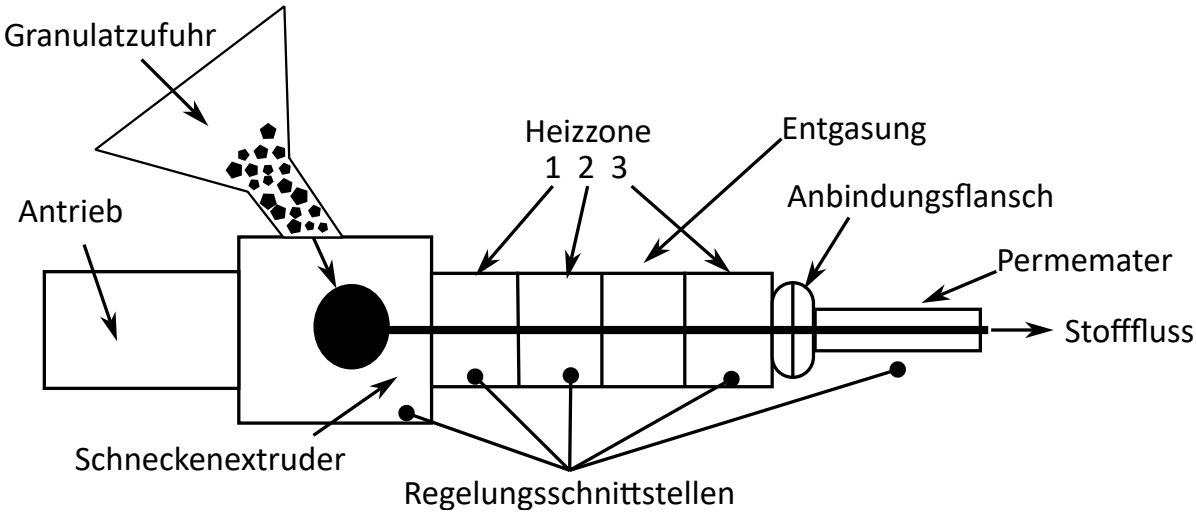



**Abbildung 4.1:** Anlagentechnik

Das für die Versuche gewählte Polymer wird in Granulatform der Anlage zugeführt. Ein Schneckenextruder transportiert das Granulat durch drei Heizzonen. Zusätzlich durch eine der zweiten und dritten Heizzone zwischengeschalteten Entgasungsvorrichtung. In diesen drei Heizzonen wird das Polymergranulat aufgeschmolzen. Nach Verlassen der dritten Heizzone strömt das geschmolzene Polymer über die Anbindungsstelle in das Permeameter und am Ausgang des Permeameters in einen Auffangbehälter.

Die Anlage wird über ein Bedienungsterminal gesteuert. Es lässt sich für jede Heizzone sowie für das Permeameter selbst eine Soll-Temperatur einstellen und eine Ist-Temperatur auslesen.

Für die Bestimmung der eindimensionalen Permeabilität ist es notwendig, einen konstanten Volumenstrom über die Versuchsdauer oder einen konstanten Druck am Beginn der Messstrecke im Permeameter einzustellen [3]. Ein konstanter Volumenstrom lässt sich an dieser Anlage nicht einstellen. Allerdings besteht die Option, über den ersten Drucksensor vor Beginn der Messstrecke im Permeameter einen Soll-Druck festzulegen. Der Druck wird automatisch durch den Schneckenextruder reguliert, indem der Antrieb

die Förderdrehzahl entsprechend anpasst. Dies erfolgt in Abhängigkeit davon, ob der Ist-Druck zu niedrig oder zu hoch ist. Die Erfassung aller Messwerte erfolgt ebenfalls über das Bedienterminal. Im Rahmen der Datenaufzeichnung werden sämtliche Variablen sowie feste Versuchswerte und -einstellungen erfasst. Eine Datenauswertung ist auf Basis der exportierten Daten möglich.

Die Vielzahl an Regelungsschnittstellen und Einstellungsmöglichkeiten erlaubt die Untersuchung eines breiten Spektrums von polymeren Schmelzen.

## 4.3 Versuchsvorbereitung

Ausgangspunkt der Versuchsvorbereitung ist die gründliche Reinigung des Permeameters. Es dürfen keine Fremdkörper im Innenraum des Permeameters verbleiben und die Dichtflächen müssen staub- und fettfrei sein. Bei der Reinigung ist darauf zu achten, die Dichtflächen nicht zu zerkratzen, da dies einen negativen Einfluss auf die Dichtwirkung nehmen würde.

Die Messingrohre werden auf 45 mm zugeschnitten. Es stellt sich als zweckdienlich heraus, die Rohre mit einem kleinen Übermaß von einem Millimeter zu zuschneiden und das Rohr auf Maßhaltigkeit zu schleifen. Messing ist vergleichsweise weich und lässt sich leicht mit einem Schleifpapier abtragen.

Sobald das Messingrohr auf die Länge von 45 mm gekürzt ist, wird der Kohlenstofffaserroving ins Rohr eingebracht. Der in Abbildung 3.13 gezeigte Trichter wird genutzt, um ein ca. 150 mm langes Stück Kohlenstofffaserroving in die Öffnung des Rohrs einzufädeln. Gelingt dies nicht, kann es helfen, die Spitze des Kohlenstofffaserrovings anzufeuchten. Dies bewirkt, dass die Kohlenstofffasern lokal verkleben und sich zusammen in die Öffnung des Rohrs schieben lassen. Sobald ein erstes Stück vom Roving im Rohr steckt, lässt sich der Rest des Rovings durch das Rohr schieben.

Die trockene Seite des Kohlenstofffaserrovings wird, wie in Abbildung 3.7 dargestellt, in die Faserbefestigung eingelegt und befestigt. Das Messingrohr wird in die vorgesehene Vertiefung im Permeameter eingelegt und der Kohlenstofffaserroving durch den Schmelzekanal am Ausgang des Permeameters geschoben, der Aufbau zu diesem Zeitpunkt ist in Abbildung 4.2 zu sehen.

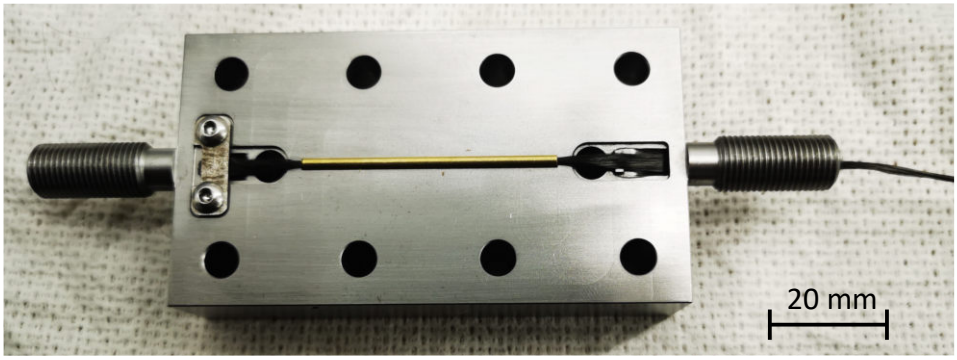



**Abbildung 4.2:** Permeameter mit Messingrohr und eingelegtem Kohlenstofffaserroving

Der letzte Schritt der Versuchsvorbereitungen des Permeameters ist das Aufsetzen des Deckels und die druckdichte Verschraubung des Hauptkörpers mit dem Deckel zur Versiegelung der Dichtfläche. Beim Aufsetzen des Deckels ist darauf zu achten, dass keine einzelnen Kohlenstofffasern auf die Dichtfläche ragen. Es ist hilfreich, einen leichten Zug auf den aus dem Permeameter geführten Roving auszuüben. Durch den Versatz des Schmelzekanals werden die Kohlenstofffasern gegen den Hauptkörper gezogen und der Roving verdichtet. Lässt die Zugbelastung nach, nehmen sie wieder ihre ursprüngliche Position ein. Der Zug am Roving verringert die Gefahr, einzelne Kohlenstofffasern einzuklemmen und das Permeameter wird so ohne ein Einklemmen von Fasern geschlossen. Durch die kleinen Toleranzen der Rohrvertiefungen und den Aussparungen für die Faserbefestigung existiert nur eine Möglichkeit, den Deckel zu positionieren.

Wenn das Permeameter geschlossen ist, werden die mit Unterlegscheiben bestückten Befestigungsschrauben durch die Bohrungen geführt, auf der Rückseite ebenfalls mit Unterlegscheiben bestückt und Befestigungsmuttern handfest aufgeschraubt. Es ist wichtig, darauf zu achten, dass alle Schrauben gleichmäßig mit einem Drehmomentschlüssel (15 $N$) über Kreuz festgezogen werden. Dies hilft dabei, Verspannungen im Material zu vermeiden und die Dichtheit zu gewährleisten.

### 4.3.1 Vorversuch

Die Zielsetzung des Vorversuchs ist die Erprobung des 1D-Permeameters unter im Vergleich zu den Hauptversuchen niedrigen Anforderungen. Es wird im Vergleich zu schmelzflüssigem PLA, niedrigviskoses Silikonöl mit einer Viskosität von 200 $Pa/s$ getestet. Mithilfe eines eigenen Versuchsaufbaus wird das Silikonöl bei Raumtemperatur und reduziertem Druck durch das Permeameter gedrückt.

Dabei liegt der Fokus darauf, zu testen, ob das Permeameter dicht gegen Leckagen ist und ob es unter den vorliegenden Bedingungen möglich ist, ein Fluid durch das Messingrohr

mit einem Durchmesser von 1,1 $mm$ und einem Faservolumengehalt von ca. 50 % fließen zu lassen.

Der Versuchsaufbau des Vorversuchs orientiert sich in vereinfachter Form am Versuchsaufbau zur Durchführung der Parameterstudie. Der Extruder wurde durch eine Handspritze mit einem Volumen von 60 ml ersetzt. Die Flanschanbindung wird durch einen eigens für diesen Versuch konstruierten und 3D-gedruckten, Spritzenadapter dargestellt. Zusätzlich wurde eine Halterung für das Permeameter sowie eine Spannvorrichtung zum Aufbauen eines Drucks mit der Spritze gebaut. Das austretende Silikonöl wird über einen Ablaufschlauch mit Adapter zum Ausgang des Permeameter aufgefangen. Der Aufbau ist in Abbildung 4.3 zu sehen.

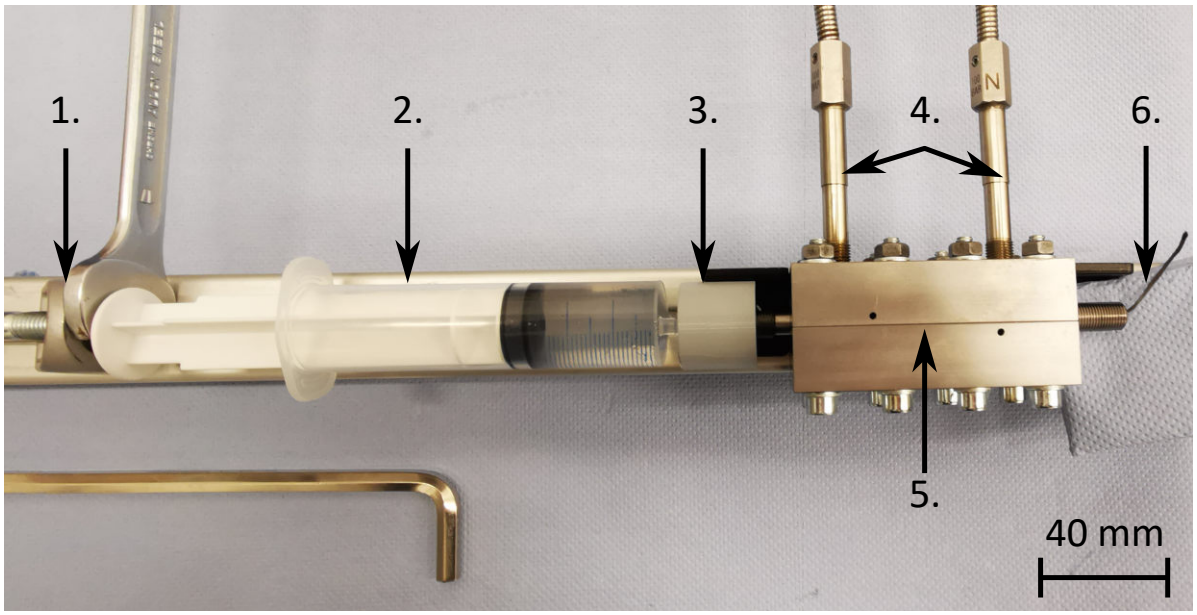



**Abbildung 4.3:** Aufbau: Vorversuch

Für das Aufbauen und Halten eines permanenten Drucks, wird eine mit einer Mutter gekonterten Schraube (1.) gegen die Spritze geschraubt. Durch ein gleichmäßiges Festdrehen baut sich ein Druck in der Spritze und so auch im Permeameter auf. Die mit Silikonöl gefüllte Spritze (2.) wird über den aufgeschraubten Spritzenadapter (3.) mit dem Permeameter (5.) verbunden. In das Permeameter sind die Drucksensoren (4.) eingeschraubt. Diese dienen im Vorversuch lediglich der Verschließung und Abdichtung des Permeameters und sind nicht an das Messsystem angeschlossen. Am Ausgang des Permeameters ist der eingelegte Kohlenstofffaserroving (6.) zu sehen.

Der hier beschriebene Aufbau ist erforderlich, da es händisch nicht gelungen ist, einen Druck mit der Spritze aufzubauen und zu halten, um Silikonöl durch das Permeameter strömen zu lassen.

Während der Durchführung des Vorversuchs wird auf die Verwendung des Ablaufschlauchs verzichtet. So ist es möglich, den genauen Zeitpunkt aufzunehmen, ab dem Silikonöl aus dem Ausgang des Permeameters austritt. Die Zeitspanne zwischen dem Druckaufbau in der Spritze und dem Austreten des Silikonöls wurde dokumentiert. Der Druck wurde stetig erhöht, bis nach ca. 6 Minuten Silikonöl aus dem Permeameter ausgetreten ist.

Im Rahmen dieses Vorversuchs konnte zunächst demonstriert werden, dass der Aufbau geeignet ist, um ein Fluid durch das Permeameter zu leiten. Zudem wurde die Dichtheit nach außen mit einem niedrig viskoseren Fluid als geschmolzenem PLA nachgewiesen. Bei der Öffnung des Permeameters zeigte sich, dass Silikonöl auf die Dichtflächen bis zur Verschraubung vorgedrungen ist (Abbildung 4.4).

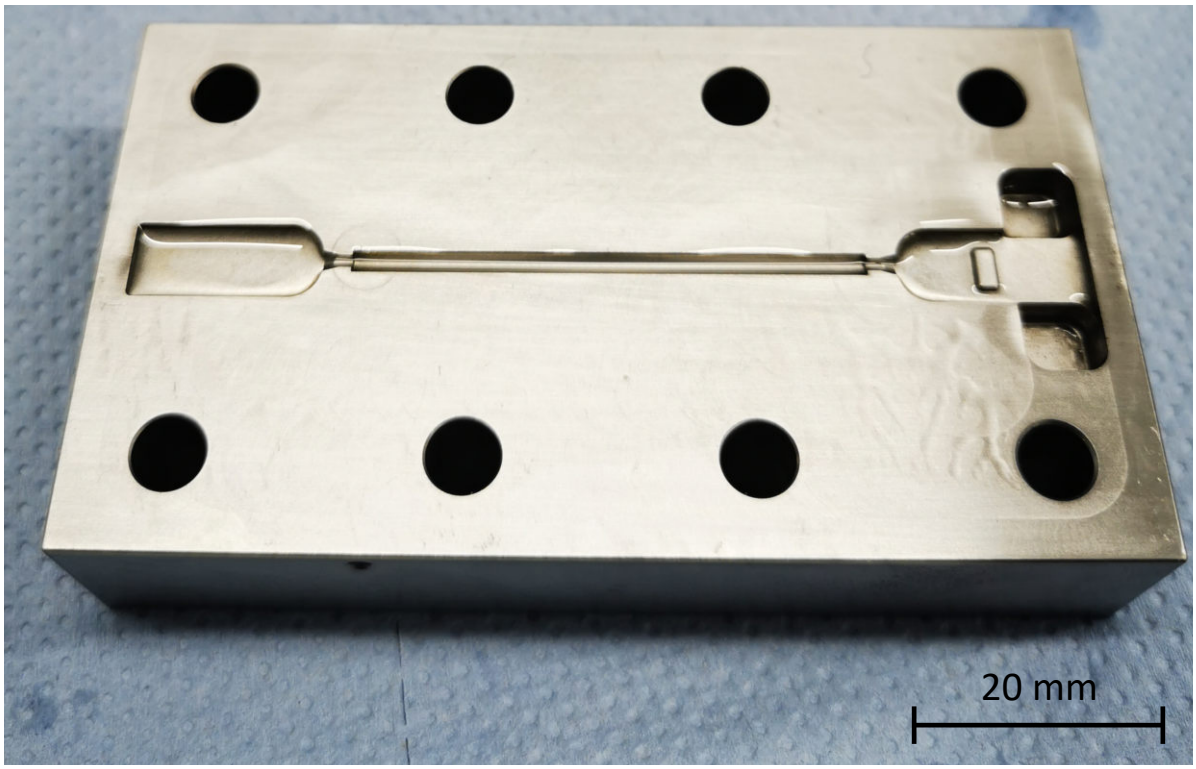



**Abbildung 4.4:** Vorversuch: Permeameter Deckel mit Silikonfluss

Das Fließen des Silikonöls bis zu der Verschraubung des Permeameters gibt Aufschluss über mögliche Verbesserungen für eine zweite Version des Permeameters. Diese Verbesserungsvorschläge werden in Kapitel 5 behandelt. Es wird festgestellt, dass darauf zu achten ist, die Verschraubung während der Hauptversuche möglichst gleichmäßig und fest zu ziehen, um diesen Effekt zu minimieren. Die höhere Viskosität des schmelz flüssigen PLA's lässt die Annahme zu, dass während der Hauptversuche kein oder weniger Fluid auf die Dichtflächen gelangt.

### 4.3.2 Durch Beschädigung notwendige Anpassungen des Permeameters

Während der Versuchsvorbereitungen der ersten Parameterstudie wurde der Anbindungsflansch auf das Anbindungsgewinde am Permeametereingang aufgeschraubt. Das Aufschrauben erfolgte bis ca. zur Hälfte des Gewindeganges. Ab diesem Punkt ließ sich der Flansch weder vor noch zurückdrehen. Erwärmen des Flansches und der Einsatz von Schmiermitteln half nicht, den Flansch zu lösen. Der Versuch, den Flansch händisch mit einer Zange zu lösen, führte dazu, dass die Anbindung vom Permeameter abgebrochen ist, da sie nicht für diese Arte der Belastung ausgelegt wurde.

Das Schadensbild ist in Abbildung 4.5 zu sehen und möglicherweise auf eine Verunreinigung oder Fremdkörper im Flanschgewinde zurückzuführen.

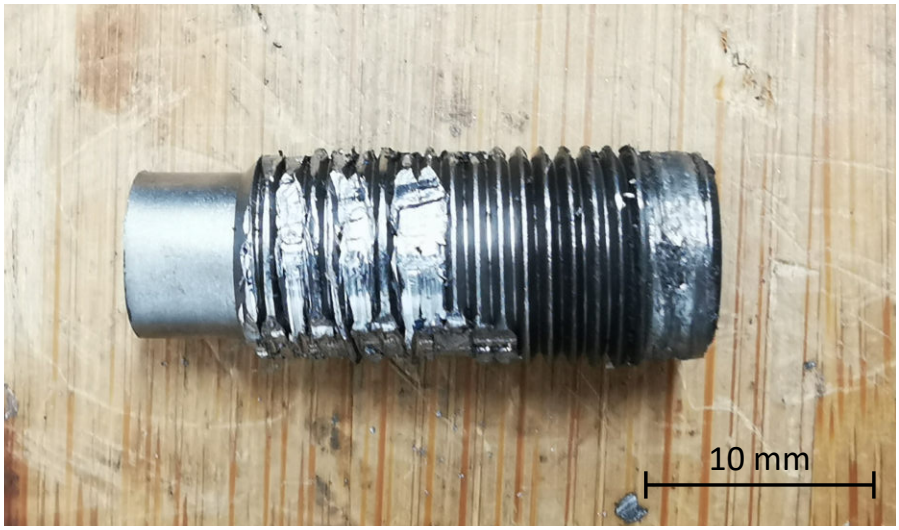



**Abbildung 4.5:** Abgebrochener Schmelzekanal mit Gewinde

Durch diese Beschädigung ist ein sachgemäßes Anbringen des Permeameters an den Extruder nicht mehr möglich und es musste eine Lösung erarbeitet werden, mit der es möglich ist, Versuche durchzuführen.

Die Herausforderung war, eine Befestigung des Kohlenstofffaserrovings im Permeameter, entgegen der vorgesehenen Messrichtung und ohne die integrierte Faserfixierung zu ermöglichen. Dafür wurde der Grundkörper des Permeameters um 180° gedreht, sodass die noch vorhandene Gewindeanbindung zum Extruder zeigte. Der durch das Messingrohr geführte Kohlenstofffaserroving wurde nun anders als ursprünglich vorgesehen in die Vertiefung im Deckel des Permeameters eingelegt. Die Vertiefung für die Faserbefestigung im Deckel des Permeameters ist an der flachsten Stelle 1 mm tief. Die beiden 0,5 mm dicken Klemmplättchen können dort dichtflächenbündig eingelegt werden. Dadurch, dass keine

Aussparung für die Faserbefestigung in dieser Hälfte des Permeameter-Grundkörpers vorhanden ist, sind die Klemmplättchen unbeweglich eingefasst. Der Kohlenstofffaserroving wurde breit gefächert auf das erste Klemmplättchen gelegt und vom zweiten Klemmplättchen abgedeckt. Durch das Auflegen und Verschrauben des Grundkörpers werden die Fasern zwischen den Klemmplättchen fixiert (Abbildung 4.6).

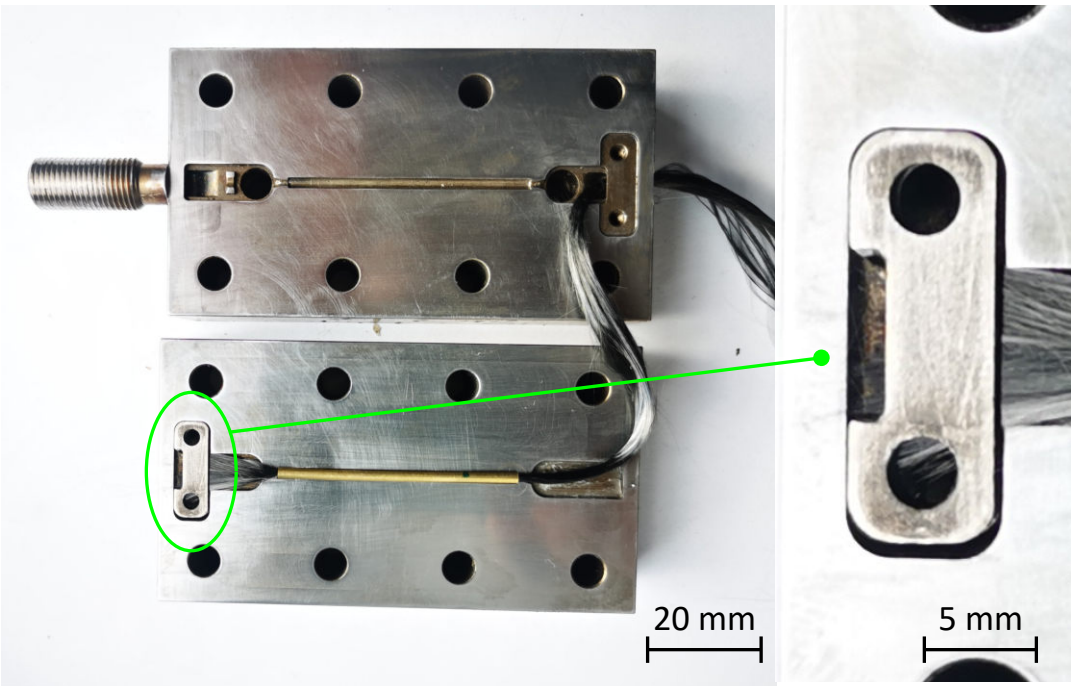



**Abbildung 4.6:** Notwendige Anpassung der Faserbefestigung

Mithilfe eines leichten Ziehens an den Kohlenstofffasern am neuen Ausgang des Permeameters (ohne dass sich einzelne Faserbündel lösen), lässt sich feststellen, dass der Roving ausreichend fest zwischen den Klemmplättchen eingeklemmt ist, sodass ein Fiber-Washout nicht zu befürchten ist.

Diese alternative Befestigung des Kohlenstofffaserrovings im Permeameter stellt eine Lösung dar, um trotz der Beschädigung Versuche mit dem Permeameter durchführen zu können. Es ist jedoch zu bedenken, dass die Dichtheit des Aufbaus unter der angepassten, nicht so präzisen Faserbefestigung und Führung beeinträchtigt werden kann.

Eine Umsetzung des Vakuumkonzepts am Permeameter ist nicht mehr möglich, ohne dass ein neuer Grundkörper gefertigt wird.

## 4.4 Versuchsdurchführung und Aufbau

Nach den in Kapitel 4.3 beschriebenen Versuchsvorbereitungen und den in Kapitel 4.3.2 dargestellten notwendigen Anpassungen des Permeameters ist in folgender Abbildung 4.7 der vollständige Versuchsaufbau zur Messung der eindimensionalen Permeabilität zu sehen.

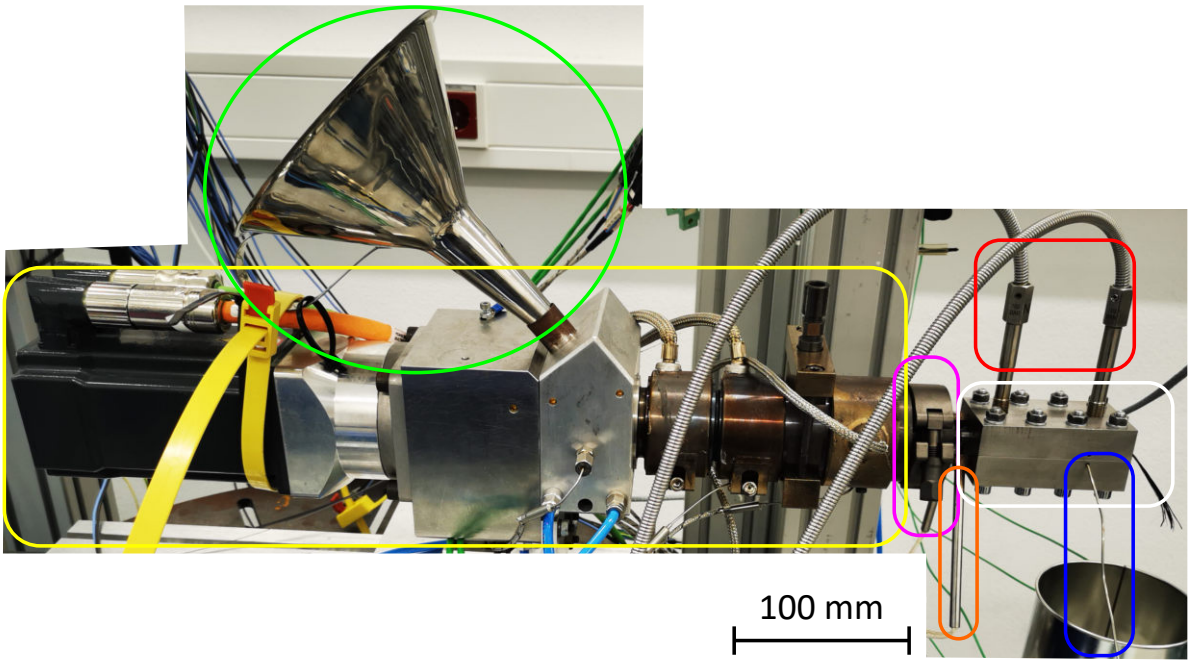



**Abbildung 4.7:** Versuchsaufbau: Komplett

Innerhalb der gelben Markierung befindet sich der Extruder. Der in den Extruder eingesteckte Trichter (grüne Markierung) dient der Befüllung des Extruders mit Thermoplast-Granulat. Die weiteren markierten Elemente sind in Abbildung 4.8 detaillierter gezeigt.

Zentral in Abbildung 4.8 ist das geschlossene Permeameter (weiße Markierung) mit am rechten Rand austretenden Kohlenstofffaserroving zu sehen. In die jeweiligen Öffnungen sind die Drucksensoren (rote Markierung) eingeschraubt und das Thermoelement zum Messen der Betriebstemperatur (blaue Markierung) sowie die Heizpatronen zum Aufheizen und Halten der Temperatur über die gesamte Messstrecke (orange Markierung) eingesteckt. Innerhalb der violetten Markierung ist die Klemmkette zu sehen, mit der über den Flansch die stirnseitige Öffnung des Permeameters auf die Extruderöffnung gepresst wird.

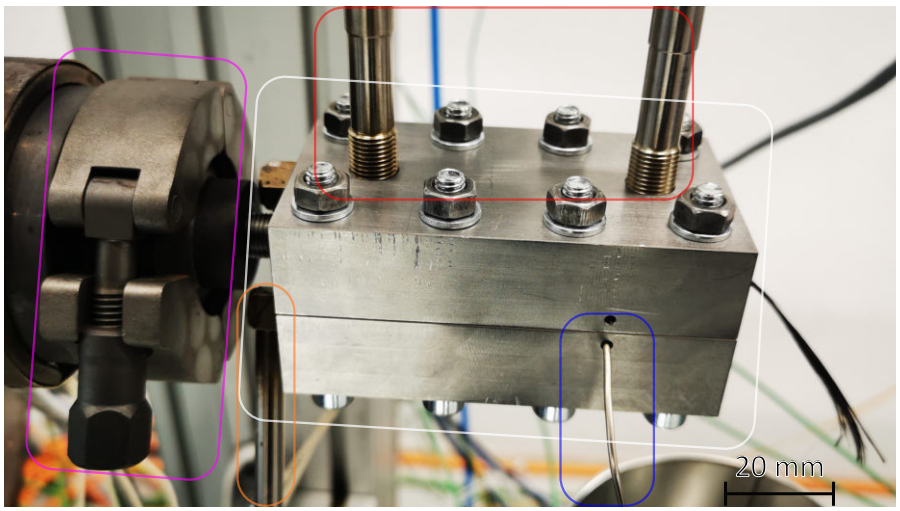



**Abbildung 4.8:** Versuchsaufbau: Detailansicht

Bevor mit der Versuchsdurchführung begonnen wird, wird das Permeameter und der Extruder aufgeheizt. Während das Permeameter aufheizt, wird das Reinigungsthermoplast im Extruder durch PLA ersetzt. Der Extrusionsprozess wird initiiert und die austretende Schmelze in einem Behälter aufgefangen. Im Nachfülltrichter befindet sich PLA-Granulat, das kontinuierlich in den Extruder fällt und das Reinigungsfilament verdrängt.

Der beschriebene Vorgang ist in Abbildung 4.9 zu sehen. Am Permeameter in der rechten Bildhälfte ist eine Verfärbung des Materials zu erkennen. Diese wurde durch die schnelle und starke Erhitzung hervorgerufen. Ein Vergleich mit Abbildung 4.8 zeigt die Veränderung vom kalten zum aufgeheizten Zustand.

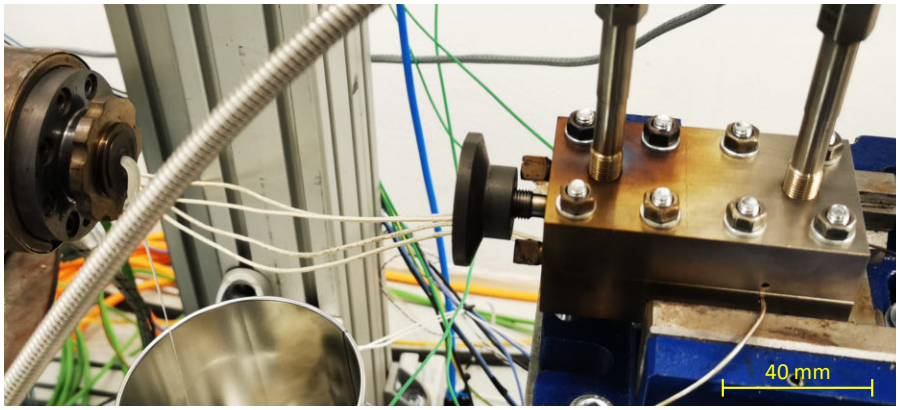



**Abbildung 4.9:** Vorheizen des Permeameters

Nach der Aufheizung des Permeameters und dem Spülen des Extruders wird der Aufbau wieder zusammengefügt. Ein Auffangbehälter sowie eine Feinwaage für die PLA-Schmelze wird unter den Ausgang des Permeameters gestellt. Für die Bestimmung der

Permeabilität ist es, wie in Kapitel 2 beschrieben, erforderlich, verschiedene Parameter zu erfassen und zu steuern.

Es besteht nicht die Möglichkeit, einen konstanten Volumenstrom $Q$ am Extruder einzustellen. Allerdings lässt sich ein Soll-Druck am Drucksensor zu Beginn der Messstrecke festlegen, der automatisch vom Extruder gehalten wird. Dennoch gilt das Verfahren als Verfahren mit konstantem Volumenstrom. Es wird ein Soll-Druck eingestellt und so lange gehalten, bis sich ein Steady-State-Zustand eingestellt hat, bei dem der Volumenstrom gleich bleibt. Es werden also Daten zur Bestimmung der gesättigten Permeabilität unter verschiedenen Umgebungsbedingungen erfasst. Druckdifferenzen werden vorgegeben und jeweils auf den als konstant angenommenen Volumenstrom zurückgerechnet. Die Erfassung des Massestroms erfolgt mittels einer Kamera und einer Feinwaage. Auf Basis der Dichte des PLA und der Messzeit lässt sich der Volumenstrom berechnen.

Der Aufbau dafür ist in Abbildung 4.10 zu sehen.

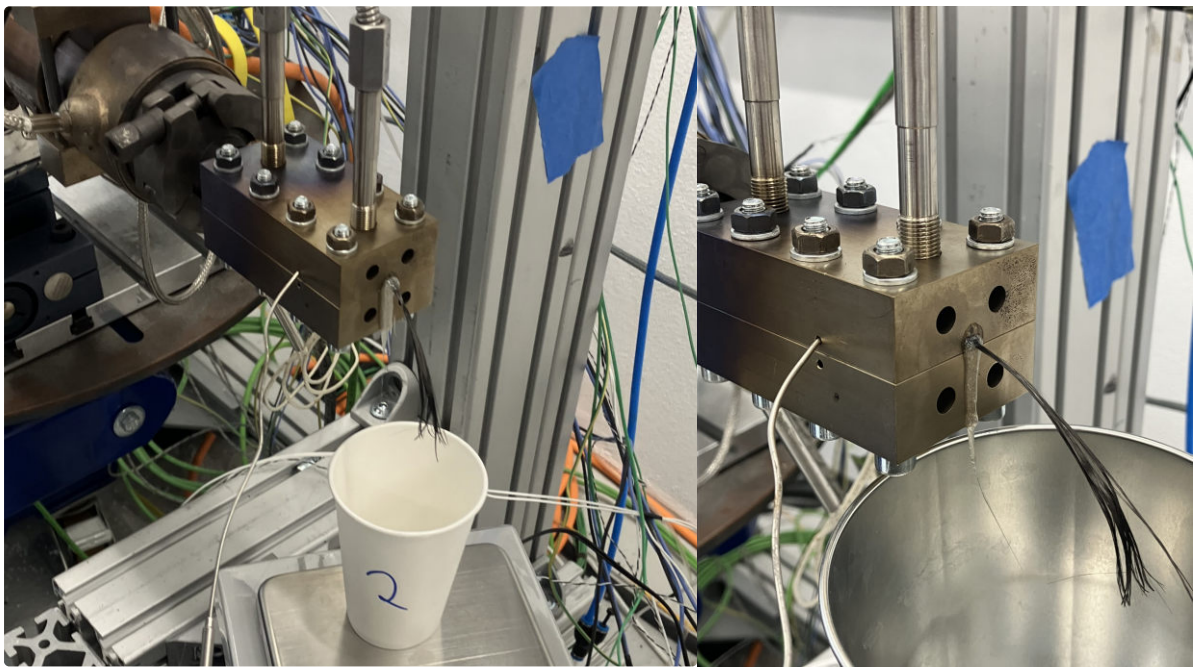



**Abbildung 4.10:** Versuchsdurchführung: Erfassung des Massestroms

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung werden Messdurchläufe bei unterschiedlichen Drücken und Temperaturen durchgeführt. Die Drucksensoren haben bereits vor Beginn der Messungen Druckwerte ausgegeben, die nicht tariert werden konnten. Vor der Versuchsauswertung ist daher darauf zu achten, diesen von jedem Druckwert in den Rohdaten abzuziehen. Die Messwerte des ersten Drucksensors müssen jeweils um $P_1 = -22,6\ bar$ korrigiert werden. Die Messwerte des zweiten Drucksensors um $P_2 = -15,4\ bar$. Dies gewährleistet, dass alle drei Messreihen den identischen Ausgangsdruck

aufweisen. Die jeweiligen durch das Permeameter geströmten Massen werden in separaten, markierten Behältern aufgefangen.

Die Versuche wurden gefilmt, um die einzelnen Messreihen zeitlich den Rohdaten zuordnen zu können. Alle Versuchsparameter der einzelnen Messungen sind in den Tabellen 4.1 und 4.2 in Kapitel 4.5 zusammengetragen.

Anhand der Bilder in Abbildung 4.11 und Abbildung 4.12 lässt sich eine erste Bewertung der erfolgreichen Umsetzung der Entwicklung des 1D-Permeameters, der Versuchsdurchführung sowie der durch die Beschädigung des Permeameters notwendigen Anpassungen in Versuchsaufbau und -durchführung vornehmen.

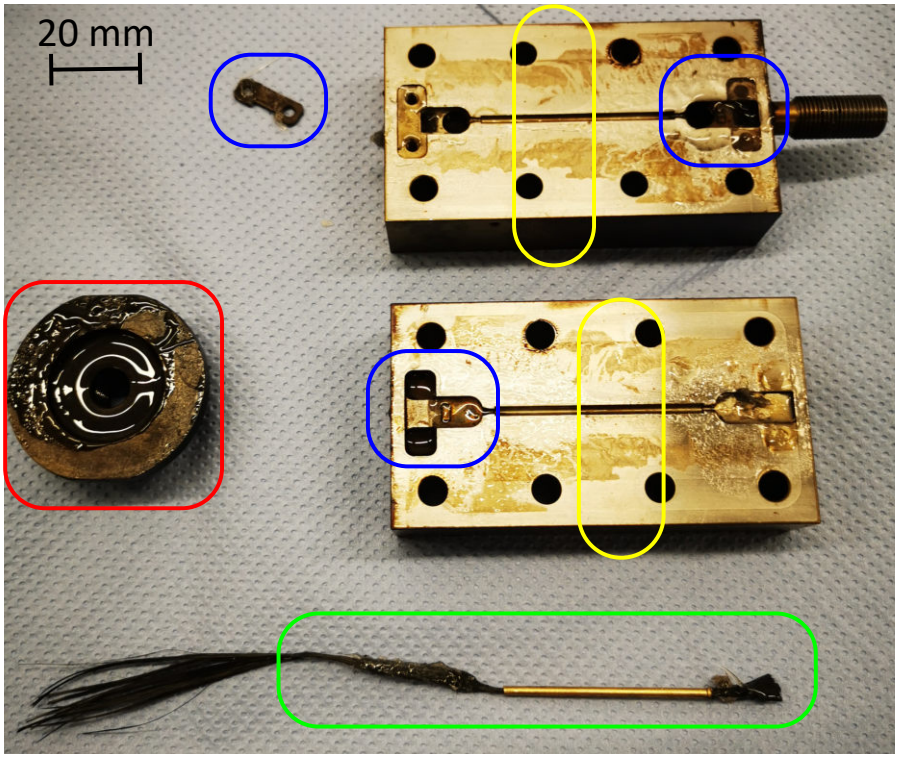



**Abbildung 4.11:** Analyse der Versuchsdurchführung

Die für die vorliegende Masterarbeit zu diesem Zeitpunkt relevanteste Erkenntnis lässt sich anhand der aus dem Permeameter austretenden Schmelze in Abbildung 4.10 und dem in Abbildung 4.11 grün umrandeten Messingrohr mit imprägniertem Kohlenstofffaserroving zeigen. Ein Durchströmen des Messingrohrs mit eingelegtem Kohlenstofffaserroving unter den gegebenen Versuchsbedingungen ist möglich und stellt einen ersten Erfolg dar, der in der Auswertung der Messergebnisse überprüft wird. Ebenfalls wird untersucht, ob eine vollständige Imprägnierung des Kohlenstofffaserrovings erfolgt ist. Hierfür wird eine mikroskopische Untersuchung des Querschnittes des gefüllten Messingrohres durchgeführt und in Kapitel 4.5.2 betrachtet.

Die zweite Erkenntnis ist, dass es trotz der Beschädigung des Permeameters durch die abgebrochene Anbindung möglich ist Versuche durchzuführen, ohne, dass Kohlenstofffasern während des Versuchs aus dem Permeameter ausspülen.

Anhand der in Abbildung 4.11 blau markierten Bildausschnitte lässt sich erkennen, dass die Klemmplättchen während der Versuchsdurchführung in Position geblieben sind und dass keine einzelnen Kohlenstofffasern in den Bereichen verblieben sind. Dies ist bestätigend in Abbildung 4.12 am unmittelbar nach der Versuchsdurchführung geöffneten Permeameter zu sehen. Das auf den Kohlenstofffasern liegende Klemmplättchen wurde bereits entfernt. Es ist zu erkennen, dass die Kohlenstofffasern während der Versuchsdurchführung breit gefächert zwischen den Klemmplättchen fest eingeklemmt waren, ohne dass sie durch zu großen Anpressdruck abgebrochen sind. Bei genauer Betrachtung lassen sich auch keine Einzelfasern oder Fasersträne finden, die außerhalb des Schmelzekanals liegen.

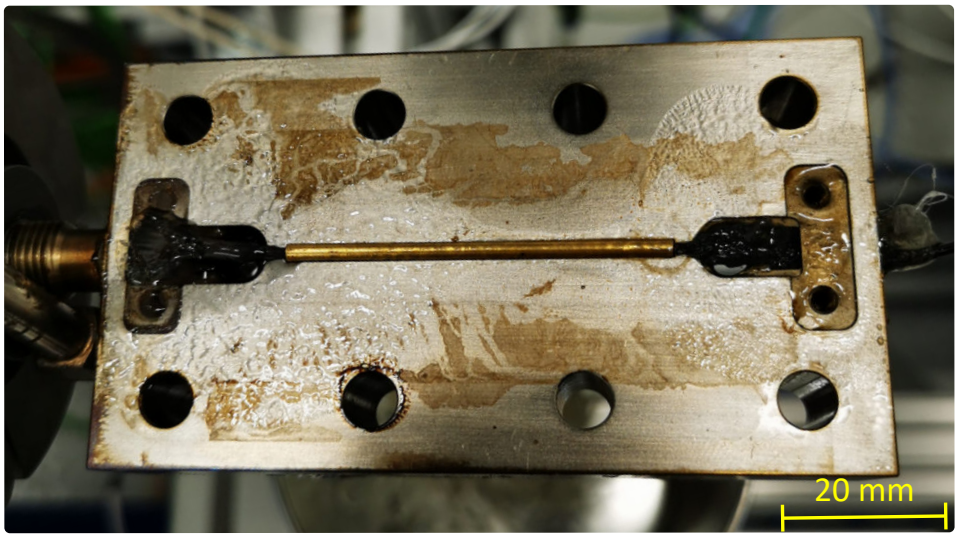



**Abbildung 4.12:** Permeameter geöffnet unmittelbar nach der Versuchsdurchführung

Ein weiterer zu betrachtender Faktor betrifft die innere Dichtheit des Permeameters. Dies zeigt, ob eine konstruktive Fehlstelle oder ein Fehler in der Versuchsdurchführung vorliegt.

Während der Versuchsdurchführung ist keine PLA-Schmelze an den Dichtflächen des Permeameters nach außen ausgetreten. In Abbildung 4.11 und Abbildung 4.12 ist jedoch eindeutig zu sehen, dass die Dichtflächen bis zu den Verschraubungsbohrungen mit Schmelze benetzt sind. Dies nimmt jedoch keinen negativen Einfluss auf die Messergebnisse, da jeweils auf Grundkörper und Deckel ein Trockenkorridor (gelbe Markierung, Abbildung 4.11) zu sehen ist. Dies lässt darauf schließen, dass zwar PLA-Schmelze auf die Dichtflächen gelangen konnte, jedoch nicht über die Dichtflächen durch das Permea-

meter geströmt ist. Weiterhin zeigen die braunen Verfärbungen, dass noch Silikonöl aus den Vorversuchen auf den Dichtflächen verblieben und verbrannt ist. Dies hat möglicherweise zu der inneren Leckage geführt.

Während der Versuchsdurchführung sind kleine Mengen der PLA-Schmelze am Anbindungsflansch ausgetreten (rote Markierung, Abbildung 4.11) und vereinzelt Luftblase am Ausgang ausgetreten. Auch hier ist auf ein sorgfältiges Befestigen der Spannkette am Flansch und ein abschließendes Eindrehen des Permeameters zu achten. Dies erhöht den Anpressdruck auf die Dichtflächen an Extruder und Permeameter und verhindert damit ein Austreten von Schmelze und ein Eindringen von Luft in den Messraum.

Die Versuche zur Bestimmung der eindimensionalen gesättigten Permeabilität konnten trotz der Beschädigungen am 1D-Permeater erfolgreich durchgeführt werden. Es wurden wichtige Erkenntnisse generiert, wie sich die Durchführung zukünftiger Versuche optimieren lässt. Durch das Abbrechen des Anbindungsgewindes wurden konstruktive Maßnahmen zur Verbesserung einer Neuauflage des Produkts offenbart.

## 4.5 Auswertung der Messdaten und Ergebnisse

Für die Versuchsauswertung werden zunächst die aufgezeichneten Versuchsparameter und Messgrößen zusammengetragen und der jeweiligen Messreihe zugeordnet. Aus diesen Daten lassen sich die für die Berechnung der eindimensionalen Permeabilität benötigten Variablen bestimmen.

Die Viskositätswerte des in den Versuchen eingesetzten PLA's stehen für den Temperaturbereich von 160 °C bis 220 °C zur Verfügung. Diese Materialwerte stammen vom Institut für Systemleichtbau des DLR durchgeführten rheologischen Untersuchungen. Da in der vorliegenden Forschungsarbeit Versuche bis 230 °C durchgeführt wurden, werden die entsprechenden Viskositätswerte aus den Datensätzen der bekannten Viskositätswerte extrapoliert.

Es folgt die Berechnung der eindimensionalen gesättigten Permeabilität unter der Annahme, dass die dynamische Viskosität der komplexen Viskosität bei niedrigen Kreisfrequenzen entspricht. Anschließend wird eine Einordnung und Bewertung der Ergebnisse durchgeführt.

Aufbauend auf dieser Einordnung wird weiterführend untersucht, welche Einflussgrößen zu welchen Abweichungen beim Bestimmen der Permeabilitätswerte führen. Es werden Mikroskopaufnahmen des imprägnierten Kohlenstofffaserrovings analysiert, woraus Erkenntnisse zum Auftreten des Race-Tracking-Effekts gewonnen werden. Zu diesen Erkenntnissen wird jeweils der direkte Einfluss der Viksosität, der Messflüssigkeit und des

Volumenstroms auf die gesättigte Permeabilität gezeigt. Die Plausibilität der Messergebnisse wird dabei durch eine Grenzerweiterung der Versuchsparameter überprüft.

### 4.5.1 Bestimmung der eindimensionalen gesättigten Permeabilität

Die messreihenübergreifenden Parameter sind in Tabelle 4.1 aufgeführt. Dabei handelt es sich um die versuchsrelevanten Werkstoffparameter und die geometrisch gleichbleibenden Versuchsparameter, die für die Berechnung der eindimensionalen Permeabilität benötigt werden. Für die Berechnung der eindimensionalen Permeabilität $K_x$ wird Gleichung 2.5 genutzt [11].

Der Wert $\Delta X$ ist die Länge des in das Permeameter eingelegten Messingrohrs und $A_{eff}$ die effektiv durchströmte Fläche. Beide Werte sind unveränderlich für alle Messreihen, die mit dem hier eingesetzten Kohlenstofffaserroving durchgeführt werden. $A_{eff}$ wird angepasst, sobald ein anderes Fasermaterial getestet oder ein Rohr mit abweichenden Innendurchmesser genutzt wird. Die Porosität $\varepsilon$ ergibt sich aus Gleichung 2.7 und darüber berechnet sich die effektiv durchströmte Fläche $A_{eff}$ aus Gleichung 2.6. Der für die Bestimmung der Porosität $\varepsilon$ benötigte Faservolumengehalt $V_f$ wird durch die aus dem entsprechenden Datenblatt in Anhang D stammenden geometrischen Abmaße der Kohlenstofffasern und ihrer Anzahl als Volumenanteil im Rohr bestimmt.

| Parameter | Wert |
|---|---|
| Werkstoff | Natureworks Ingeo 2003D |
| Dichte (g/cm$^3$) | $\rho = 1,24$ |
| Viskosität (PA*s): | $\eta$ =temperaturabhängig |
| Durchmesser Rohr (m): | $\varnothing = 0,0011$ |
| Kreisfläche (m$^2$): | $A_{Form} = 0,00000095$ |
| Faservolumenanteil im Rohr: | $V_f = 0,48$ |
| Porosität des Mediums | $\varepsilon = 0,52$ |
| Fläche effektiv (m$^2$): | $A_{eff} = 4,94E - 07$ |
| Messstrecke (m): | $\Delta X = 0,045$ |

**Tabelle 4.1:** Randbedingungen für die Berechnung der Permeabilität

Die für jede Messreihe spezifischen Messwerte (Versuchsdauer, Massefluss, Druck) liefern den in Gleichung 2.5 benötigten Wert für den Volumenstrom $Q$ des geschmolzenen PLA's sowie den Druckunterschied $\Delta P$ zwischen dem Beginn und dem Ende der Messstrecke. Diese sind in Tabelle 4.2 aufgeführt. Der Volumenstrom ist bei bekannter Stoffdichte des fließenden Mediums über den Massestrom bestimmbar [12]. Während der

Versuchsdurchführung wurde für jede Messreihe die durch das Permeameter geströmte PLA Schmelze aufgefangen und anschließend gewogen. Währenddessen wurde die Fließzeit aufgezeichnet. Somit stehen alle Werte für die Berechnung des Volumenstroms $Q$ zur Verfügung, unter der Annahme, dass der Volumenstrom über die gesamte Messzeit konstant ist.

Der zentrale zu ermittelnde Versuchsparameter ist, wie in Kapitel 2.3 beschrieben, die Druckdifferenz $\Delta P$ zwischen den beiden Messpunkten [11]. Die Messung und Aufzeichnung der Druckwerte vor und hinter der Messstrecke erfolgt im Sekundentakt. Die Messwerte werden nach Aufzeichnung als .csv-Datei mit Zeitstempel versehen und in vektorieller Form ausgegeben. Für die Versuchsauswertung wurden die den Messzeiträumen der einzelnen Messreihen entsprechenden Druckwerte extrahiert, zugeordnet und wie in Kapitel 4.4 beschrieben, um den Ausgangsdruck der beiden Drucksensoren korrigiert. Für jede Messreihe wird über den zugehörigen Messzeitraum der Mittelwert des Drucks am ersten und am zweiten Drucksensor gebildet und daraus die Druckdifferenz $\Delta P$ berechnet (Gleichung 4.1).

$$\Delta P = P_{x1} - P_{x2} \tag{4.1}$$

Die Tabelle 4.2 beinhaltet alle Messwerte in den für die Berechnung der eindimensionalen Permeabilität benötigten Einheiten. Zusätzlich werden einige Messgrößen in Einheiten angegeben, die es erleichtern, die Größenordnung der gemessenen Werte zu erfassen.

| Messung Nr. | | 1 | 2 | 3 |
|---|---|---|---|---|
| Temperatur (°C) | $t$ | 230 | 230 | 210 |
| Masse PLA (g) | $m$ | 1,65 | 5,34 | 2,02 |
| Volumen ($cm^3$) | $V$ | 1,330645161 | 4,306451613 | 1,629032258 |
| Masse Gesamt (g) | $m_g$ | 7,11 | 10,83 | 7,47 |
| Masse Becher (g) | $m_b$ | 5,46 | 5,49 | 5,45 |
| Zeitfenster (min) | $\Delta T$ | 15:45 bis 21:15 | 25 bis 31:30 | 37:26 bis 42:56 |
| Messzeit (min) | $T$ | 5,5 | 6,5 | 4,5 |
| Massestrom(g/min) | $\dot{m}$ | 0,3 | 0,821538462 | 0,448888889 |
| Volumenstrom($cm^3$/min) | $Q$ | 0,241935484 | 0,662531017 | 0,362007168 |
| Volumenstrom($m^3$/s) | $Q$ | 4,03226E-09 | 1,10422E-08 | 6,03345E-09 |
| Druckdifferenz Mittelwert (Pa) | $\Delta P$ | 4683762,706 | 5330393,09 | 5614873,13 |

**Tabelle 4.2:** Versuchswerte

Für die Berechnung der Permeabilität ist die Kenntnis der temperaturabhängigen Viskositätswerte der PLA-Schmelze notwendig. Es stehen aus rheologischen Untersuchungen des in den Versuchen genutzten PLA's Daten der komplexen Viskosität in einem Temperaturbereich von 160 °C bis 220 °C und Kreisfrequenzen im Bereich von 0,1 rad/s bis 628 rad/s zur Verfügung. Da die ersten zwei Messreihen jedoch bei einer Temperatur von 230 °C durchgeführt wurden, werden die Werte der komplexen Viskosität für diese Temperatur aus den vorliegenden Datensätzen extrapoliert. Verschiedene Extrapolationsansätze (Linear, Arrhenius) liefern nahezu identische Ergebnisse. Die hier verwendeten Werte stammen aus der linearen Extrapolation, siehe Anhang C . Der Graph in Abbildung 4.13 zeigt den Verlauf der komplexen Viskosität des genutzten PLA's Ingeo 2003D in Abhängigkeit von der Kreisfrequenz (rad/s) bei verschiedenen Temperaturen inklusive der extrapolierten Viskosität bei 230 °C.

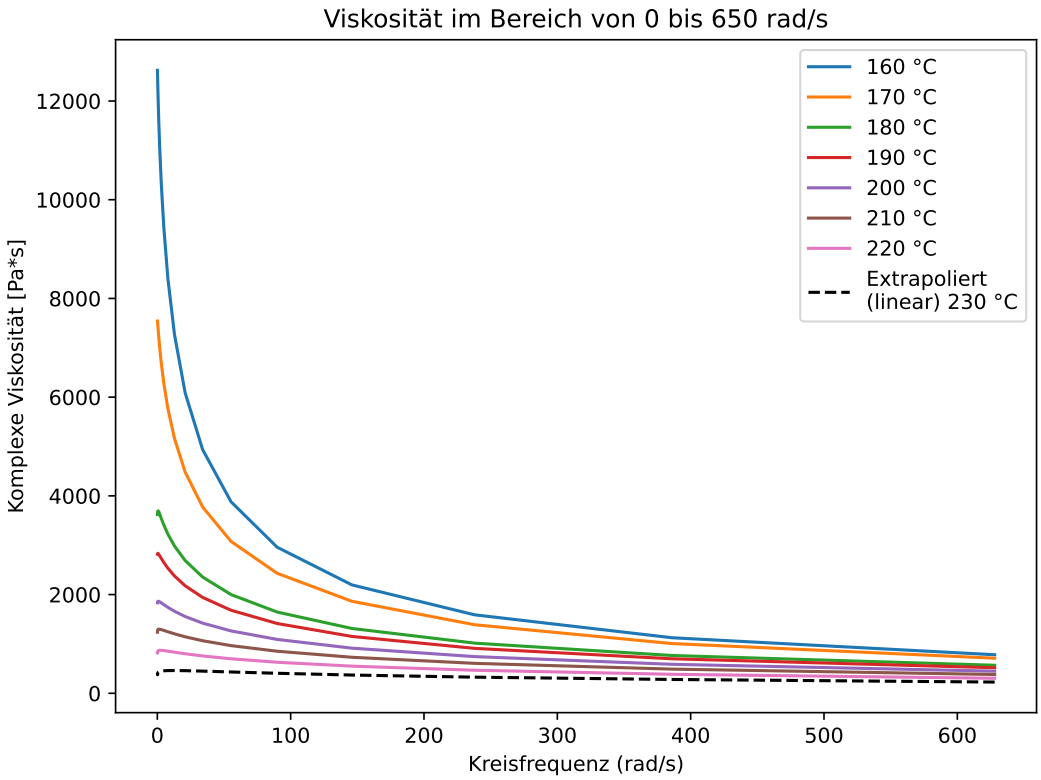



**Abbildung 4.13:** Verlauf der komplexen Viskosität von PLA (Ingeo 2003D) bei steigender Kreisfrequenz

Für die Versuche werden Viskositäten bei niedrigen Scherraten angenommen, dies lässt sich mit Viskositäten bei niedrigen Kreisfrequenzen gleichsetzen [54, 55]. Da für die Berechnung der Permeabilität die dynamische Viskosität relevant ist, muss der dyna-

mische Anteil der komplexen Viskosität bekannt sein. Für sehr kleine Kreisfrequenzen entspricht die komplexe Viskosität der dynamischen Viskosität und wird direkt für die Berechnung übernommen [55]. Für die erste Berechnung der gesättigten eindimensionalen Permeabilität werden die Werte der komplexen Viskosität bei 0,43 rad/s genutzt und in Gleichung 2.5 eingesetzt. Die Parameterübersicht und die Ergebnisse sind in Tabelle 4.3 zusammengefasst und zur besseren Vergleichbarkeit in Abbildung 4.14 im Balkendiagramm aufgetragen.

| Messreihe $x$ | Dynamische Viskosität bei $\omega = 0,43 rad/s$ $\eta$ (Pa·s) | Gesättigte Permeabilität: $K_x$ (m²) |
|---|---|---|
| 1 | 414,139 | 3,57618E-08 |
| 2 | 414,139 | 7,78512E-08 |
| 3 | 1288,2 | 1,13482E-07 |

**Tabelle 4.3:** Gesättigte Permeabilität bei Annahme niedriger Schergeschwindigkeiten

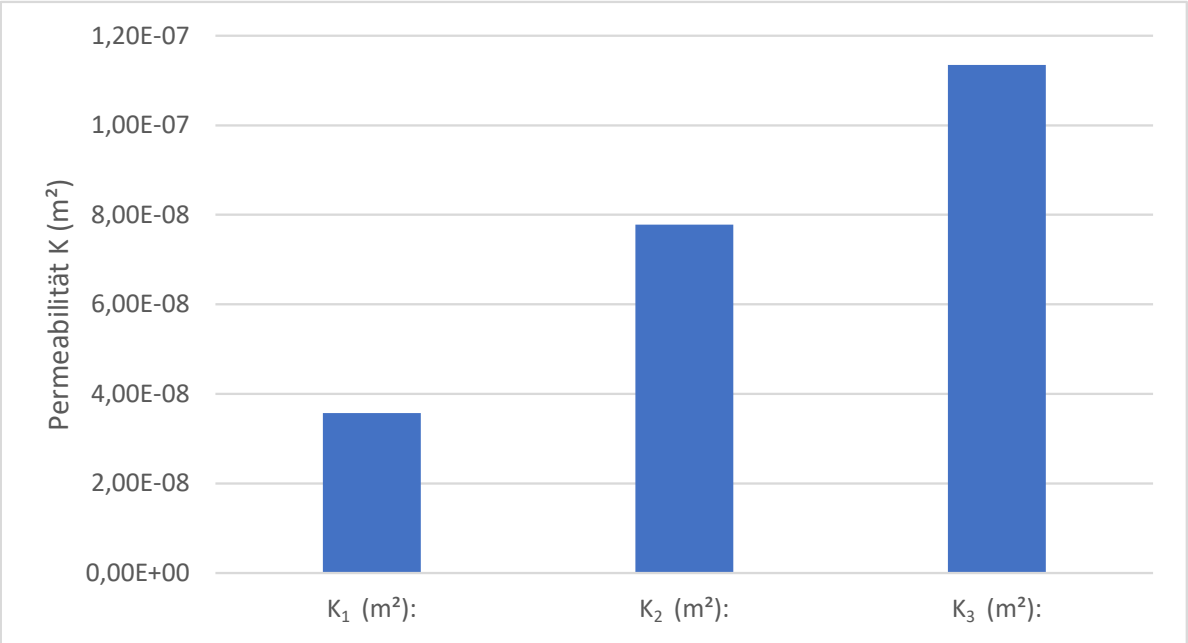



**Abbildung 4.14:** Gesättigte Permeabilität bei Annahme niedriger Schergeschwindigkeiten

Wie in Tabelle 4.3 zu lesen, weichen die Werte für die eindimensionale Permeabilität um ein Vielfaches voneinander ab. Da die Permeabilität ein Materialparameter des Kohlenstofffaserrovings ist, müssten die Ergebnisse bei korrekter Parameterwahl, sprich korrekter Annahme der Viskosität und korrekten Messergebnissen, übereinstimmen [3].

Für die weitere Messauswertung werden folgend Schnittbilder des imprägnierten Rovings analysiert (Kapitel 4.5.2) und der Einfluss der Parameter Viskosität $\eta$ (Kapitel 4.5.3) und Volumenstrom $Q$ (Kapitel 4.5.4) auf die Permeabilität untersucht.

### 4.5.2 Analyse der Schnittbilder

Der erste Schritt in der Überprüfung der Schnittbilder ist die Analyse des Flusses der Polymerschmelze durch das Rohr und durch den Kohlenstofffaserroving. Dies gibt Aufschluss, ob die Polymerschmelze gleichmäßig durch die Zwischenräume der Einzelfilamente des Kohlenstofffaserrovings geströmt ist oder ob Race-Tracking-Effekte die Imprägnierung der Fasern negativ beeinflusst haben. Gleichzeitig dient dies der Überprüfung der im Entwicklungsauftrag geforderten Funktion, die imprägnierten Faserrovings entnehmen und weitergehend untersuchen zu können. Ein 30 mm langes Stück wird aus dem in den Versuchen genutzten Messingrohr geschnitten (Abbildung 4.15). Die Eingangsseite des Rohrs ist blau markiert.

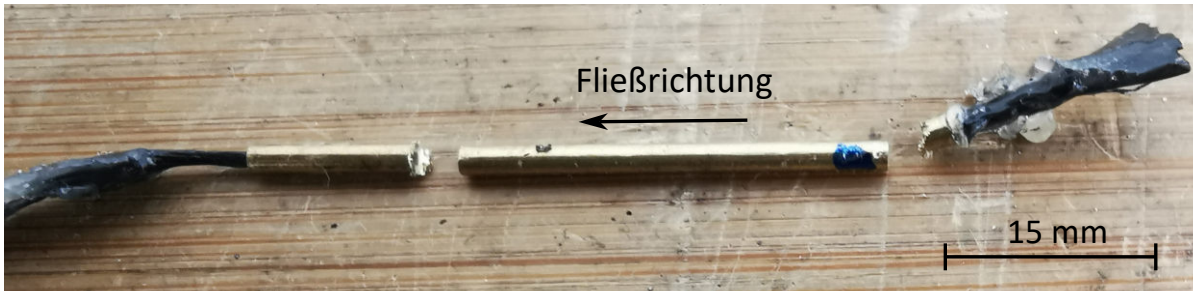



**Abbildung 4.15:** Ausschnitt Rohr 30 mm

Etwaige Unterschiede in der Imprägnierung in Abhängigkeit der durchströmten Strecke werden so sichtbar gemacht. Es gilt zu bedenken, dass für alle drei Messreihen derselbe Rohr-Faser-Aufbau verwendet wurde und über einen längeren Zeitraum Polymerschmelze hindurch geströmt ist. Dies lässt annehmen, dass nach der *Einschwingphase* keine Unterschiede im Flussbild zu erwarten sind.

Der 30 mm lange Rohrabschnitt wird halbiert und mit dem äußeren Ende nach oben zeigend in Acryl eingebettet. Mit 15 mm langen Rohrstücken wird die Messausbeute pro Einbettvorgang erhöht, denn so werden zwei Schnittflächen des Rohrs gleichzeitig für die mikroskopischen Bildaufnahmen vorbereitet. Dies ist eine Zeitersparnis, da die Schnittflächen zusammen geschliffen und poliert werden.

Beide Rohrabschnitte werden in einer Klemmfeder befestigt, in Acryl eingegossen und nach vollständiger Aushärtung geschliffen und poliert, um eine klare Sicht auf die Schnittflächen zu ermöglichen (Abbildung 4.16).

**Abbildung 4.16:** Eingebettete 15 mm Rohrabschnitte

In Abbildung 4.17 und in Abbildung 4.18 sind Mikroskopaufnahmen in zweihundert- und zweitausendfacher Vergrößerung abgebildet. Die Abbildung 4.17 zeigt dabei ein Schnittbild in der Fließrichtung und Abbildung 4.18 zeigt ein Schnittbild entgegen der Fließrichtung. In der linken Bildhälfte wird jeweils die 1,1 mm große Öffnung des Messingrohrs bei einer Vergrößerung um den Faktor Zweihundert betrachtet. Aus diesen Bildausschnitten lassen sich Erkenntnisse über das Auftreten von Race-Tracking-Effekten ableiten. Die rechte Bildhälfte zeigt einen zentralen Bildausschnitt des Kohlenstofffaserrovings, vergrößert um den Faktor Zweitausend. An diesem Ausschnitt lassen sich Aussagen über die Imprägnierung in den Faserswischenräumen treffen.

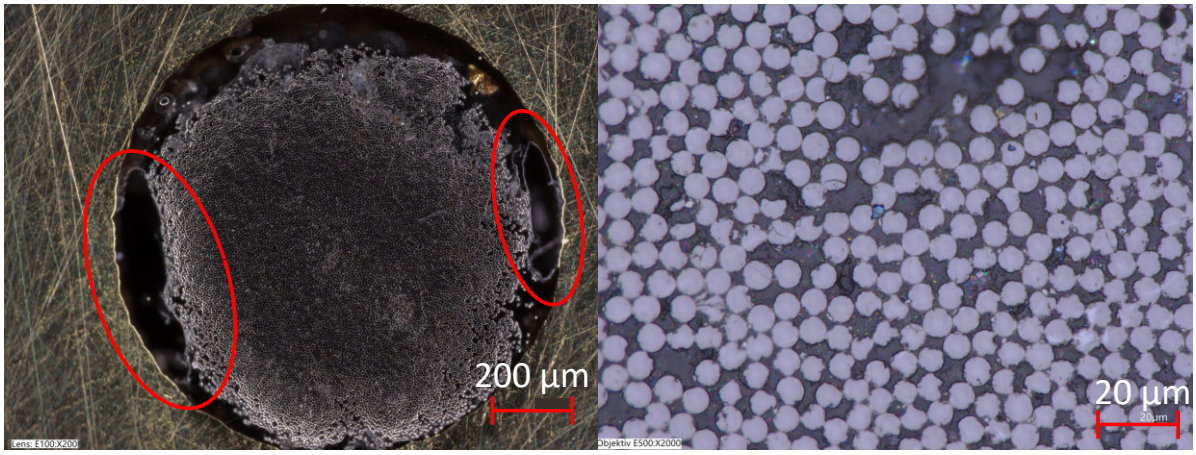



**Abbildung 4.17:** Schnittbilder in Fließrichtung: 200-fach und 2000-fach vergrößert

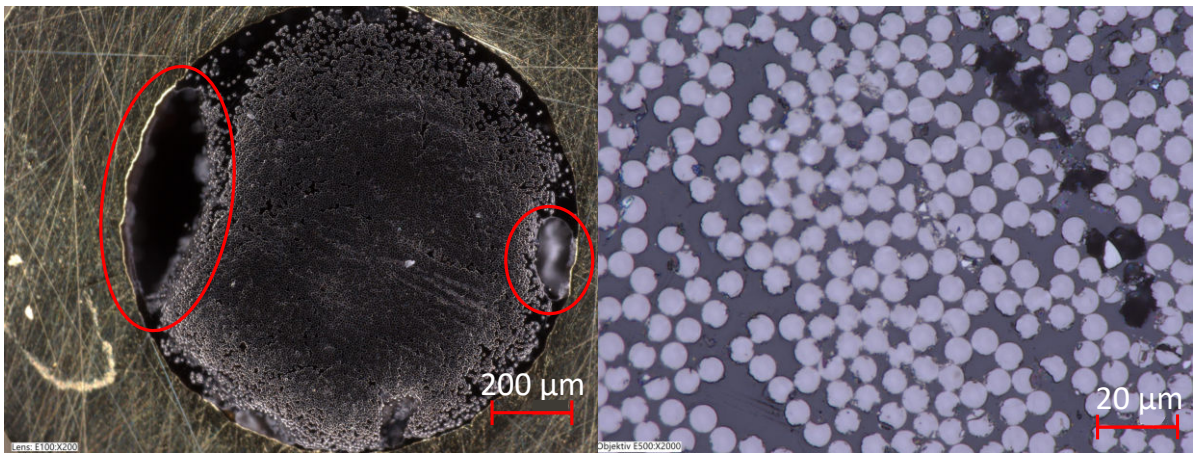



**Abbildung 4.18:** Schnittbilder entgegen der Fließrichtung: 200-fach und 2000-fach vergrößert

Folgend werden zunächst Gemeinsamkeiten der vier Darstellungen beschrieben. Anschließend werden die Unterschiede erarbeitet.

In den jeweils linken Bildhälften ist ein messingfarbener Rand zu sehen, dies sind die Schnittflächen des Messingrohrs. Der kreisrunde Ausschnitt ist der Messkanal, durch den vor Versuchsbeginn der Kohlenstofffaserroving geschoben wurde. Dieser Roving ist die porös anmutende Fläche in den Bildern. Es ist zu erkennen, dass diese poröse Fläche den Messkanal nicht gleichmäßig ausfüllt, sondern ein tiefschwarzer, ungleichmäßiger Rand frei bleibt. Dieser Rand ist reines PLA und lässt darauf schließen, dass der Race-Tracking-Effekt aufgetreten, also schmelzflüssiges Polymer an den Rändern des Messkanals außerhalb der Faserstruktur entlang geflossen ist.

Mögliche Ursachen für das Auftreten dieses Effektes sind in Kapitel 2.3 beschrieben. Ein Auslöser kann ein zu hoher Injektionsdruck sein, der bewirkt, dass die Kohlenstofffasern zusammengepresst werden und so Raum zum Vorbeifließen der Schmelze lassen. Ausgangsseitig auf die Fasern wirkende Zugkräfte können ebenfalls dazu beitragen, dass der Roving kompakter wird und Schmelze vorbei fließt. Da der Roving in den hier betrachteten Versuchen jedoch lose aus dem Permeameter hinaus geführt wurde, wird der Einfluss einer Zugkraft ausgeschlossen werden.

Die Theorie des "zu hohen Injektionsdrucks" lässt sich durch weitere Versuche bei einem niedrigeren Druckniveau und anschließender Bildanalyse überprüfen.

In den Rändern beider Bildausschnitte sind im Polymer eingeschlossene Luftblasen zu sehen (rote Markierung). Dies erklärt das Austreten von Blasen am Ausgang des Permeameters während der Versuchsdurchführung.

Ein Unterschied zwischen Abbildung 4.17 und Abbildung 4.18 ist die Faserverteilung im Rohr und das zu erkennende Luftblasenbild. Eingangsseitig (4.17) werden die kompak-

tierten Fasern zu ca. drei Vierteln vom Polymerrand umschlossen. Im Bild ist links eine ca. 400 µm breite und rechts eine ca. 250 µm breite Luftblasen zu sehen. Ausgangseitig sind die Fasern gleichmäßiger im Rohr verteilt und es ist nur ein schmaler Polymerrand zu erkennen. Jedoch werden die Fasern von zwei Luftblasen, einer 400 µm breiten links und einer 100 µm breiten rechts im Bild 4.18 tailliert zusammengedrückt. Dies lässt die Annahme zu, dass der eingelegte Kohlenstofffaserroving laufend von Luftblasen und Schmelze in Form und Verteilung im Rohr verändert wird.

Die Betrachtung der jeweils rechten Bildhälfte zeigt einen zufällig gewählten und um den Faktor Zweitausend vergrößerten Ausschnitt aus der kompakten Roving-Fläche. Die runden, sich hellgrau absetzenden Flächen sind die einzelnen Kohlenstofffasern. Der dunklere, graue Flächenanteile ist PLA, welches als Schmelze den Roving durchdrungen hat. Vereinzelt sind schwarze Flächen zu erkennen. Dies sind Poren, also Bereiche, in die keine PLA gelangt ist. Die wichtigste Erkenntnis, die auch die Annahmen aus der ersten Versuchsanalyse bestätigt, ist, dass der Kohlenstofffaserroving trotz Race-Tracking auch in den Filamentzwischenräumen imprägniert wurde, sowohl ein- als auch ausgangseitig. Dies beweist, dass das 1D-Permeameter unter Verarbeitungsbedingungen von 12K-Kohlenstofffaserrovings und PLA zu endlosfaserverstärktem 3D-Druckfilament funktionsfähig ist. Die Versuchsparameter sind jedoch so anzupassen, dass die Einzelfilamente des Kohlenstofffaserrovings gleichmäßig im Rohr verteilt bleiben, um Race-Tracking-Effekte zu verhindern.

Aus der Analyse der Abbildungen 4.17 und Abbildung 4.18 ist abzuleiten, dass die Abweichungen des Permeabilitätswerts von Messreihe 3 zu Messeihe 1 und 2 auf Race-Tracking-Effekte zurückzuführen sind. Mit der Bildanalyse lassen sich jedoch lediglich Aussagen über die Ergebnisse von Messreihe 3 treffen. Es ist nicht ausgeschlossen, dass auch in Messreihe 1 und 2 die Ergebnisse der Permeabilität durch Race-Tracking verfälscht sind. Da sich dies nicht ohne weitere Versuche beweisen lässt, werden folgend weitere Einflussgrößen in Betracht gezogen, um eine Grundlage zum Ausschluss von möglichen Einflüssen auf die Unterschiede in den Permeabilitätswerten zu erhalten.

### 4.5.3 Einfluss der Viskosität

Eine weitere mögliche Einflussgröße ist die Strukturviskosität von PLA. Dies zeigt der Vergleich der Permeabilität bei veränderlichen Viskositäten. Eine mit der Erhöhung des Drucks einhergehende Erhöhung des Volumenstroms bewirkt eine Steigerung der Fließ- und Schergeschwindigkeit. Bei strukturviskosen Fluiden geht eine Steigerung der Schergeschwindigkeit mit einem Sinken der Viskosität einher und nimmt einen direkten Einfluss auf die Permeabilität [11, 18]. Durch eine niedrigere Viskosität sinkt bei gleichen

Messwerten die Permeabilität [11].

In Tabelle 4.4 werden zur Berechnung der Permeabilität, Viskositätswerte bei niedrigen Kreisfrequenzen bzw. Schwergeschwindigkeiten von 0,43 rad/s angenommen. Die Betrachtung wird auf den gesamten Frequenzbereich, zu denen Viskositätswerte vorliegen, ausgeweitet. Die Überprüfung dient der Evaluierung, ob durch die Modifikation der dynamischen Viskosität bei höheren Schergeschwindigkeiten Überschneidungen der Permeabilitätswerte der einzelnen Messreihen existieren. Die Messwerte der Druckdifferenz und des Volumenstroms bleiben für die jeweilige Messreihe gleich.

Die entsprechenden Werte der Ober- und Untergrenze sind in Tabelle 4.4 aufgeführt und zur besseren Vergleichbarkeit in Abbildung 4.19 aufgetragen.

| Messreihe Nr. | Dynamische Viskosität bei $\omega = 0,43\ rad/s$ $\eta$ (Pa*s) | Gesättigte Permeabilität (Obergrenze): $K_{x1}$ (m²) | Dynamische Viskosität bei $\omega = 628\ rad/s$ $\eta$ (Pa·s) | Gesättigte Permeabilität (Untergrenze): $K_{x2}$ (m²) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 414,139 | 3,57618E-08 | 158,9 | 1,37E-08 |
| 2 | 414,139 | 7,78512E-08 | 158,9 | 2,99E-08 |
| 3 | 1288,2 | 1,13482E-07 | 253,7739 | 2,24E-08 |

**Tabelle 4.4:** Permeabilität: Ober- und Untergrenze

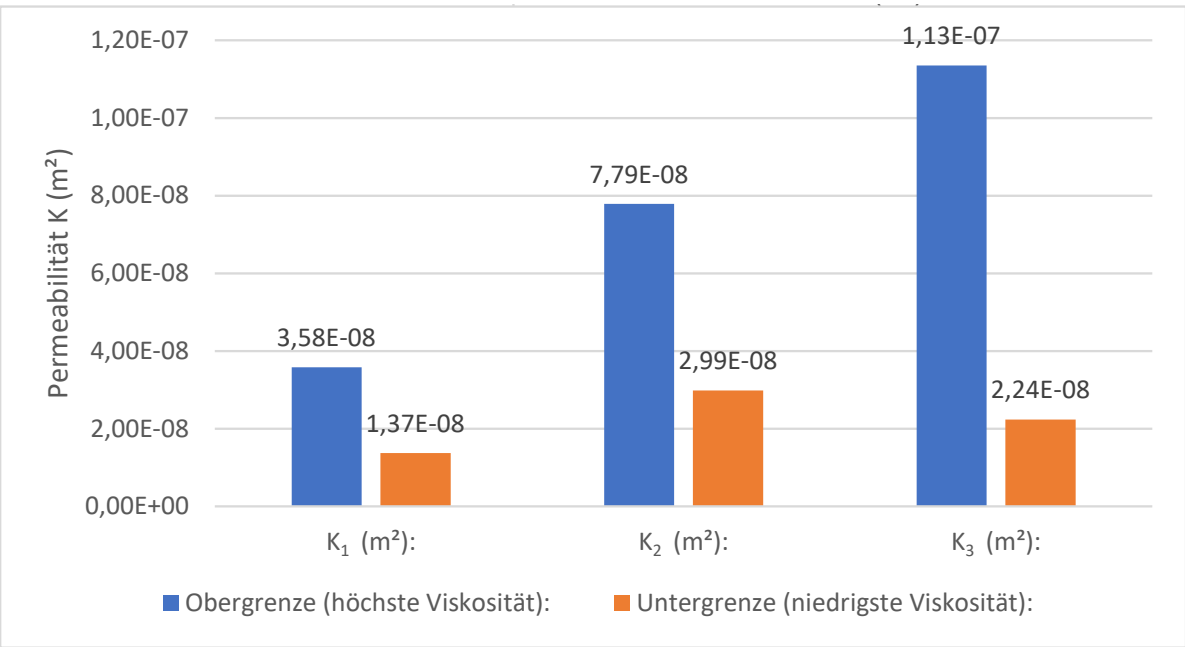



**Abbildung 4.19:** Grenzen der Permeabilität bei höchster/ niedrigster Viskosität

Der Vergleich der Permeabilitätswerte zeigt, dass Überschneidungen der Permeabilitätsbereiche existieren. Der Grenzbereich der Viskositätswerte in denen identische Permeabilität erreicht wird, ist in Abbildung 4.20 dargestellt. Die farbliche Zuordnung definiert die obere Grenze der Permeabilität (blau) und die untere Grenze der Permeabilität (orange).

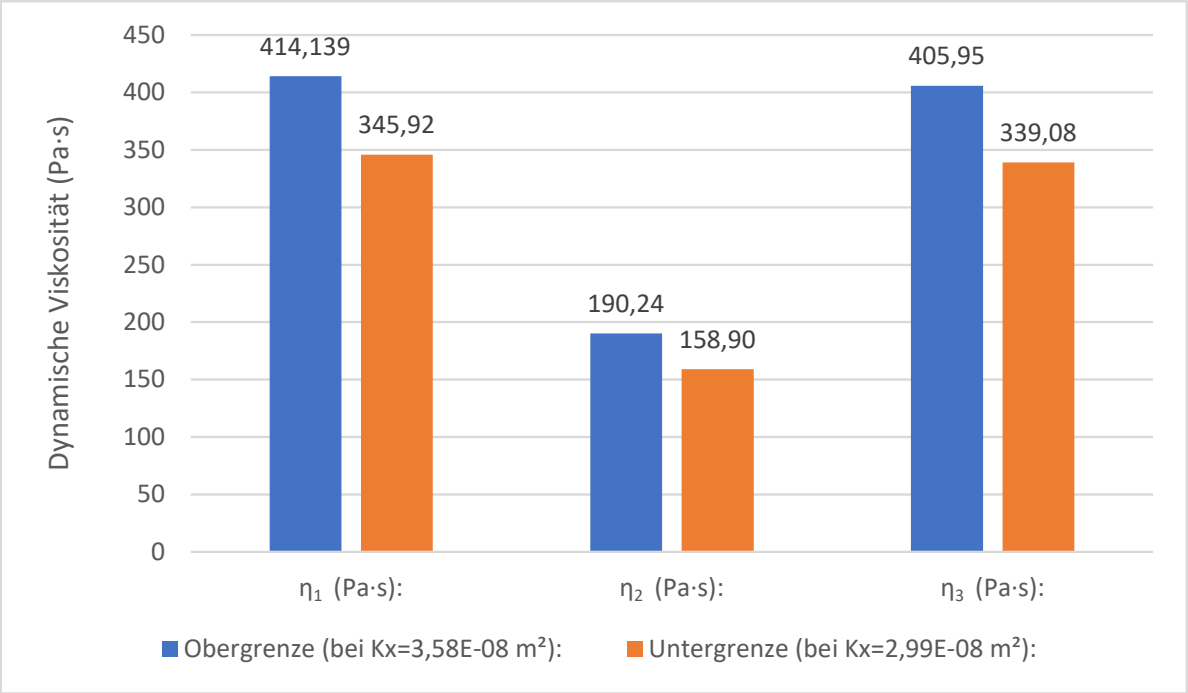



**Abbildung 4.20:** Dynamische Viskosität im sich überschneidenden Permeabilitätsbereich

Dieser Vergleich zeigt, dass falsch angenommene Werte der dynamischen Viskosität der Grund für die Abweichung der in Tabelle 4.3 sein können. Es existiert ein Viskositätsbereich, in dem sich die Werte der Permeabilität überschneiden.

Zur Überprüfung der Plausibilität der Viskositätswerte wird die Permeabilität für jede Messreihe mit allen vorliegenden Viskositätswerten bestimmt und über der viskositätszugehörigen Kreisfrequenz in dem Graphen in Abbildung 4.21 aufgetragen. Zusätzlich wird die obere und untere Grenze des zuvor bestimmten Permeabilitätsbereichs markiert.

In Abbildung 4.21 ist jeweils der Messreihen spezifische Verlauf der Permeabilität über der Kreisfrequenz, bei der die PLA-Schmelze in rheologischen Untersuchungen die zugehörige Viskosität aufweist, zu sehen. Anhand dieses Vergleichs lässt sich feststellen, ob die Viskositätswerte, bei denen die Permeabilität übereinstimmt, realistisch sind. Je näher die Kurven im Überschneidungsbereich zusammenliegen, desto plausibler sind die Viskositätswerte.

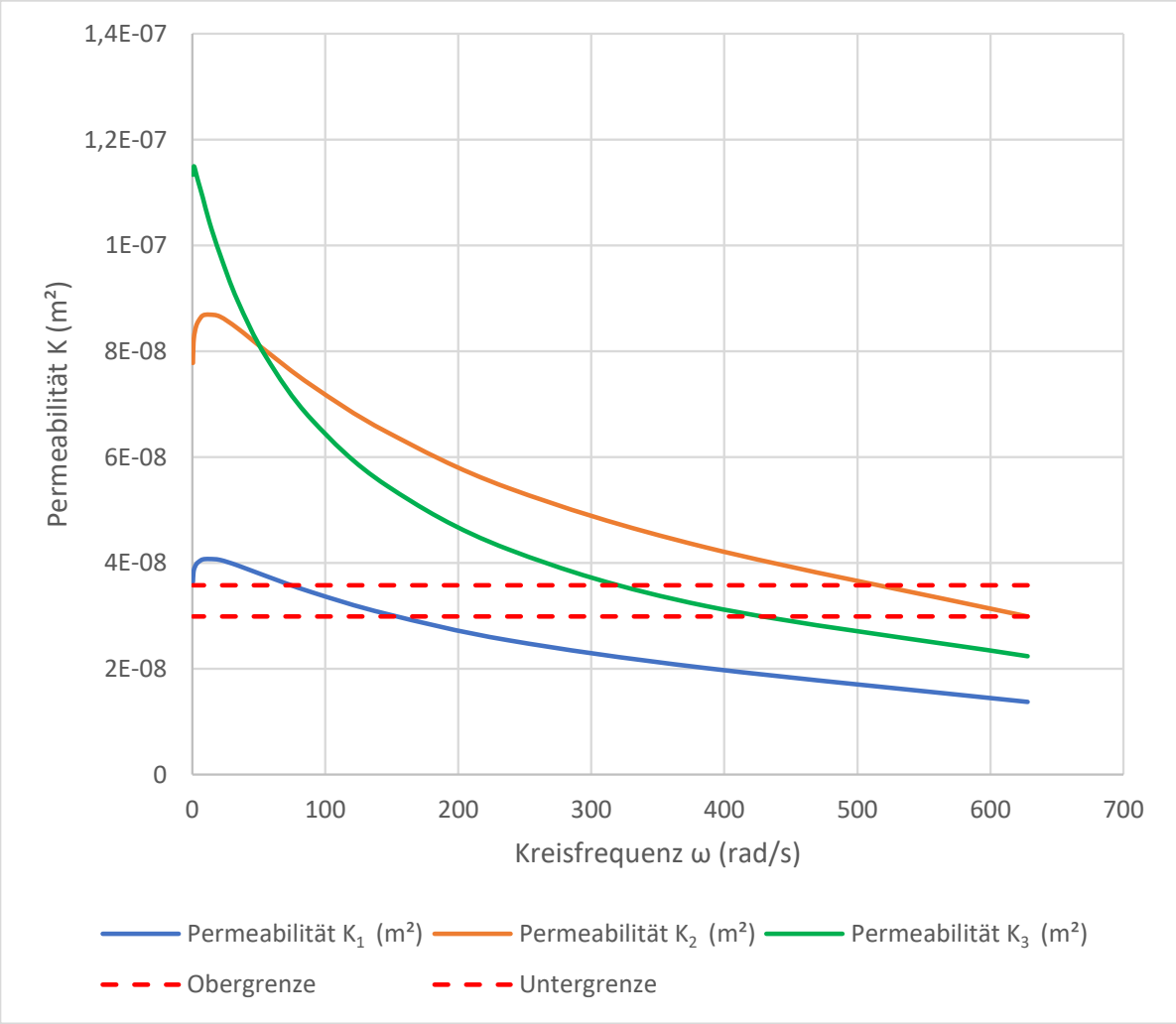



**Abbildung 4.21:** Permeabilität in Abhängigkeit der Viskosität über der zugehörigen Kreisfrequenz

Anhand Abbildung 4.21 ist festzustellen, dass die Werte der Kreisfrequenz von 100 rad/s bis über 600 rad/s zu weit auseinanderliegen, als dass die Viskositätswerte bei gleicher Permeabilität realistisch sind [55].

Es lässt sich die Aussage treffen, dass die unterschiedlichen Permeabilitätswerte nicht nur auf eine falsche Annahme der Viskositätswerte zurückzuführen sind, sondern dass weitere Einflussfaktoren zu beachten sind. Alle Viskositätswerte befinden sich im Bereich erhöhter Kreisfrequenzen und damit auch erhöhter Schergeschwindigkeiten. Dies widerspricht der zuvor getroffenen Annahme der niedrigen Schergeschwindigkeiten. Zusätzlich liegen die Kreisfrequenzen, bei denen die Permeabilität übereinstimmt, zu weit auseinander, um im Prozess realistisch existiert haben zu können.

### 4.5.4 Einfluss des Volumenstroms

Als dritte Begründung für die Abweichung der Permeabilitätswerte wird der Volumenstrom in Betracht gezogen. Um zu ermitteln, wie Abweichungen um den Faktor zwei bis drei zustande kommen, werden mehrere Einflussgrößen analysiert.

Nach der ersten Messreihe wurde der Eingangsdruck für die zweite Messreihe um 10 bar erhöht, ein größerer Volumenstrom ist dadurch zu erwarten. Jedoch hat dieser sich nahezu verdreifacht. Auch im Vergleich zur dritten Messreihe ist der Volumenstrom in Messreihe 2 nahezu doppelt so hoch.

Ein erster Ansatz ist auf Fehler während der Messung zurückzuführen. Die Schmelze tritt so lange aus dem Permeameter aus, bis sich ein Tropfen an der Unterkante des Permeameters gebildet hat, der schwer genug ist, um von allein in den Auffangbecher zu tropfen. Wenn nun der Auffangbecher kurz vor dem Fallen des nächsten Tropfens gewechselt und eine neue Messreihe begonnen wird, zählt dieser während der vorherigen Messreihe ausgetretene Volumenstrom in die falsche Messreihe und verfälscht die Messwerte für beide Messreihen.

Für die Überprüfung, ob ein Messfehler in der Volumenstrommessung vorliegt, wird berechnet, wie hoch der Volumenstrom einer Messreihe sein müsste, um die Permeabilität der anderen Messreihen zu erhalten. Hierfür werden die Viskosität und die Druckdifferenz wie in der Berechnung in Kapitel 4.5.1 angenommen. Der zugehörige Vergleich ist in Abbildung 4.22 dargestellt.

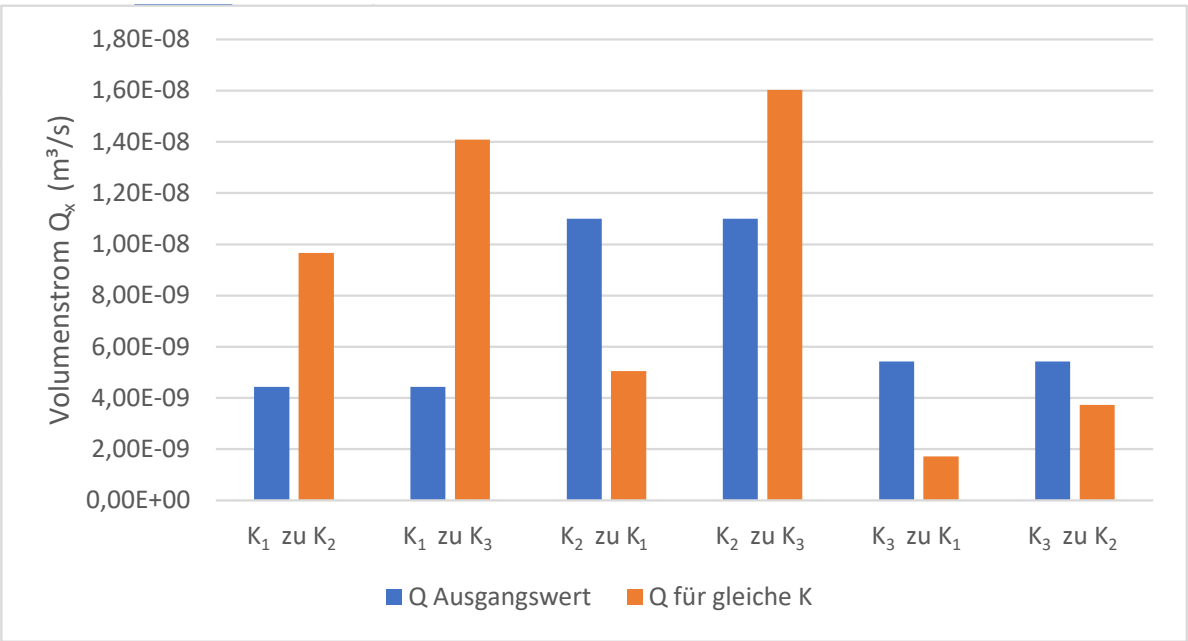



**Abbildung 4.22:** Vergleich zum Einfluss des Volumenstroms auf die Messergebnisse

Die Abbildung 4.22 zeigt den gemessenen Volumenstrom der jeweiligen Messreihe (blau). In Gleichung 2.1 wird statt der zugehörigen Permeabilität die berechnete Permeabilität der anderen Messreihen eingesetzt. Es ergibt sich der Volumenstrom, der durch das Permeameter unter gleichen Messbedingungen geströmt sein müsste, um die Permeabilität der anderen Messreihen zu erreichen. Die Faktoren, um die sich der Volumenstrom ändern müsste, damit gleiche Permeabilitäten vorliegen, sind in Tabelle 4.5 aufgeführt.

| | $K_1 \rightarrow K_2$ | $K_1 \rightarrow K_3$ | $K_2 \rightarrow K_1$ | $K_2 \rightarrow K_3$ | $K_3 \rightarrow K_1$ | $K_3 \rightarrow K_2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Faktor: | 2,18 | 3,17 | 0,46 | 1,46 | 0,32 | 0,69 |

**Tabelle 4.5:** Änderungsfaktor des Volumenstroms für die gleiche Permeabilität

Damit die Permeabilität von Messreihe 1 mit der von Messreihe 1 und 2 übereinstimmt, ist circa eine Verdopplung bzw. Verdreifachung des Volumenstroms notwendig. Aufgrund dieser großen Abweichung lässt sich ein Messfehler während der Versuchsdurchführung, der die Ergebnisse in diesem Maße beeinflusst hat, ausschließen. Der Abweichungsfaktor von Messreihe 2 zu Messreihe 3 beträgt im Vergleich nur 1,46. Dies spricht dafür, dass diese beiden Messreihen während der Versuchsdurchführung ähnlichen, Volumenstrom beeinflussenden Race-Tracking-Effekten ausgesetzt waren.

Mit dem Race-Tracking-Effekt befasst sich der zweite Ansatz zum Untersuchen von möglichen Einflüssen des Volumenstroms auf die Permeabilität.

In der Literatur [50, 56] wird beschrieben, dass der Race-Tracking-Effekt auftreten kann, wenn der Injektionsdruck zu groß ist. Die Höhe und Reihenfolge des Soll-Drucks während der Versuche lässt die Annahme zu, dass der Race-Tracking-Effekt während der ersten Messreihe noch nicht in dem Maße ausgeprägt war, wie in Abbildung 4.17 und Abbildung 4.18 zu sehen. Bei Änderungen des Injektionsdrucks kann es im porösen Material und an dessen Außenrändern zu einer Änderung des Verhältnisses von Kapillarkräften innerhalb der Faserstruktur und den viskosen Kräften im Fluid kommen. Dieses Verhältnis lässt sich anhand der Kappilarzahl $C$ ablesen (Gleichung 4.2) [50].

$$C = \frac{\mu \cdot V}{\sigma} \tag{4.2}$$

Die Kapillarzahl wird mittels Multiplikation von der Viskosität $\mu$ mit der Fließgeschwindigkeit $V$ sowie Division mit der Oberflächenspannung $\sigma$ bestimmt. Eine niedrige Kapillarzahl bedeutet, dass das Matrixmaterial besser in die Faserzwischenräume eindringt, da die kapillaren Kräfte überwiegen. Bei einer hohen Kapillarzahl überwiegen die viskosen Kräfte im Fluid. Das Matrixmaterial sucht sich den Weg des geringsten Widerstandes,

in diesem Fall zwischen Rohr und Kohlenstofffaserroving hindurch und begünstigt damit den Race-Tracking-Effekt [50, 56].

Diese theoretische Betrachtung deckt sich mit den Beobachtungen im Versuchsablauf.

Durch die Eingangsdruckerhöhung von Messreihe 1 zu Messreihe 2 um 10 bar erhöht sich die Fließgeschwindigkeit, die Kapillarzahl steigt und Race-Tracking entlang der Rohrinnenseite beginnt [50]. Durch den Versuchsaufbau und die automatisierte Regelung des Soll-Drucks lässt sich die Annahme treffen, dass der Race-Tracking-Effekt selbstverstärkend wirkt, sobald er auftritt. Dies lässt sich durch einen vom Race-Tracking ausgelösten Druckabfall in der Kavität begründen [22, 25, 56]. Wenn der Ist-Druck abfällt, regelt der Extruder automatisch nach, um den Soll-Druck zu halten. Eine Druckerhöhung führt zu einer höheren Fließgeschwindigkeit, damit zu einer höheren Kapillarzahl und einem größeren Volumenstrom im Permeameter.

Auch die Betrachtung des Volumenstroms in Abhängigkeit der Viskosität bei konstanter Permeabilität bestätigt das Auftreten von Race-Tracking (Abbildung 4.23).

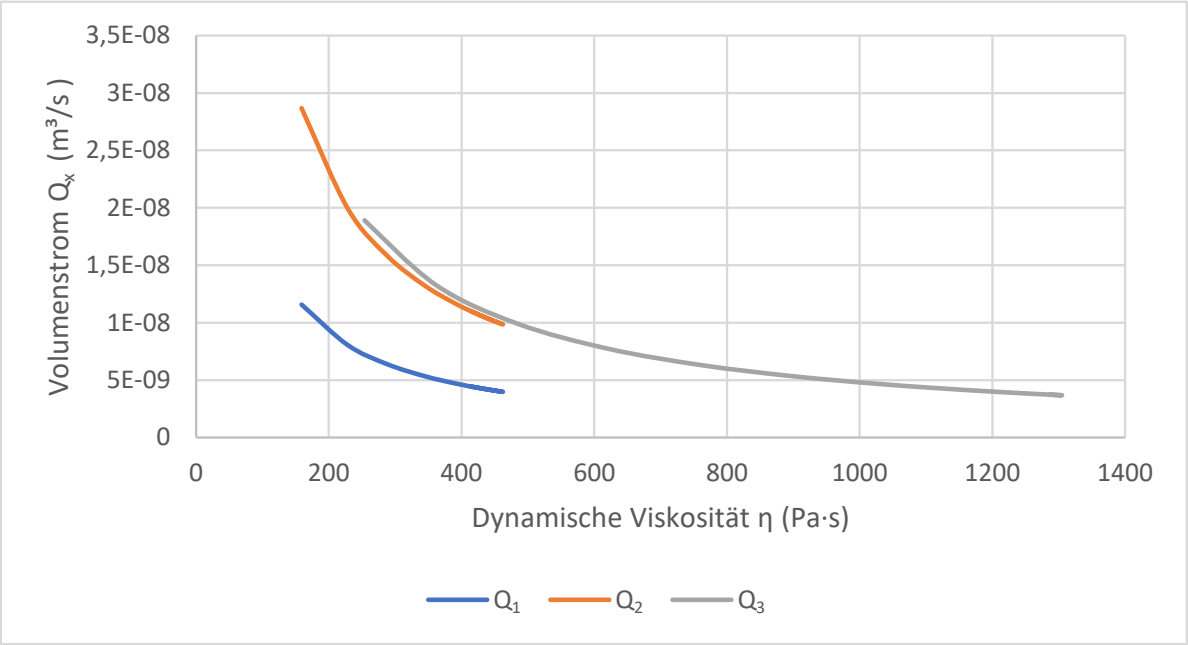



**Abbildung 4.23:** Verlauf des Volumenstroms bei variabler Viskosität und gleichbleibender Permeabilität

Durch die abgesenkte Temperatur um 20 °C auf 210 °C steigt die Viskosität der PLA-Schmelze und der Volumenstrom nimmt bei gleichbleibendem Druck ab, bleibt aber auf einem höheren Niveau verglichen mit der ersten Messreihe.

Bei gleicher Viskosität müsste $Q_2$ niedriger oder $Q_3$ höher bzw. der Abstand beider Kurven größer sein. Denn für $Q_3$ müssen weitaus höhere Scher- und Fließgeschwindigkeiten

vorliegen und damit ein höherer Volumenstrom als bei $Q_2$ auftreten.

Es gilt ein geeignetes Verhältnis zwischen Kapillarkräften und viskosen Kräften einzustellen. Dabei muss der Druck so angepasst werden, dass die Kapillarzahl zu diesem Versuchsaufbau passt [50]. Die Literatur bestätigt, dass bei unidirektionalen Faserstrukturen wie dem hier eingesetzten 12K-Kohlenstofffaserroving Race-Tracking-Effekte bei separierten Strukturen wie einem einzelnen Roving im Rohr, um die einzelnen Fasersträge nicht zu vermeiden sind. Es kommt bei diesen Strukturen folglich immer zu einem Voreilen der Fließfront an den Rändern der Kavität oder zwischen den einzelnen Fasersträngen [25]. Wird dieses Verhalten auch für den vorliegenden Fall beobachtet, muss die Berechnung entsprechend angepasst werden.

# 5 Zusammenfassung und kritische Betrachtung

In Kapitel 5 erfolgt eine Zusammenfassung der Ergebnisse sowie eine kritische Betrachtung der vorliegenden Masterarbeit. Die in jeder Entwicklungsphase des 1D-Permeameters gewonnenen Erkenntnisse werden in einen Kontext mit der Versuchsdurchführung gebracht und anhand der Versuchsergebnisse bewertet.

Die Konzeption und Entwicklung des 1D-Permeameters wurde dem Zeitplan entsprechend abgeschlossen und anhand eines Prototyps überprüft. Anschließend wurden die entwickelten technischen Zeichnungen an einen ausgewählten Fertigungsbetrieb übergeben. Im Finalentwurf des 1D-Permeameters wurden alle in Kapitel 3 erarbeiteten zu erfüllenden Anforderungen unter Zuhilfenahme des theoretischen Wissens, erarbeitet in Kapitel 2 im Zuge einer Literaturrecherche, umgesetzt. Die Konzepte der Nebenmodule zur Simulation einer Abziehkraft sowie zum Aufbringen eines Vakuums wurden erstellt. Das Folgen der Entwicklungsvorgaben aus der Richtlinie VDI 2221 ermöglichte einen strukturierten Entwicklungsprozess, der mit der Lieferung des 1D-Permeameters erfolgreich abgeschlossen wurde.

Die Funktionalität des 1D-Permeameters wurde anhand einer ersten Parameterstudie demonstriert. Die Ergebnisse der Auswertung der ermittelten Messwerte sowie der Analyse der Versuchsdurchführung dienen der Bewertung der Funktionalität des im Zuge dieser Masterarbeit entwickelten 1D-Permeameters. Die Berechnung der eindimensionalen gesättigten Permeabilität unter der Annahme von einer Viskosität bei niedriger Schergeschwindigkeit ergab die in Tabelle 4.3 aufgeführten Permeabilitätswerte. Eine signifikante Abweichung der Einzelwerte voneinander wurde festgestellt. Im Anschluss erfolgte eine Identifikation sowie Untersuchung der möglichen Einflussfaktoren auf die Messergebnisse. Im Rahmen der Untersuchung wurde zunächst der Einfluss der Handhabung des 1D-Permeameters während der Versuchsdurchführung überprüft, um etwaige praktische Messfehler auszuschließen. Zudem wurde der Einfluss der Viskosität und des Volumenstroms im vorliegenden Kontext analysiert.

Die Handhabung des 1D-Permeameters erfolgte gemäß den Vorgaben der Entwicklung.

Die integrierte Faserbefestigung sowie die Führung des Kohlenstofffaserrovings durch ein Messingrohr stellen effektive und einfache Konzepte dar, um die Kohlenstofffaserrovings in das 1D-Permeameter einzubringen und zu entnehmen. Die Erfüllung der Anforderung, die imprägnierten Rovings nach der Versuchsdurchführung entnehmen und weitergehend untersuchen zu können, wurde mit der optischen Analyse des Rovingschnittbilds in Kapitel 4.5.2 bewiesen.

Die Integration aller elektronischen Bauteile zur Messung des Druckgradienten und der Temperatur sowie zum Einbringen von Wärme erfolgt wie vorgesehen. Die Bauteile sind für die Versuchsbedingungen geeignet und lassen sich über die Regelungsschnittstelle steuern sowie auslesen.

Die Anbindung des 1D-Permeameters an den Extruder mithilfe der Spannkettenflansche ist funktionsfähig. Die Beschädigung durch das Abbrechen des Anbindungsgewindes offenbart eine konstruktive Schwäche der Entwicklung sowie Versäumnisse in der Versuchsvorbereitung. Für eine zweite Version des Produkts ist eine Neudimensionierung des Anbindungsgewindes unabdingbar, um äußeren Einflüssen besser widerstehen zu können. Des Weiteren hat sich die Relevanz einer gründlichen Reinigung und Prüfung des 1D-Permeameters vor der Versuchsdurchführung bestätigt. Dies gilt insbesondere für die Überprüfung aller Gewinde im Permeameter und den Anbauteilen auf Fremdkörper und Verunreinigungen, um so die Gefahr eines beschädigten Gewindes und einer dadurch unlösbaren Verschraubung auszuschließen. Die Reinigung der Dichtflächen ist von essentieller Bedeutung, um das 1D-Permeameter vor weiteren Beschädigungen zu schützen und die Qualität der Messungen durch eine optimierte Dichtwirkung an allen Verbindungsstellen zu steigern.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden für alle Messreihen derselbe Einleger aus Kohlenstofffaserroving und Messingrohr verwendet. Eine exakte Bestimmung der Permeabilität erfordert die Verwendung eines neuen Einlegers bei jeder Veränderung der Parameter. Dadurch lassen sich Einflüsse durch abweichende Versuchsparameter auf den Kohlenstofffaserroving ausschließen, beispielsweise eine Verdichtung der Fasern durch einen höheren Injektionsdruck.

Ein Messfehler bei der Erfassung des Volumenstroms, der die deutliche Abweichung der Permeabilitätswerte voneinander belegt, konnte anhand eines Vergleichs (vgl. Abbildung 4.22) ausgeschlossen werden. Der Messfehler des Volumenstroms der jeweiligen Messreihe muss demnach einen Faktor von 2 bis 3 aufweisen. Für eine genaue Bestimmung des Volumenstroms ist dennoch darauf zu achten, dass sich das gesamte aus dem Permeameterausgang ausgetretene Polymer im Messbehälter befindet. Dies wird durch z. B. rückstandsloses Abtragen der Polymerschmelze in den Auffangbehälter unmittelbar

nach dem Ende der Messung gewährleistet.

Neben den Erkenntnissen aus dem praktischen Umgang mit dem 1D-Permeameter zeigen auch die Ergebnisse der Auswertungen ein Potenzial zur Verbesserung des Prozesses auf. Die in der Auswertung der Daten vorgestellten Möglichkeiten für Abweichung der Permeabilitätswerte der drei Messreihen zueinander stellen eine Grundlage zur erfolgreichen Parameterfindung dar.

Die Hypothese, dass die Abweichungen der Permeabilität allein durch eine falsch angenommene Viskosität erklärt werden können, konnte anhand eines Vergleichs der Permeabilitätswerte unter Einbezug des gesamten vorliegenden Viskositätsspektrums ausgeschlossen werden. Es wurde nachgewiesen, dass weitere Einflussgrößen an der Abweichung der Werte beteiligt sein müssen.

Die Analyyse der Schnittbilder (vgl. Abbildung 4.17,4.18) offenbart das Auftreten des Race-Tracking-Effekts, der entsprechend der durchgeführten Analyse mit großer Wahrscheinlichkeit für die Abweichungen der gemessenen Permeabilitätswerte verantwortlich ist. Dies wird durch die Betrachtung des Einflusses der Viskosität und des Volumenstroms auf die Permeabilität und den Zusammenhang mit dem Race-Tracking-Effekt bestätigt. Ein von Messreihe 1 zu Messreihe 2 erhöhter Druck kann zu einer Erhöhung der Kapillarzahl geführt und Race-Tracking begünstigt haben. Durch das Auftreten des Fehlers und den Vergleich der möglichen Einflüsse auf die Permeabilität und das Strömungsverhalten der Polymer-Schmelze wurde eine Grundlage erstellt, die in zukünftigen Versuchen dabei hilft, die richtigen Versuchsparameter einzustellen, um das Auftreten des Race-Tracking-Effekts zu erkennen und zu minimieren. Dies trägt zur Verbesserung der Genauigkeit der Permeabilitätsmessung bei. Aufgrund der Erkenntnisse aus den Messungen wird die erste Parameterstudie als erfolgreich erachtet.

Eine kritische Betrachtung muss jedoch berücksichtigen, dass es sich bei dem gebauten 1D-Permeameter um die ersten Iterationen in einem Entwicklungsprozess handelt. Die Realisierung eines ausgereiften Produkts erfordert weitere Iterationen, um aus den bei der Entwicklung des 1D-Permeameters aufgetretenen Fehlern zu lernen und diese in einer neuen Version des Permeameters zu korrigieren. Des Weiteren sind weitere Versuche mit unterschiedlichen Faser- und Matrixmaterialien erforderlich, um die genannten Erkenntnisse zu verifizieren. Weiterhin ist es vorteilhaft, wenn sich die Temperaturen, bei denen die Versuche durchgeführt werden, auf diese beschränken, zu denen auch rheologische Daten des Testfluids vorliegen oder rheologische Untersuchungen bei den entsprechenden Temperaturen durchgeführt werden. Die Verwendung extrapolierter Rheologie-Werte stellt eine geeignete Näherung dar, sollte jedoch durch real ermittelte Werte ersetzt werden.

Im Gesamtfazit lässt sich festhalten, dass die mit dem Forschungsauftrag geforderte Entwicklung und der Bau eines 1D-Permeameters für Faserrovings mit anschließender Untersuchung der Funktionsfähigkeit erfolgreich umgesetzt wurde. Aus der optischen Analyse der Schnittbilder (Abbildung 4.17, Abbildung 4.18) des im Messingrohr imprägnierten 12K-Kohlenstofffaserrovings und der Beurteilung der Dichtheit des 1D-Permeameters (Abbildung 4.11) lässt sich folgend zusammengefasst die wertvollste Erkenntnis generieren. Die Funktionsfähigkeit des 1D-Permeameters sowie die Möglichkeit zur Bestimmung der Permeabilität ist gegeben. Die vollständige Imprägnierung des Kohlenstofffaserrovings durch die Polymerschmelze ist erfolgt. Die Messflüssigkeit fließt vollständig durch den Messkanal. Dabei werden auch die Zwischenräume der einzelnen Kohlenstofffasern durchdrungen.

Die Möglichkeit, die eindimensionale Permeabilität einzelner Faserrovings zu bestimmen, ist nach dem aktuellen Stand der Technik nicht bekannt, weshalb die ihm Rahmen der vorliegenden Masterarbeit umgesetzte Entwicklung dabei helfen kann, bisher ungeklärte Forschungsfragen zu beantworten. Dies betrifft insbesondere die Bewertung des Imprägnierverhaltens in der Herstellung von endlosfaser-verstärkten Halbzeugen für den 3D-Druck.

Aufgrund der Neuheit des Verfahrens werden Bestrebungen verfolgt, das während der Durchführung dieser Masterarbeit erarbeitete Konzept der Permeabilitätsmessung in einer DLR internen Erfindungsmeldung zu veröffentlichen und anschließend patentieren zu lassen.

# 6 Ausblick

Weiterer Forschungsbedarf ergibt sich aus dem Forschungsziel, genaue Permeabilitätswerte mit dem entwickelten 1D-Permeameter zu bestimmen. Die grundsätzliche Funktionalität des 1D-Permeameters wurde zwar im Zuge dieser Arbeit bestätigt, jedoch konnten noch keine verlässlichen Ergebnisse über die genaue Permeabilität des eingesetzten Kohlenstofffaserrovings erforscht werden. Es wäre in diesem Zusammenhang sinnvoll zu untersuchen, inwieweit die Anlagenparameter optimiert werden müssen, um für den Fertigungsprozess von endlosfaserverstärktem 3D-Druckfilament hilfreich zu sein.

Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit, weitere Versuche mit dem vorliegenden Permeameter durchzuführen, bis die Steuerungsparameter gefunden sind. Während des praktischen Einsatzes des 1D-Permeameters ist es wahrscheinlich, dass sich weitere Verbesserungspotenziale in der Konstruktion und dem Gesamtaufbau offenbaren. Bei den Versuchserweiterungen ist es empfehlenswert, bei jedem Versuchsdurchlauf auch die ungesättigte Permeabilität zu messen. Dies lässt sich zum Beispiel durch eine Rückberechnung des Fließfrontverlaufs erreichen [12].

Mit einer verbesserten Neuauflage lassen sich auch die vorgestellten Konzepte zum Aufbringen eines Vakuums sowie das Simulieren der Abziehkraft, die während des Fertigungsprozesses von endlosfaserverstärktem 3D-Druckfilament auf den FKV wirkt, prüfen. Die Integration dieser Nebenmodule in den Versuchsaufbau ermöglicht die Abbildung einer Vielzahl weiterer Fertigungsszenarien, wodurch eine präzisere Untersuchung der Versuchs- und Fertigungsparameter möglich ist.

Bei der Fortführung der Versuche ist es sinnvoll, weitere Faser- und Matrixmaterialien zu testen. Die Entnehmbarkeit der imprägnierten Faserrovings eröffnet weitaus mehr Möglichkeiten zur nachträglichen Untersuchung als die alleinige optische Analyse mit dem Mikroskop. Z. B. sind messabschnittsweise Untersuchungen des Faservolumengehalts (TGA) denkbar. Sind ausreichend viele Einflussparameter auf die Permeabilität von einzelnen Faserrovings zusammengetragen, besitzt die entwickelte Technologie das Potenzial, bei der optimalen Parametereinstellung beliebiger Faser-Thermoplast Kombinationen im Fertigungsprozess von endlosfaser-verstärktem 3D-Druckfilament zu unterstützen.

# Literaturverzeichnis

[1] Mostafa Yakout and M. A. Elbestawi. Additive manufacturing of composite materials: an overview. In *Proceedings of the 6th International Conference on Virtual Machining Process Technology (VMPT), Montréal, QC, Canada*, volume 29, 2017.

[2] Maik Titze, Fabian Kühnast, Matteo Rege, and Johannes Riemenschneider. Production of continuous fiber-reinforced 3d printing filaments using ultrasound. *SAMPE Europe Conference 2021 Baden/Zürich - Switzerland*, 2021.

[3] Manfred Neitzel, Peter Mitschang, and Ulf Breuer. *Handbuch Verbundwerkstoffe: Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung*. Hanser eLibrary. Hanser, München, 2., aktualisierte und erweiterte auflage edition, 2014. ISBN 978-3-446-43696-1. doi: 10.3139/9783446436978. URL `http://www.hanser-elibrary.com/doi/book/10.3139/9783446436978`.

[4] Helmut Schürmann. *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2007. ISBN 978-3-540-72189-5. doi: 10.1007/978-3-540-72190-1.

[5] Klaus Hildebrandt. *Material-und prozessspezifische Einflüsse auf Oberflächeneigenschaften von endlosfaserverstärkten Thermoplasten*. PhD thesis, Technische Universität Kaiserslautern, 2015.

[6] Gottfried W. Ehrenstein. *Faserverbund-Kunststoffe: Werkstoffe - Verarbeitung - Eigenschaften*. Hanser, München and Wien, 2., völlig überarbeitete auflage edition, 2006. ISBN 978-3-446-22716-3.

[7] Krishan K. Chawla. *Composite Materials*. Springer International Publishing, Cham, 2019. ISBN 978-3-030-28982-9. doi: 10.1007/978-3-030-28983-6.

[8] Ludwig Hamm, Volker Peitz, Berthold Krautkrämer, Reinhart Malik, Peter Solfrank, and Robert Plank. Werkstoffe und fertigungsverfahren. In Hans-Hermann Braess and Ulrich Seiffert, editors, *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtech-*

*nik*, ATZ/MTZ-Fachbuch, pages 1039–1131. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2013. ISBN 978-3-658-01690-6. doi: 10.1007/978-3-658-01691-3{\textunderscore}10.

[9] C. Mayer, X. Wang, and M. Neitzel. Macro- and micro-impregnation phenomena in continuous manufacturing of fabric reinforced thermoplastic composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 29(7):783–793, 1998. ISSN 1359835X. doi: 10.1016/S1359-835X(98)00056-6.

[10] Andreas Wöginger. *Prozesstechnologien zur Herstellung kontinuierlich faserverstärkter thermoplastischer Halbzeuge: Zugl.: Kaiserslautern, Univ., Diss., 2003*, volume 41 of *IVW-Schriftenreihe*. Institut für Verbundwerkstoffe, Kaiserslautern, als ms. gedr edition, 2004. ISBN 3-934930-37-9.

[11] Henry Darcy. *Les fontaines publiques de la ville de Dijon: Exposition et application des principes à suivre et des formules à employer dans les questions de distribution d'eau*. Victor Dalmont, 1856.

[12] Timo Stöven. *Beitrag zur Ermittlung der Permeabilität von flächigen Faserhalbzeugen: Zugl.: Kaiserslautern, Techn. Univ., Diss., 2004*, volume 45 of *IVW-Schriftenreihe*. Inst. für Verbundwerkstoffe, Kaiserslautern, als ms. gedr edition, 2004. ISBN 3-934930-41-7.

[13] Richard S. Parnas. *Liquid composite molding*. Hanser eLibrary. Hanser and Hanser Gardner, Munich and Cincinnati, 2000. ISBN 9783446443020. doi: 10.3139/9783446443020.

[14] C. Lekakou and M. G. Bader. Mathematical modelling of macro- and micro-infiltration in resin transfer moulding (rtm). *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 29(1-2):29–37, 1998. ISSN 1359835X. doi: 10.1016/S1359-835X(97)00030-4. URL `https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359835X97000304`.

[15] K. M. Pillai and S. G. Advani. Numerical simulation of unsaturated flow in woven fiber preforms during the resin transfer molding process. *Polymer Composites*, 19 (1):71–80, 1998. ISSN 0272-8397. doi: 10.1002/pc.10077.

[16] B. Rikard Gebart. Permeability of unidirectional reinforcements for rtm. *Journal of Composite Materials*, 26(8):1100–1133, 1992. ISSN 0021-9983.

[17] T.S Lundström. The permeability of non-crimp stitched fabrics. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 31(12):1345–1353, 2000. ISSN 1359835X. doi: 10.1016/S1359-835X(00)00037-3.

[18] Thomas Schröder. *Rheologie der Kunststoffe: Theorie und Praxis*. Hanser eLibrary. Hanser, München, 2018. ISBN 978-3-446-45405-7. doi: 10.3139/9783446457225.

[19] C. Binetruy, B. Hilaire, and J. Pabiot. Tow impregnation model and void formation mechanisms during rtm. *Journal of Composite Materials*, 32(3):223–245, 1998. ISSN 0021-9983. doi: 10.1177/002199839803200302.

[20] R. Arbter, J. M. Beraud, C. Binetruy, L. Bizet, J. Bréard, S. Comas-Cardona, C. Demaria, A. Endruweit, P. Ermanni, F. Gommer, S. Hasanovic, P. Henrat, F. Klunker, B. Laine, S. Lavanchy, S. V. Lomov, A. Long, V. Michaud, G. Morren, E. Ruiz, H. Sol, F. Trochu, B. Verleye, M. Wietgrefe, W. Wu, and G. Ziegmann. Experimental determination of the permeability of textiles: A benchmark exercise. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 42(9):1157–1168, 2011. ISSN 1359835X. doi: 10.1016/j.compositesa.2011.04.021.

[21] U. Huber. *Zur methodischen Anwendung der Simulation der Harzinjektionsverfahren*. Kaiserslautern, 2001. URL `https://kluedo.ub.rptu.de/files/5616/ivw-sr%2026%20huber%20komplett%20f%c3%bcr%20kluedo.pdf`.

[22] Gunnar Rieber. *Einfluss von textilen Parametern auf die Permeabilität von Multifilamentgeweben für Faserverbundkunststoffe*. PhD thesis, Dissertation, Kaiserslautern, Technische Universität Kaiserslautern, 2011, 2011.

[23] A. Endruweit and A. C. Long. Analysis of compressibility and permeability of selected 3d woven reinforcements. *Journal of Composite Materials*, 44(24):2833–2862, 2010. ISSN 0021-9983. doi: 10.1177/0021998310369586.

[24] K. Yazdchi, S. Srivastava, and S. Luding. Microstructural effects on the permeability of periodic fibrous porous media. *International Journal of Multiphase Flow*, 37(8): 956–966, 2011. ISSN 03019322. doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2011.05.003.

[25] S. Bickerton. Characterization and modeling of race-tracking in liquidcomposite molding processes. *Composites Science and Technology*, 59(15):2215–2229, 1999. ISSN 02663538. doi: 10.1016/S0266-3538(99)00077-9.

[26] Simon Bickerton and Suresh G. Advani. Experimental investigation and flow visualization of the resin-transfer mold-filling process in a non-planar geometry. *Composites Science and Technology*, 57(1):23–33, 1997. ISSN 02663538. doi: 10.1016/S0266-3538(96)00100-5.

[27] A. Hammami, R. Gauvin, F. Trochu, O. Touret, and P. Ferland. Analysis of the edge effect on flow patterns in liquid composites molding. *Applied Composite Materials*, 5(3):161–173, 1998. ISSN 1573-4897. doi: 10.1023/A:1008887400832. URL `https://link.springer.com/article/10.1023/a:1008887400832`.

[28] A. Hammami, R. Gauvin, and F. Trochu. Modeling the edge effect in liquid composites molding. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 29(5-6): 603–609, 1998. ISSN 1359835X. doi: 10.1016/S1359-835X(97)00120-6.

[29] S. K. Gupte and S. G. Advani. Flow near the permeable boundary of a porous medium: An experimental investigation using lda. *Experiments in Fluids*, 22(5): 408–422, 1997. ISSN 1432-1114. doi: 10.1007/s003480050067. URL `https://link.springer.com/article/10.1007/s003480050067`.

[30] Masoud Bodaghi, Pavel Simacek, Nuno Correia, and Suresh G. Advani. Experimental parametric study of flow–induced fiber washout during high–injection–pressure resin transfer molding. *Polymer Composites*, 41(3):1053–1065, 2020. ISSN 0272-8397. doi: 10.1002/pc.25437.

[31] S. Drapier. Influence of the stitching density on the transverse permeability of non-crimped new concept (nc2) multiaxial reinforcements: measurements and predictions. *Composites Science and Technology*, 62(15):1979–1991, 2002. ISSN 02663538. doi: 10.1016/S0266-3538(02)00127-6. URL `https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266353802001276`.

[32] Kevin Potter. *Resin Transfer Moulding*. Springer Netherlands, Dordrecht, 1997. ISBN 978-94-010-6497-2. doi: 10.1007/978-94-009-0021-9.

[33] J. R. Weitzenböck, R. A. Shenoi, and P. A. Wilson. Measurement of three-dimensional permeability. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 29(1-2):159–169, 1998. ISSN 1359835X. doi: 10.1016/S1359-835X(97)00049-3. URL `https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359835X97000493`.

[34] T. Stöven, F. Weyrauch, P. Mitschang, and M. Neitzel. Continuous monitoring of three-dimensional resin flow through a fibre preform. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 34(6):475–480, 2003. ISSN 1359835X. doi: 10.1016/S1359-835X(03)00059-9. URL `https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359835X03000599`.

[35] V. Shafi. *Beitrag zur Charakterisierung der Permeabilität flächiger Verstärkungsmaterialien*. Kaiserslautern, 1996.

[36] Richard S. Parnas, J. Grant Howard, Thomas L. Luce, and Suresh G. Advani. Permeability characterization. part 1: A proposed standard reference fabric for permeability. *Polymer Composites*, 16(6):429–445, 1995. ISSN 0272-8397. doi: 10.1002/pc.750160602.

[37] Y. de Parserval, K. M. Pillai, and S. G. Advani. A simple model for the variation of permeability due to partial saturation in dual scale porous media. *Transport in Porous Media*, 27(3):243–264, 1997. ISSN 1573-1634. doi: 10.1023/A:1006544107324. URL `https://link.springer.com/article/10.1023/a:1006544107324`.

[38] K. M. Pillai and S. G. Advani. A model for unsaturated flow in woven fiber preforms during mold filling in resin transfer molding. *Journal of Composite Materials*, 32 (19):1753–1783, 1998. ISSN 0021-9983. doi: 10.1177/002199839803201902.

[39] P. Mitschang, M. Glawe, D. Kreutz, G. Rieber, and D. Becker. Influence of textile parameters on the through-the-thickness permeability of woven textiles. *FPCM-11*, 2012.

[40] Gunnar Rieber, Jinhua Jiang, Carsten Deter, Nanliang Chen, and Peter Mitschang. Influence of textile parameters on the in-plane permeability. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 52:89–98, 2013. ISSN 1359835X. doi: 10.1016/j.compositesa.2013.05.009.

[41] Christian Kissinger. *Ganzheitliche Betrachtung der Harzinjektionstechnik: Messsystem zur durchgängigen Fertigungskontrolle: Zugl.: Kaiserslautern, Univ., Diss., 2001*, volume 28 of *IVW-Schriftenreihe*. Institut für Verbundwerkstoffe, Kaiserslautern, als ms. gedr edition, 2001. ISBN 3-934930-24-7.

[42] G. R. Palmese and V. M. Karbhari. Effects of sizings on microscopic flow in resin transfer molding. *Polymer Composites*, 16(4):313–318, 1995. ISSN 0272-8397. doi: 10.1002/pc.750160408.

[43] V. M. Karbhari and G. R. Palmese. Sizing related kinetic and flow considerations in the resin infusion of composites. *Journal of Materials Science*, 32(21):5761–5774, 1997. ISSN 0022-2461. doi: 10.1023/A:1018626002895.

[44] Da Steenkamer, S. H. McKnight, D. J. Wilkins, and V. M. Karbhari. Experimental characterization of permeability and fibre wetting for liquid moulding. *Journal of Materials Science*, 30:3207–3215, 1995. ISSN 0022-2461.

[45] Sanjay Sharma, Dennis A. Siginer, Ravi K. Dukipatti, and Kurt A. Soschinske. Effect of fiber sizing — test fluid interaction on the unsaturated and saturated flow in the vartm process. *Journal of Composite Materials*, 43(15):1589–1601, 2009. ISSN 0021-9983. doi: 10.1177/0021998308337898.

[46] Sanjay Sharma and Dennis A. Siginer. Permeability measurement methods in porous media of fiber reinforced composites. *Applied Mechanics Reviews*, 63(2), 2010. ISSN 0003-6900. doi: 10.1115/1.4001047.

[47] VDI. Richtlinie vdi 2221: Methodik zum entwickeln und konstruieren technischer systeme und produkte, 2019.

[48] Fritz Zwicky. *Entdecken, erfinden, forschen: Im morpholog. Weltbild*. Droemer Knaur, München, vollst. taschenbuchausg edition, 1971. ISBN 3-426-00264-7.

[49] Beate Bender and Kilian Gericke. *Pahl/Beitz Konstruktionslehre*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2021. ISBN 978-3-662-57302-0. doi: 10.1007/978-3-662-57303-7.

[50] Mahoor Mehdikhani, Larissa Gorbatikh, Ignaas Verpoest, and Stepan V. Lomov. Voids in fiber-reinforced polymer composites: A review on their formation, characteristics, and effects on mechanical performance. *Journal of Composite Materials*, 53(12):1579–1669, 2019. ISSN 0021-9983. doi: 10.1177/0021998318772152.

[51] DIN e.V. Din iso 2768-1 allgemeintoleranzen: Teil 1: Toleranzen für längen- und winkelmaße ohne einzelne toleranzeintragung, .

[52] DIN e.V. Din iso 2768-2 allgemeintoleranzen: Teil 2: Tolranzen für form und lage ohne einzelne toleranzeintragungen, .

[53] DIN e.V. Din iso 1302 angabe der oberflächenbeschaffenheit in der technischen produktdokumentation, .

[54] W. P. Cox and E. H. Merz. Correlation of dynamic and steady flow viscosities. *Journal of Polymer Science*, 28(118):619–622, 1958. ISSN 0022-3832. doi: 10.1002/pol.1958.1202811812.

[55] Thomas Mezger. *Das Rheologie Handbuch: Für Anwender von Rotations- und Oszillations-Rheometern*. FARBE UND LACK / BIBLIOTHEK. Vincentz Network, Hannover, 5., vollständig überarbeitete auflage edition, 2016. ISBN 978-3-74860-012-1. doi: 10.1515/9783748600121. URL `https://www.degruyter.com/isbn/9783748600121`.

[56] Jeffrey M. Lawrence, John Barr, Rajat Karmakar, and Suresh G. Advani. Characterization of preform permeability in the presence of race tracking. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 35(12):1393–1405, 2004. ISSN 1359835X. doi: 10.1016/j.compositesa.2004.05.002.

# A Zeitplan

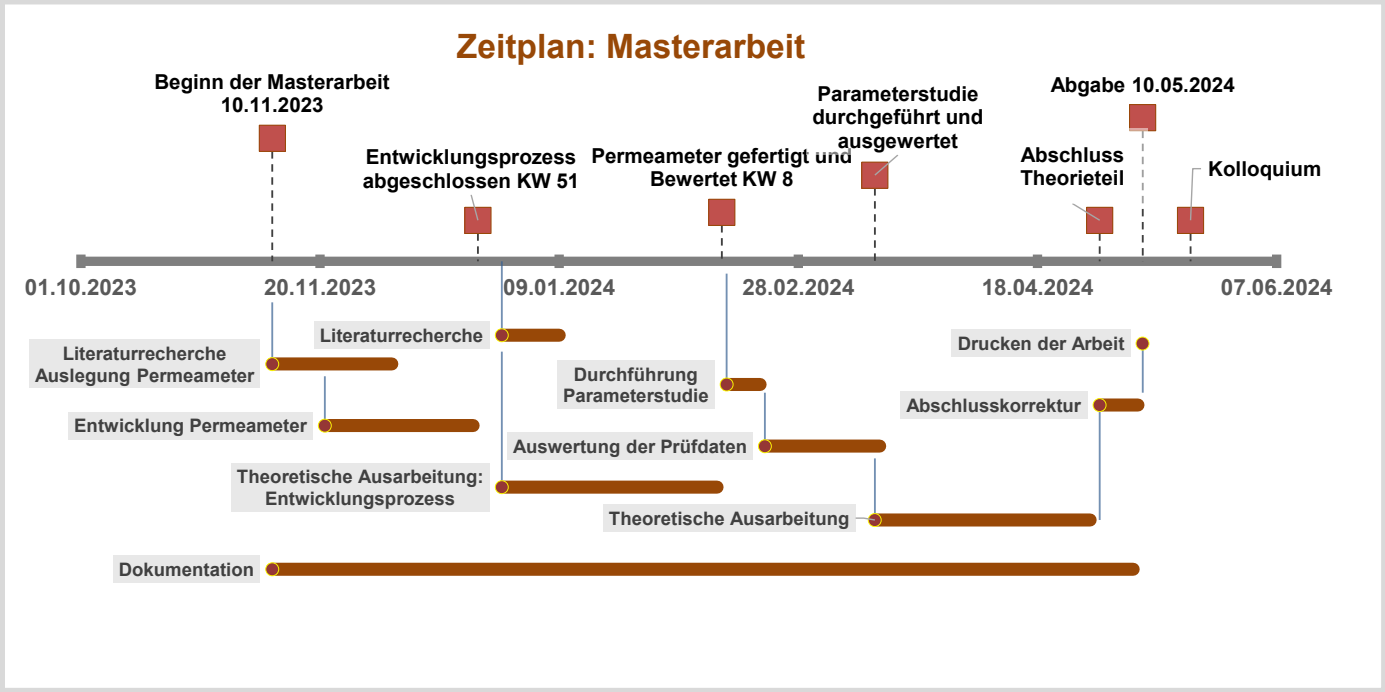
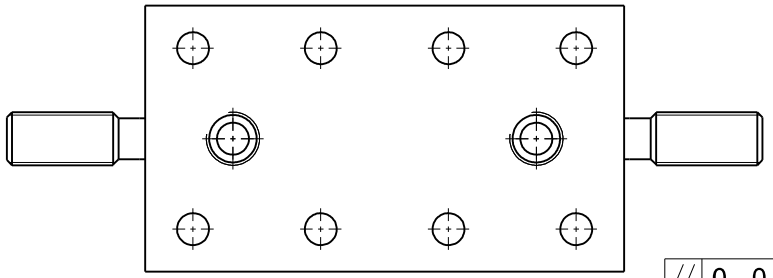


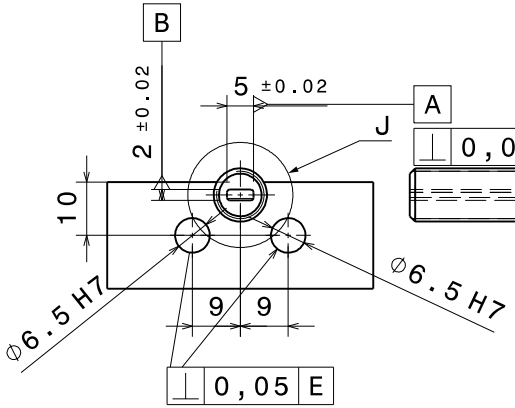

**Abbildung A.1:** Zeitplan: Masterarbeit (10.11.2023-10.05.2024)

# B Technische Zeichnungen

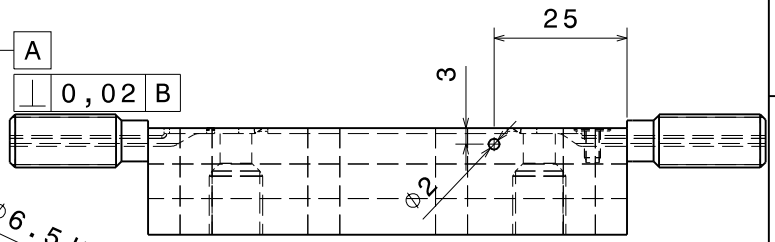


Untersicht
Maßstab: 1:1

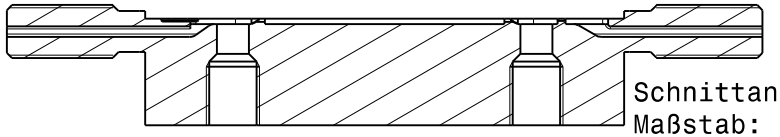
Vorderansicht
Maßstab: 1:1



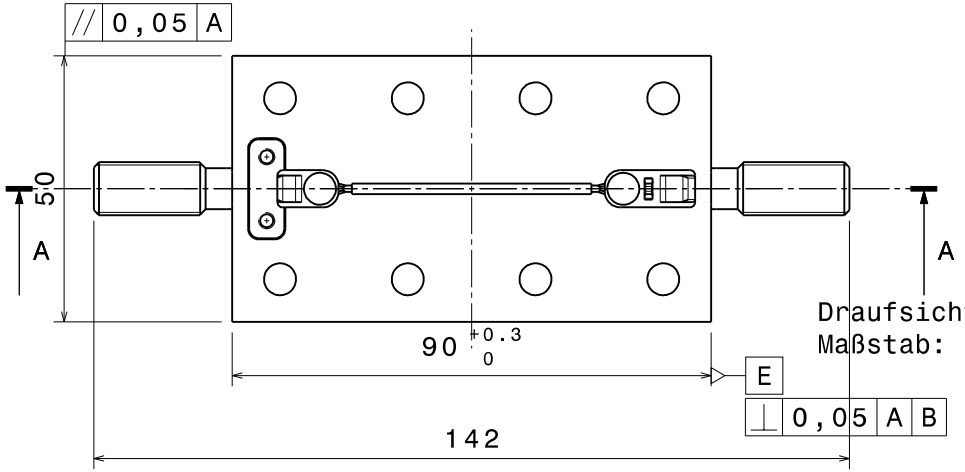

Seitenansicht links
Maßstab: 1:1



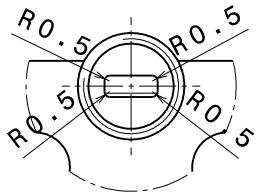

Rückansicht
Maßstab: 1:1



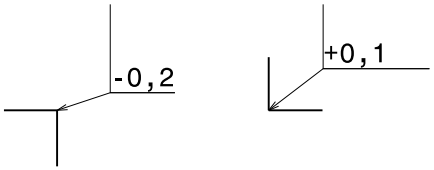
Schnittansicht A-A
Maßstab: 1:1




Draufsicht
Maßstab: 1:1



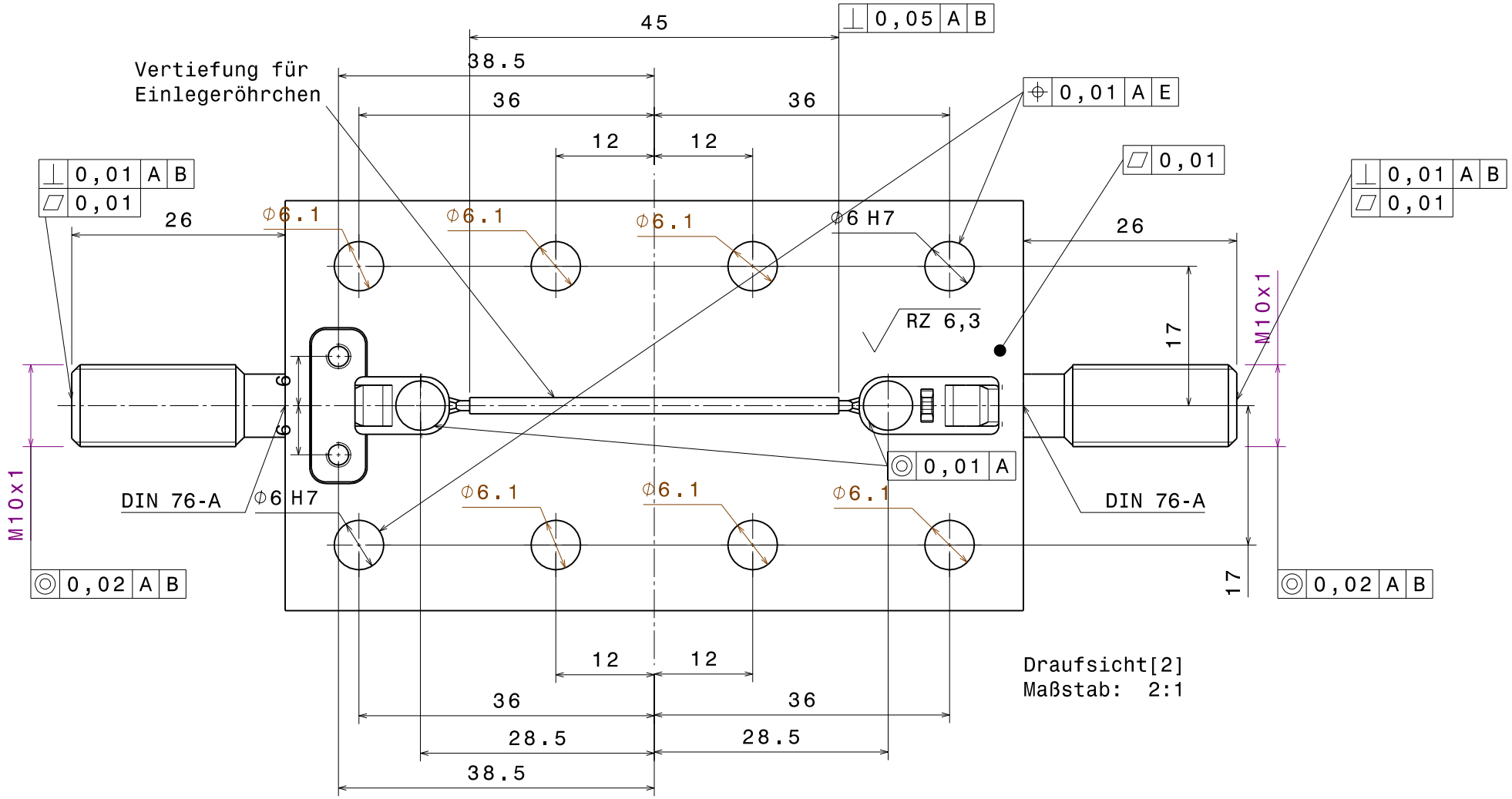

Detail J
Maßstab: 2:1




| | | |
|---|---|---|
| Zul. Abw.: ISO 2768 -mK | Oberfläche: ISO 1302 | Material: verzugsarmer, verschleißfester Stahl, warmbeständig 500°C |
| DESIGNED BY: Rebe_Ja<br>DATE: 19-12-2023 | Permeameter | |
| CHECKED BY: XXX<br>DATE: XXX | | |
| SIZE A3 | DLR FA | |
| SCALE 1:1 / WEIGHT (kg) 0.6 Kg | DRAWING NUMBER | SHEET 1/4 |

| | |
|---|---|
| I | _ |
| H | _ |
| G | _ |
| F | _ |
| E | _ |
| D | _ |
| C | _ |
| B | _ |
| A | _ |

This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.



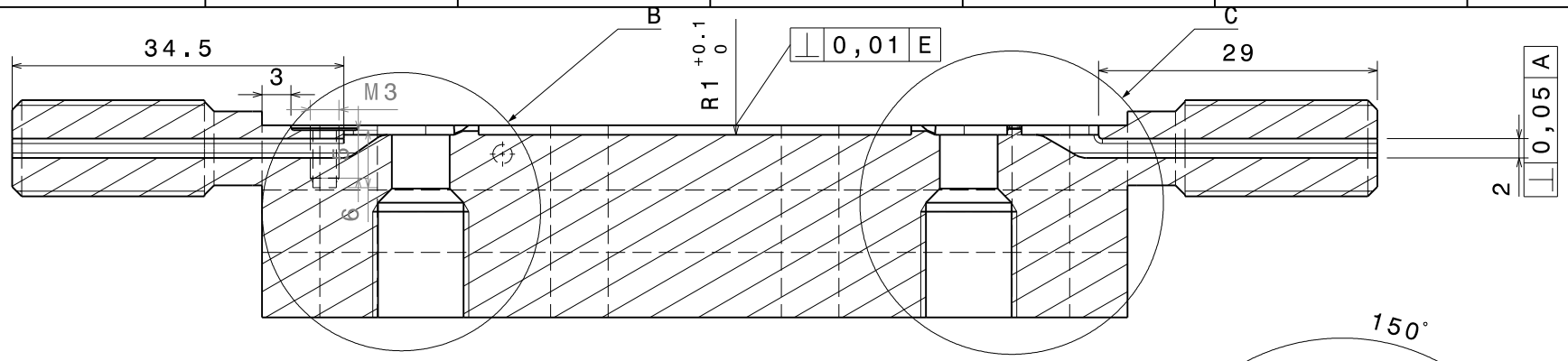

Draufsicht[2]
Maßstab: 2:1

Die Abdichtung muss vollständig über die Dichtflächen erfolgen und nicht über das eingelegte Röhrchen.

| | | |
|---|---|---|
| Zul. Abw.: ISO 2768 -mK | Oberfläche: ISO 1302 | Material: verzugsarmer, verschleißfester Stahl, warmbeständig 500°C |
| DESIGNED BY: rebe_ja<br>DATE: 19-12-2023 | Permeameter | |
| CHECKED BY: XXX<br>DATE: XXX | | |
| SIZE A3 | DLR FA | |
| SCALE 1:1 / WEIGHT (kg) 0.6 Kg | DRAWING NUMBER | SHEET 2/4 |

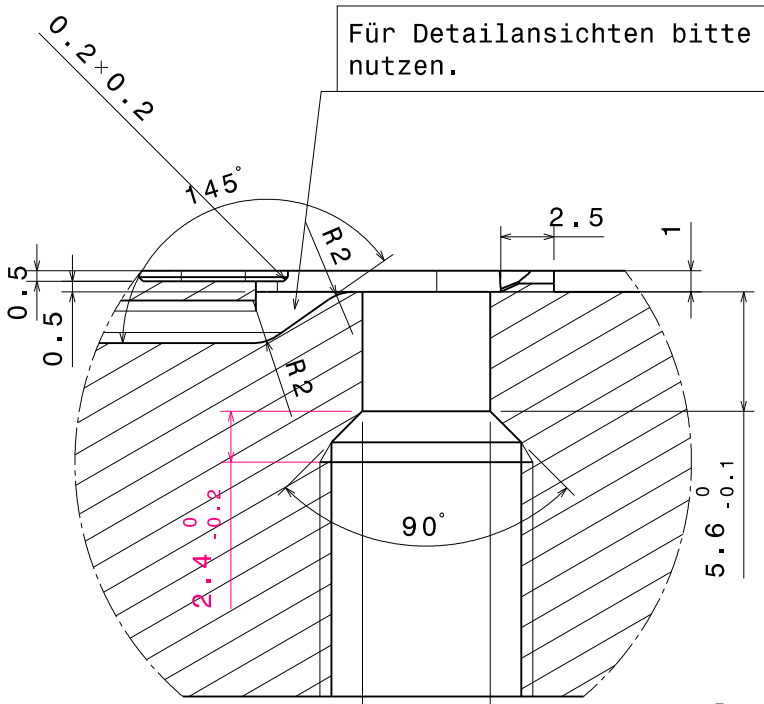
| | |
|---|---|
| I | _ |
| H | _ |
| G | _ |
| F | _ |
| E | _ |
| D | _ |
| C | _ |
| B | _ |
| A | _ |

This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.

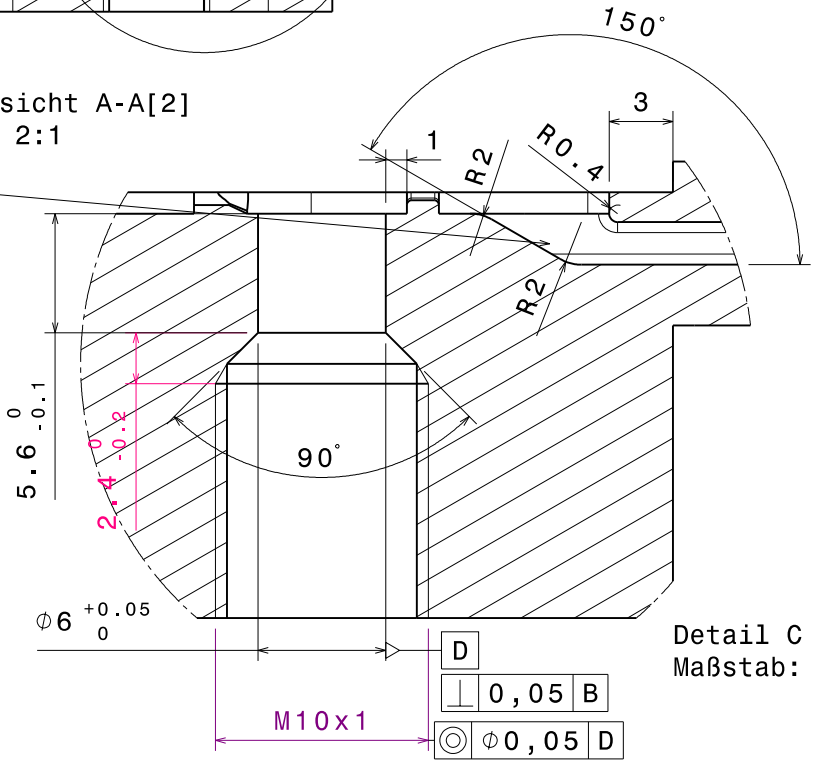



Für Detailansichten bitte .step nutzen.

Schnittansicht A-A[2]
Maßstab: 2:1



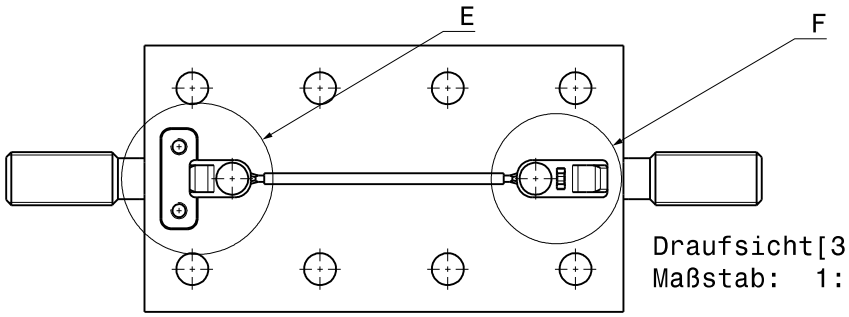

Detail B
Maßstab: 4:1



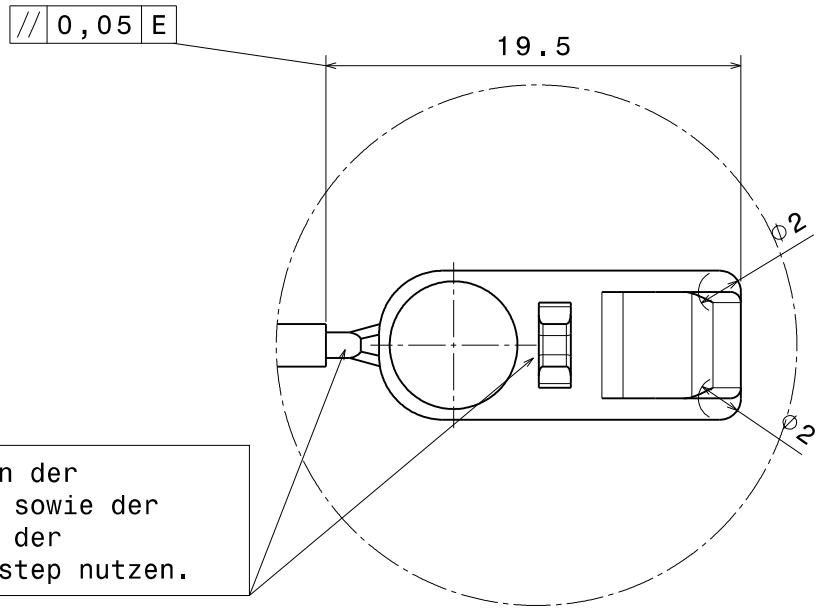

Detail C
Maßstab: 4:1

| | | | |
|---|---|---|---|
| Zul. Abw.: ISO 2768 -mK | Oberfläche: ISO 1302 | Material: verzugsarmer, verschleißfester Stahl, warmbeständig 500°C | |
| DESIGNED BY: rebe_ja<br>DATE: 19-12-2023 | Permeameter | | I _ |
| CHECKED BY: XXX<br>DATE: XXX | | | H _ |
| | | | G _ |
| | | | F _ |
| | | | E _ |
| SIZE A3 | DLR FA | | D _ |
| | | | C _ |
| SCALE 1:1 / WEIGHT (kg) 0.6 Kg | DRAWING NUMBER | SHEET 3/4 | B _ |
| | | | A _ |

This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.

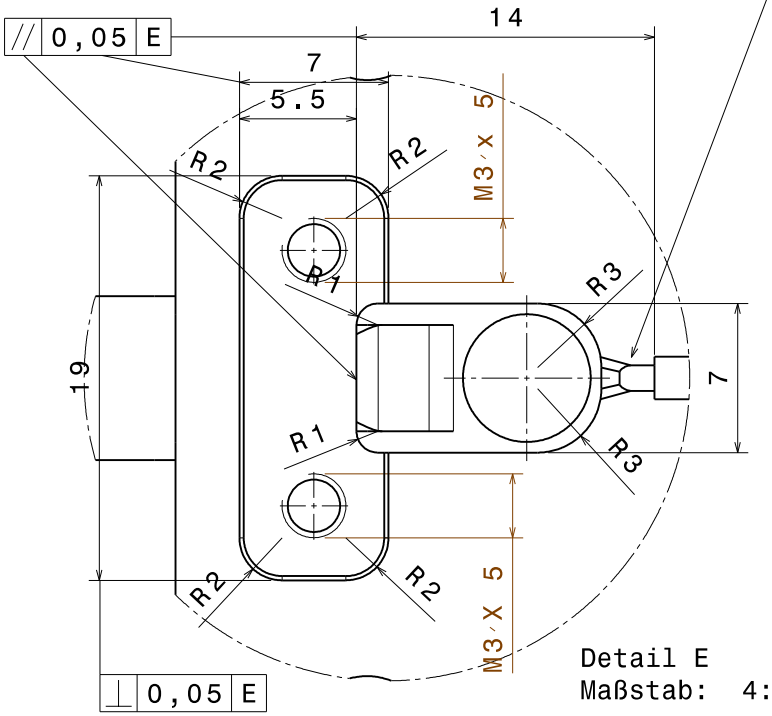



Draufsicht[3]
Maßstab: 1:1




Detail F
Maßstab: 4:1

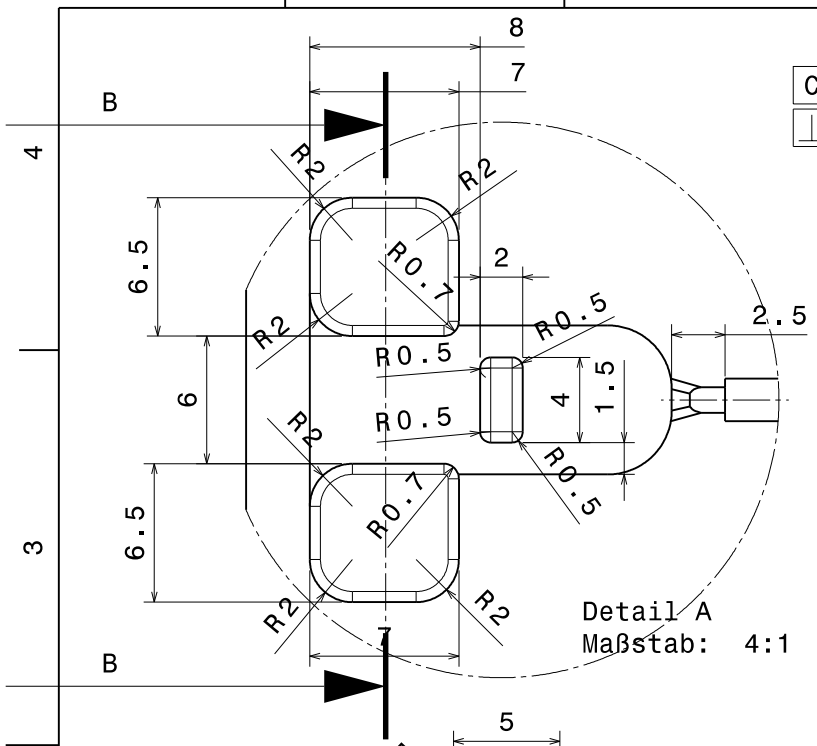
Für Detailansichten der Übergänge zum Rohr sowie der genauen Gestaltung der Erhebungen bitte .step nutzen.

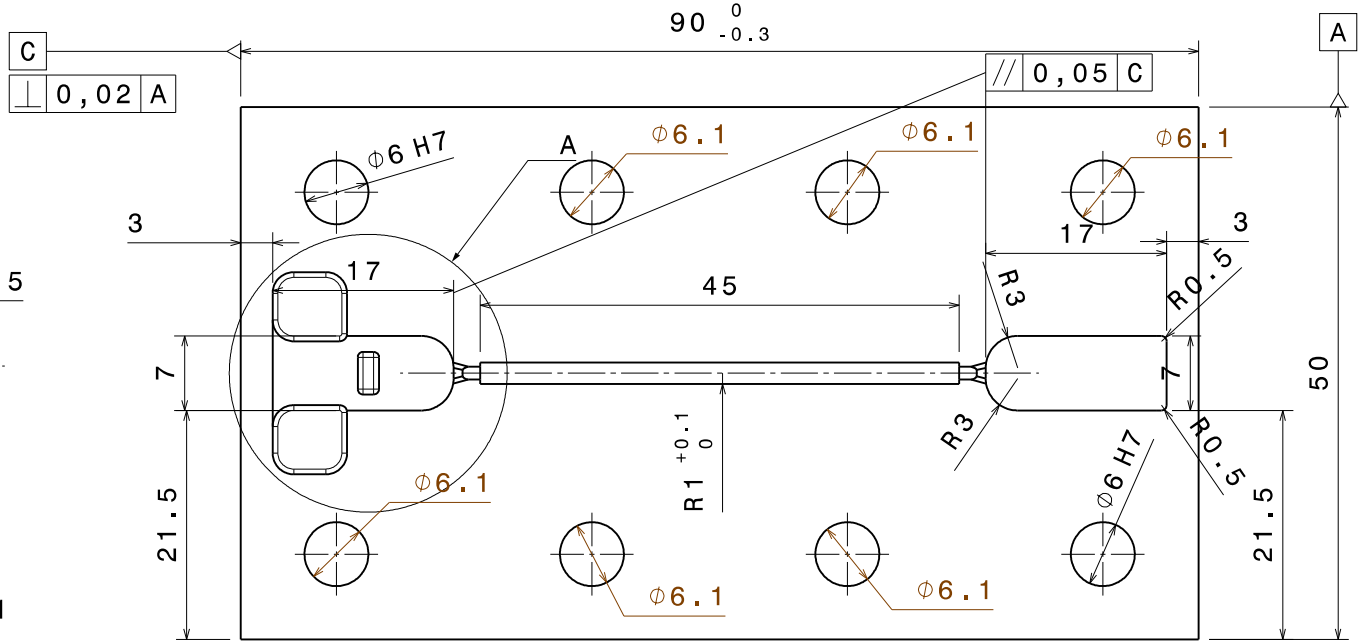


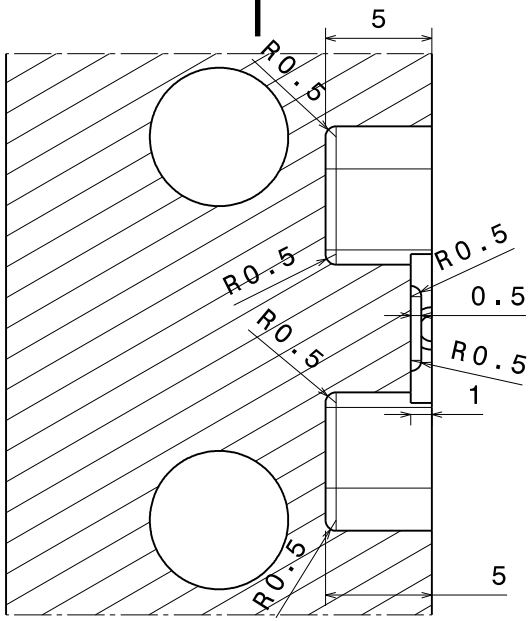

Detail E
Maßstab: 4:1

| | | | |
|---|---|---|---|
| Zul. Abw.: ISO 2768 -mK | Oberfläche: ISO 1302 | Material: verzugsarmer, verschleißfester Stahl, warmbeständig 500°C | |
| DESIGNED BY: rebe_ja<br>DATE: 19-12-2023 | Permeater | | I – |
| CHECKED BY: XXX<br>DATE: XXX | | | H – |
| | | | G – |
| | | | F – |
| | | | E – |
| SIZE A3 | DLR FA | | D – |
| | | | C – |
| SCALE 1:1 / WEIGHT (kg) 0.6 Kg | DRAWING NUMBER | SHEET 4/4 | B – |
| | | | A – |

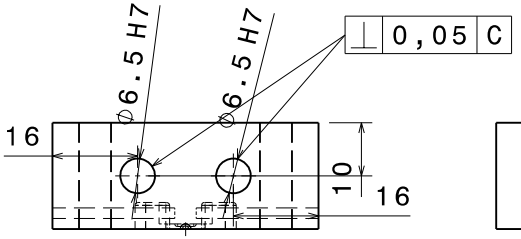
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.



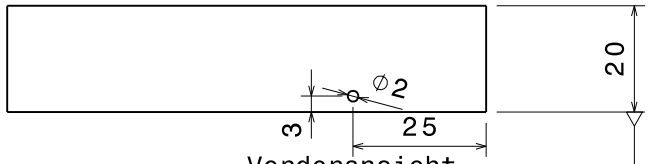




Schnittansicht B-B
Maßstab: 4:1




Seitenansicht rechts
Maßstab: 1:1




Vorderansicht
Maßstab: 1:1

Untersicht
Maßstab: 2:1

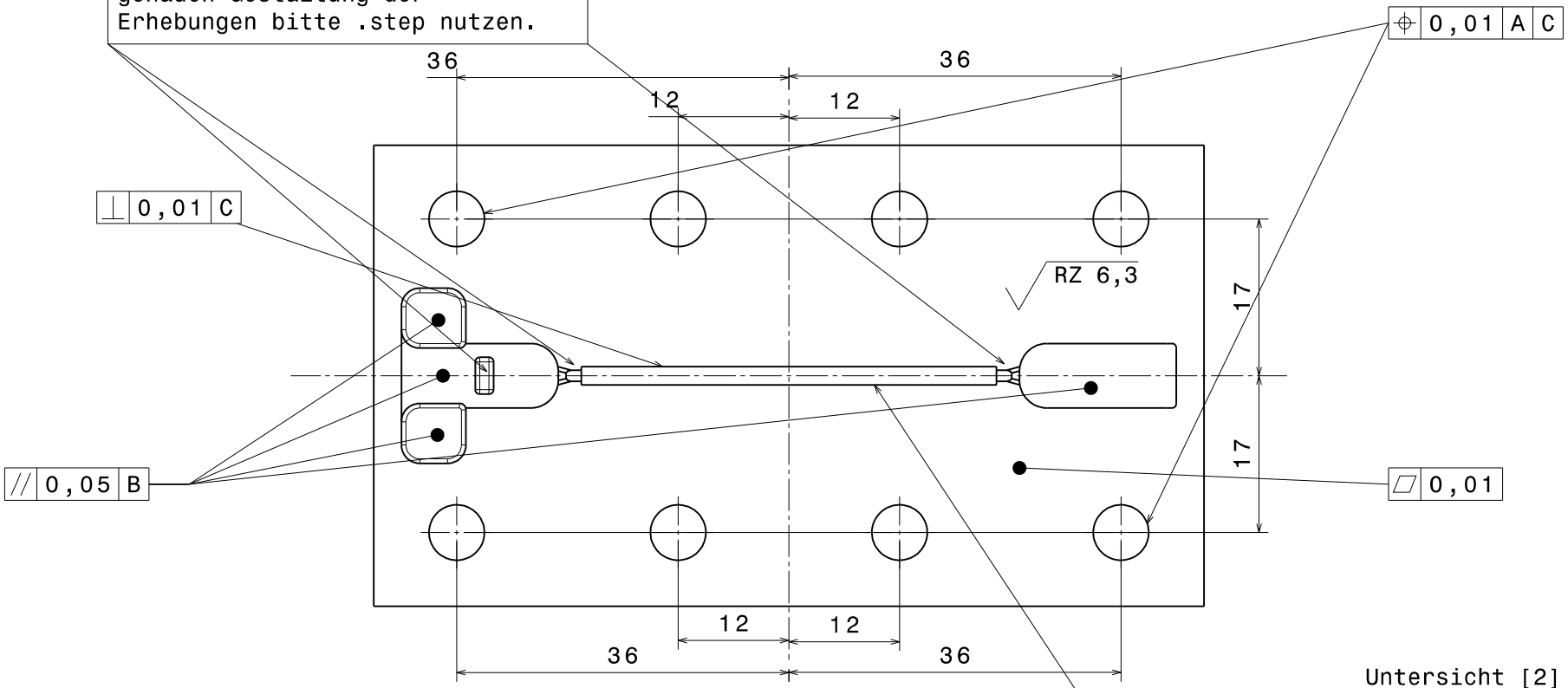
B
0,02 A

+0,1
-0,2

| | | |
|---|---|---|
| Zul. Abw.: ISO 2768 -mK | Oberfläche: ISO 1302 | Material: verzugsarmer, verschleißfester Stahl, warmbeständig 500°C |
| DESIGNED BY: rebe_ja<br>DATE: 19-12-2023 | Permeameter_Deckel_V01 | |
| CHECKED BY: XXX<br>DATE: XXX | | |
| SIZE A3 | DLR FA | |
| SCALE 1:1 / WEIGHT (kg) 0.6 Kg | DRAWING NUMBER | SHEET 1/1 |

This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.

Für Detailansichten der Übergänge zum Rohr sowie der genauen Gestaltung der Erhebungen bitte .step nutzen.



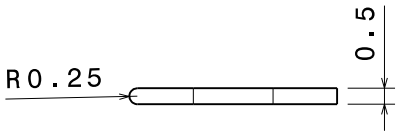

Untersicht [2]
Maßstab: 2:1

Die Abdichtung muss komplett über die Dichtflächen erfolgen und nicht über das Röhrchen.

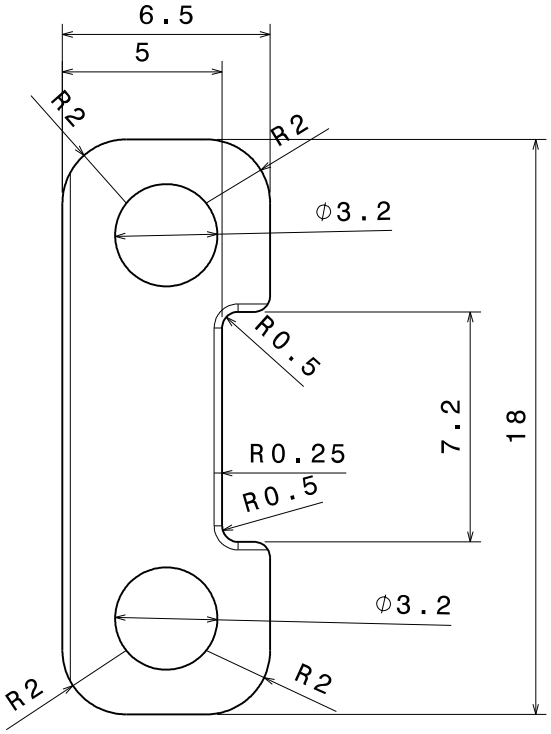
Vertiefung für Einlegeröhrchen

| | | | |
|---|---|---|---|
| Zul. Abw.: ISO 2768 -mK | Oberfläche: ISO 1302 | Material: verzugsarmer, verschleißfester Stahl, warmbeständig 500°C | |
| DESIGNED BY: rebe_ja<br>DATE: 19-12-2023 | Permeameter_Deckel_V01 | | |
| CHECKED BY: XXX<br>DATE: XXX | | | |
| SIZE A3 | DLR FA | | |
| SCALE 1:1 / WEIGHT (kg) 0.6 Kg | DRAWING NUMBER | SHEET 1/1 | |

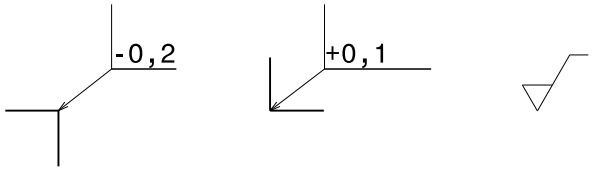
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.




Untersicht
Maßstab: 6:1

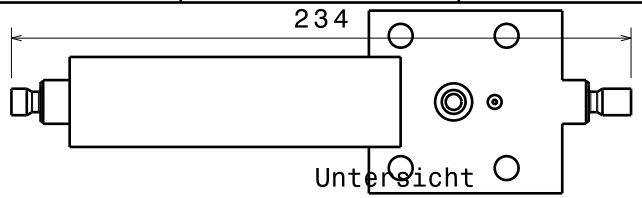



Vorderansicht
Maßstab: 6:1

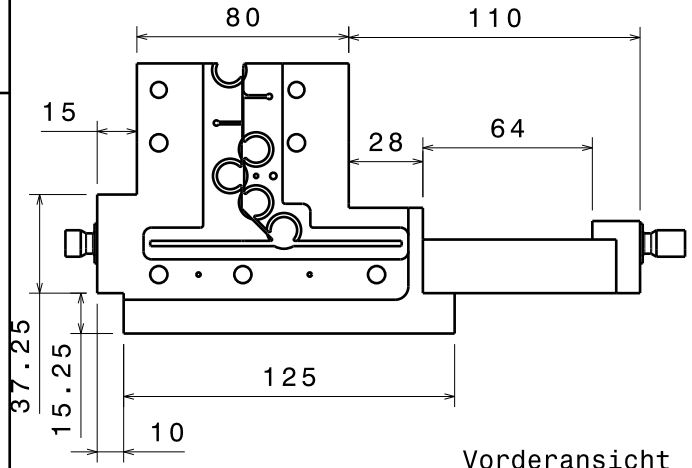



| | | | |
|---|---|---|---|
| Zul. Abw.: ISO 2768 -mK | Oberfläche: ISO 1302 | Material: verzugsarmer, verschleißfester Stahl, warmbeständig 500°C | |
| DESIGNED BY: rebe_ja<br>DATE: 19-12-2023 | Permeameter_Klemmplatte_V01 | | I _ |
| CHECKED BY: XXX<br>DATE: XXX | | | H _ |
| | | | G _ |
| | | | F _ |
| | | | E _ |
| SIZE A3 | DLR FA | | D _ |
| | | | C _ |
| SCALE 1:1 / WEIGHT (kg) 0.6 Kg | DRAWING NUMBER | SHEET 1/1 | B _ |
| | | | A _ |

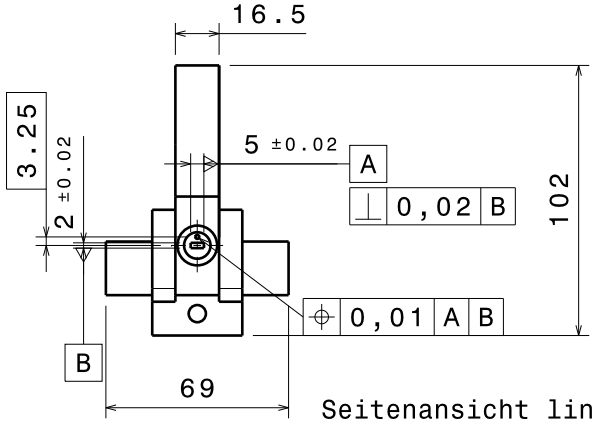
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.



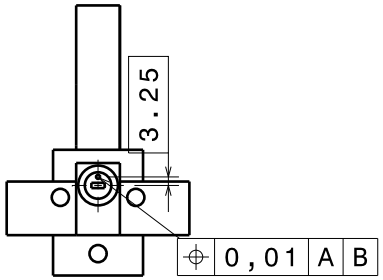

Untersicht
Maßstab: 1:2



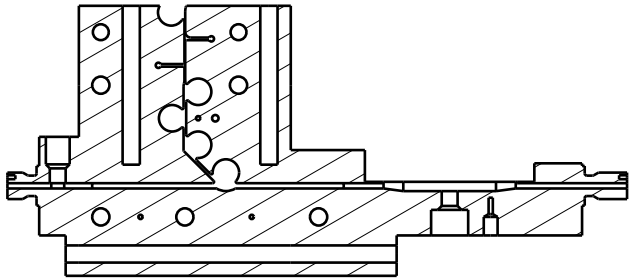

Vorderansicht
Maßstab: 1:2



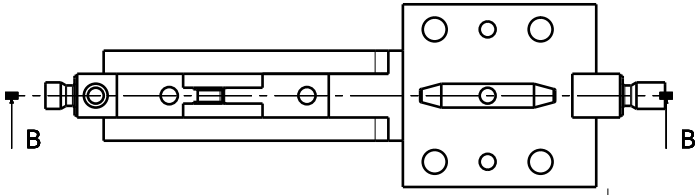

Seitenansicht links
Maßstab: 1:2




Hilfsansicht A
Maßstab: 1:2



Schnittansicht B-B
Maßstab: 1:2



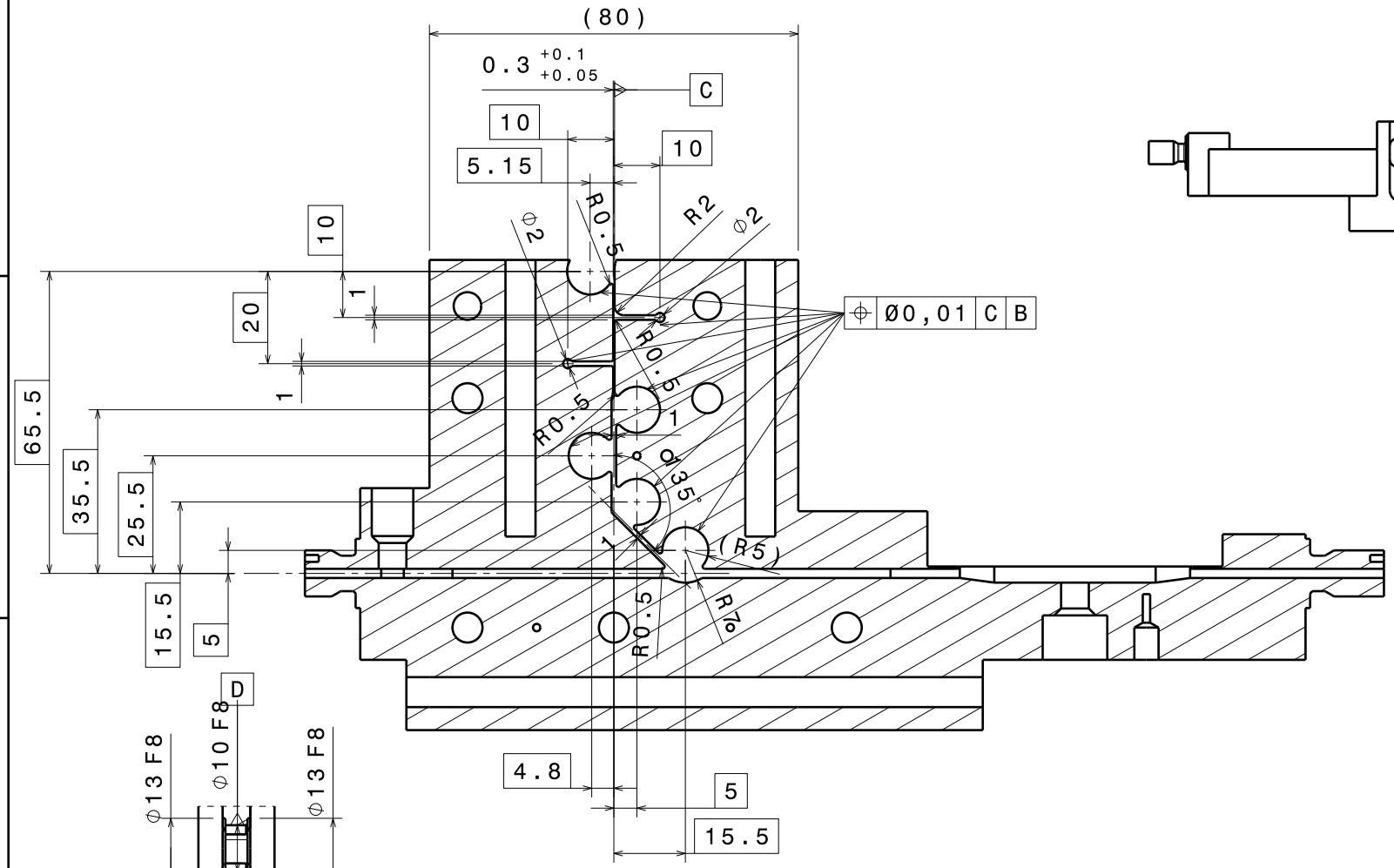

Draufsicht
Maßstab: 1:2

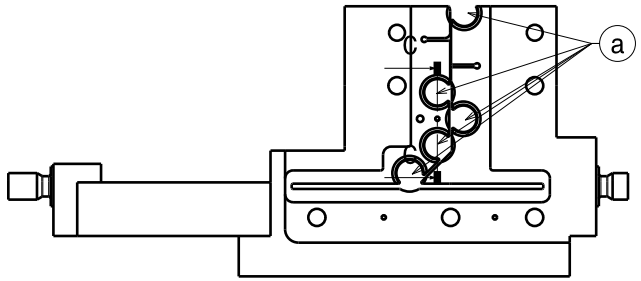
-0,2

+0,1

| | | | |
|---|---|---|---|
| Zul. Abw.: ISO 2768 -mK | Oberfläche: ISO 1302 | Material: verzugsarmer, verschleißfester Stahl, warmbeständig 500°C | |
| DESIGNED BY: titz_ma<br>DATE: 28.02.2021 | 103 - Fiber Insertion Body | | |
| CHECKED BY: XXX<br>DATE: XXX | | | |
| SIZE A3 | DLR FA | | |
| SCALE 1:10 | WEIGHT (kg) 0,01 | DRAWING NUMBER | SHEET 1/1 |

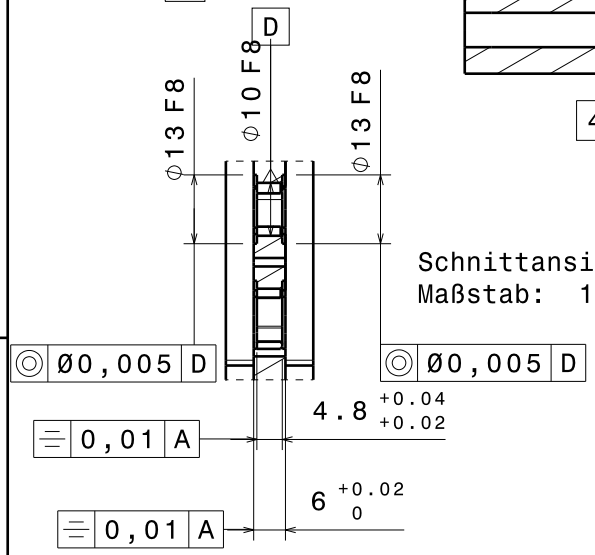
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.




Rückansicht[2]
Maßstab: 1:2

Schnittansicht B-B[2]
Maßstab: 1:1




Schnittansicht C-C
Maßstab: 1:1

Bemaßungsschema gilt für alle 5 Bohrungen: a

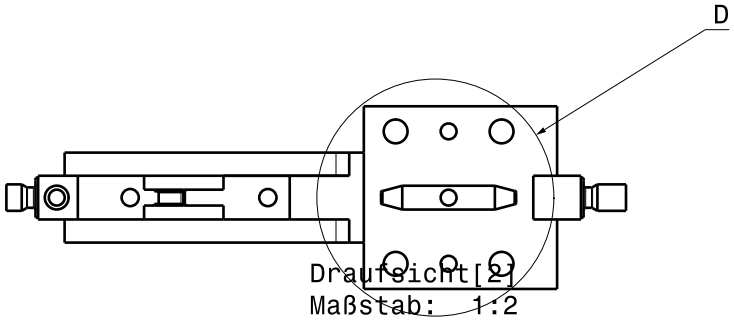
-0,2

+0,1

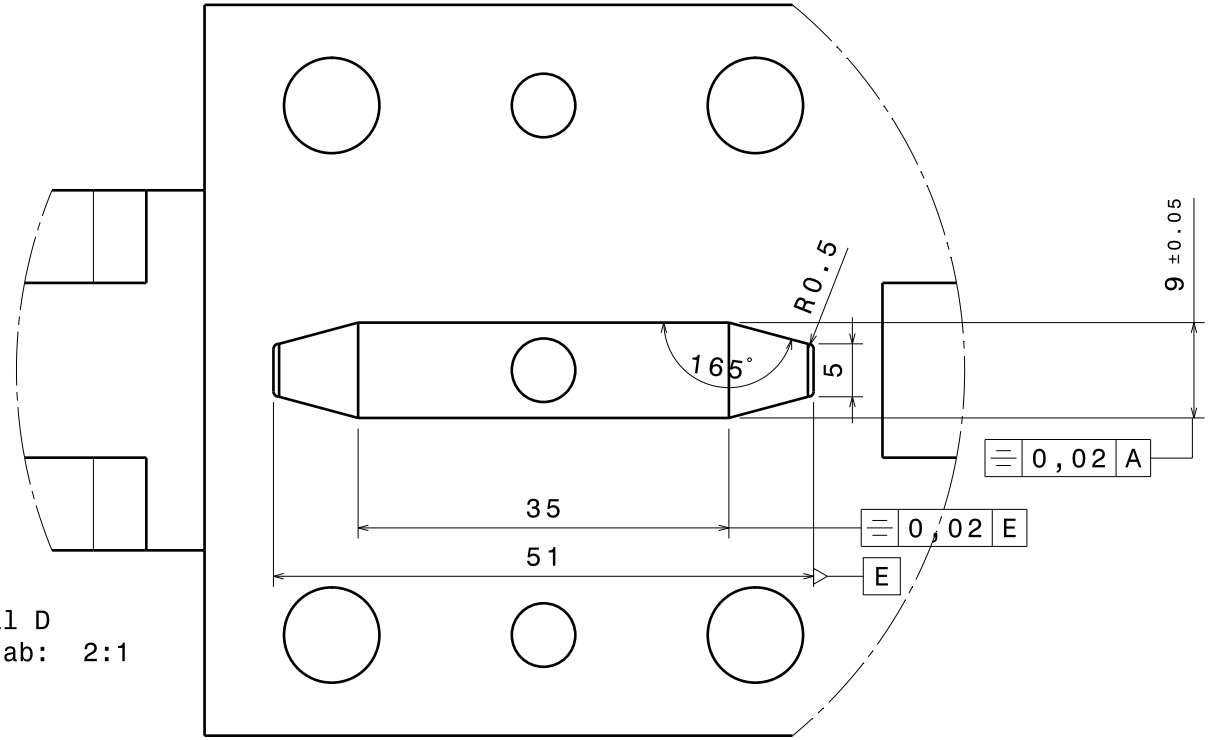
| | | | |
|---|---|---|---|
| Zul. Abw.: ISO 2768 -mK | Oberfläche: ISO 1302 | Material: verzugsarmer, verschleißfester Stahl, warmbeständig 500°C | |
| DESIGNED BY: titz_ma<br>DATE: 28.02.2021 | 103 - Fiber Insertion Body | | |
| CHECKED BY: XXX<br>DATE: XXX | | | |
| SIZE A3 | DLR FA | | |
| SCALE 1:10 | WEIGHT (kg) 0,01 | DRAWING NUMBER | SHEET 1/1 |

This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.

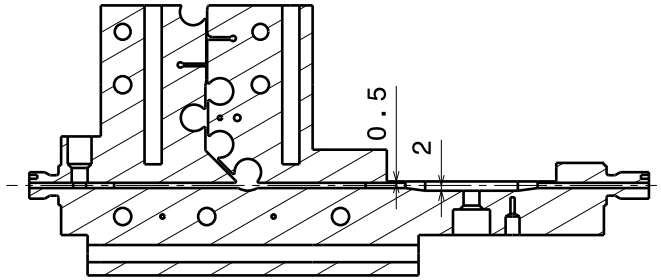
| | |
|---|---|
| I | _ |
| H | _ |
| G | _ |
| F | _ |
| E | _ |
| D | _ |
| C | _ |
| B | _ |
| A | _ |



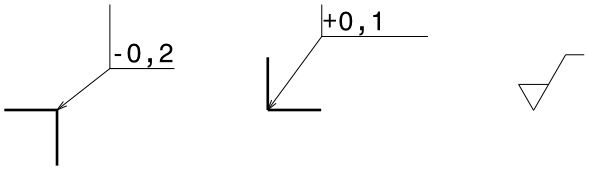

Draufsicht[2]
Maßstab: 1:2




Detail D
Maßstab: 2:1



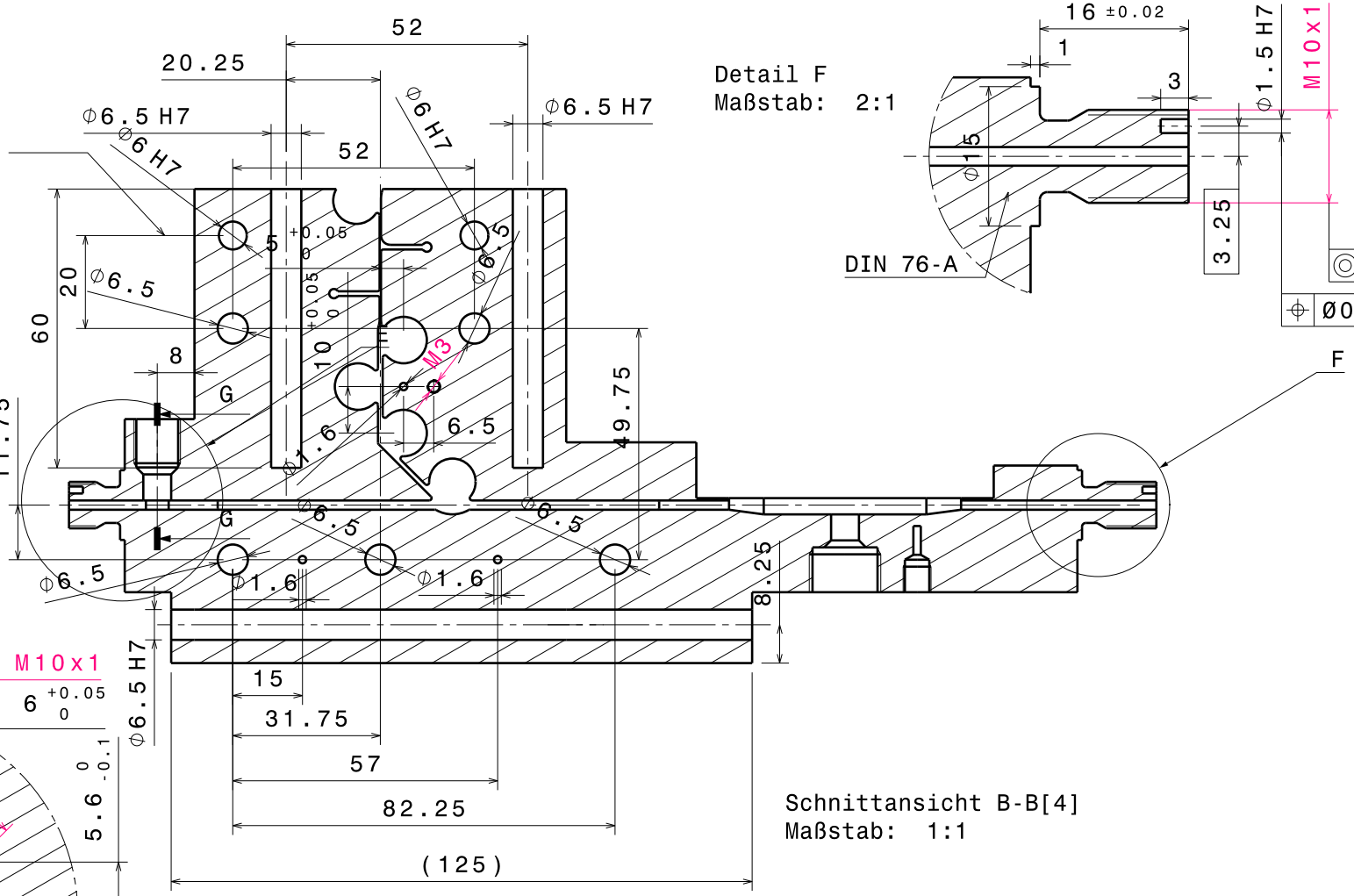

Schnittansicht B-B[3]
Maßstab: 1:2



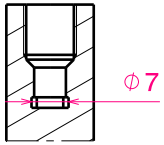

| | | | |
|---|---|---|---|
| Zul. Abw.: ISO 2768 -mK | Oberfläche: ISO 1302 | Material: verzugsarmer, verschleißfester Stahl, warmbeständig 500°C | |
| DESIGNED BY: titz_ma<br>DATE: 28.02.2021 | 103 - Fiber Insertion Body | | I _ |
| CHECKED BY: XXX<br>DATE: XXX | | | H _ |
| SIZE A3 | DLR FA | | G _ |
| SCALE 1:10 | WEIGHT (kg) 0,01 | DRAWING NUMBER | SHEET 1/1 |

This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.

Bohrungen sollten im montierten Zustand eingebracht werden.




Schnittansicht B-B[4]
Maßstab: 1:1




Schnittansicht G-G
Maßstab: 1:1

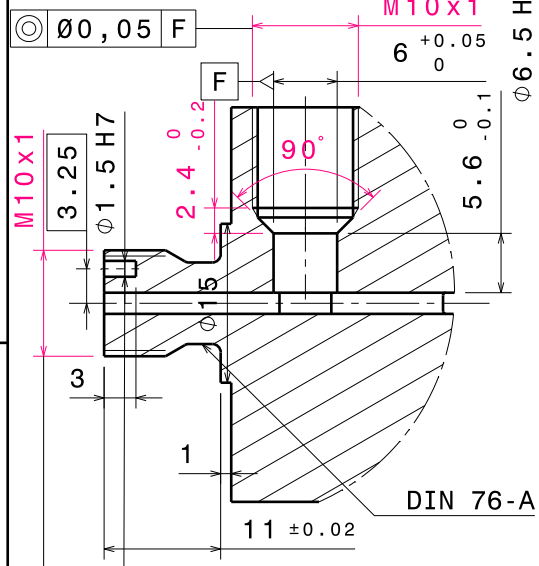
Detail F
Maßstab: 2:1




◎ Ø0,02 A B

⌖ Ø0,01 A B

◎ Ø0,05 F




⌖ Ø0,01 A B

◎ Ø0,02 A B

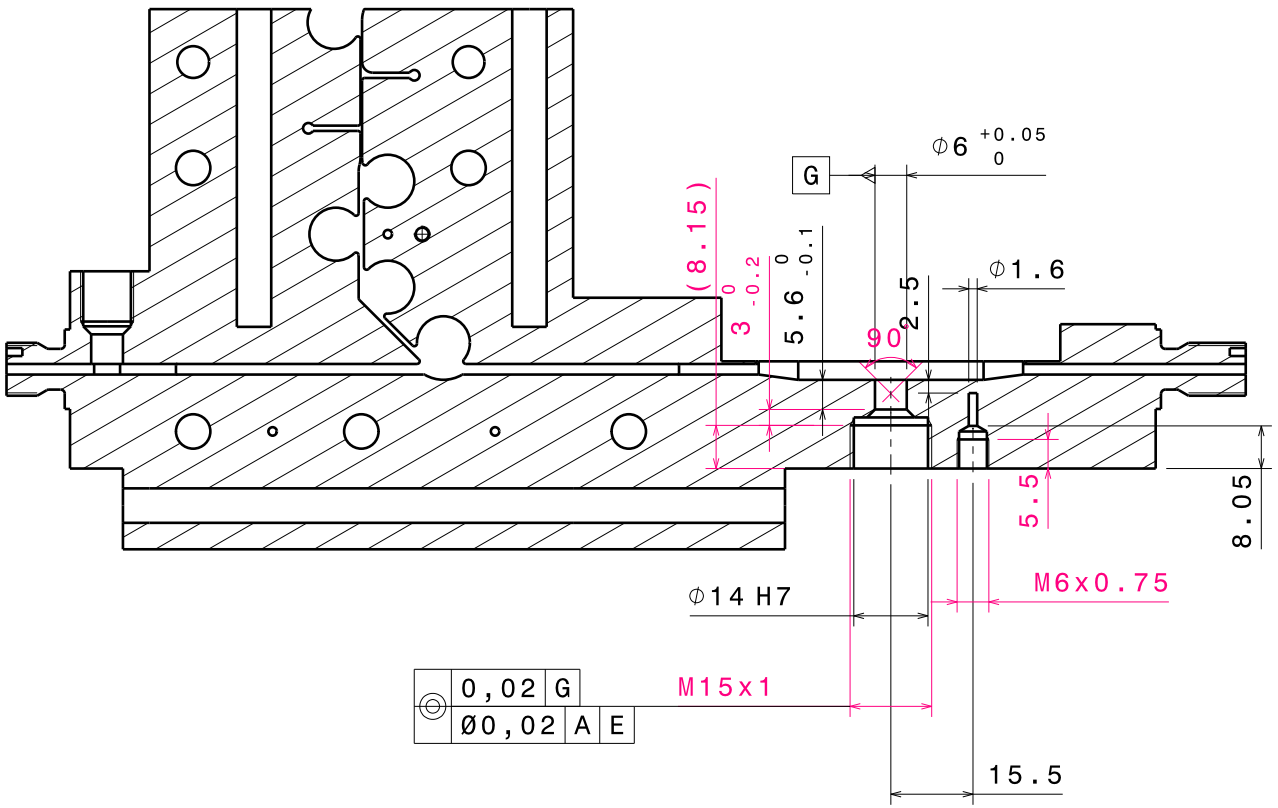
Detail E
Maßstab: 2:1

-0,2

+0,1

| | | | |
|---|---|---|---|
| Zul. Abw.: ISO 2768 -mK | Oberfläche: ISO 1302 | Material: verzugsarmer, verschleißfester Stahl, warmbeständig 500°C | |
| DESIGNED BY: titz_ma<br>DATE: 28.02.2021 | 103 - Fiber Insertion Body | | I _ |
| CHECKED BY: XXX<br>DATE: XXX | | | H _ |
| | | | G _ |
| | | | F _ |
| | | | E _ |
| SIZE A3 | DLR FA | | D _ |
| | | | C _ |
| SCALE 1:10 / WEIGHT (kg) 0,01 | DRAWING NUMBER | SHEET 1/1 | B _ |
| | | | A _ |

This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.




Schnittansicht B-B[4]
Maßstab: 1:1

-0,2

+0,1

| | | | |
|---|---|---|---|
| Zul. Abw.: ISO 2768 -mK | Oberfläche: ISO 1302 | Material: verzugsarmer, verschleißfester Stahl, warmbeständig 500°C | |
| DESIGNED BY: titz_ma<br>DATE: 28.02.2021 | 103 - Fiber Insertion Body | | |
| CHECKED BY: XXX<br>DATE: XXX | | | |
| SIZE A3 | DLR FA | | |
| SCALE 1:10 | WEIGHT (kg) 0,01 | DRAWING NUMBER | SHEET 1/1 |

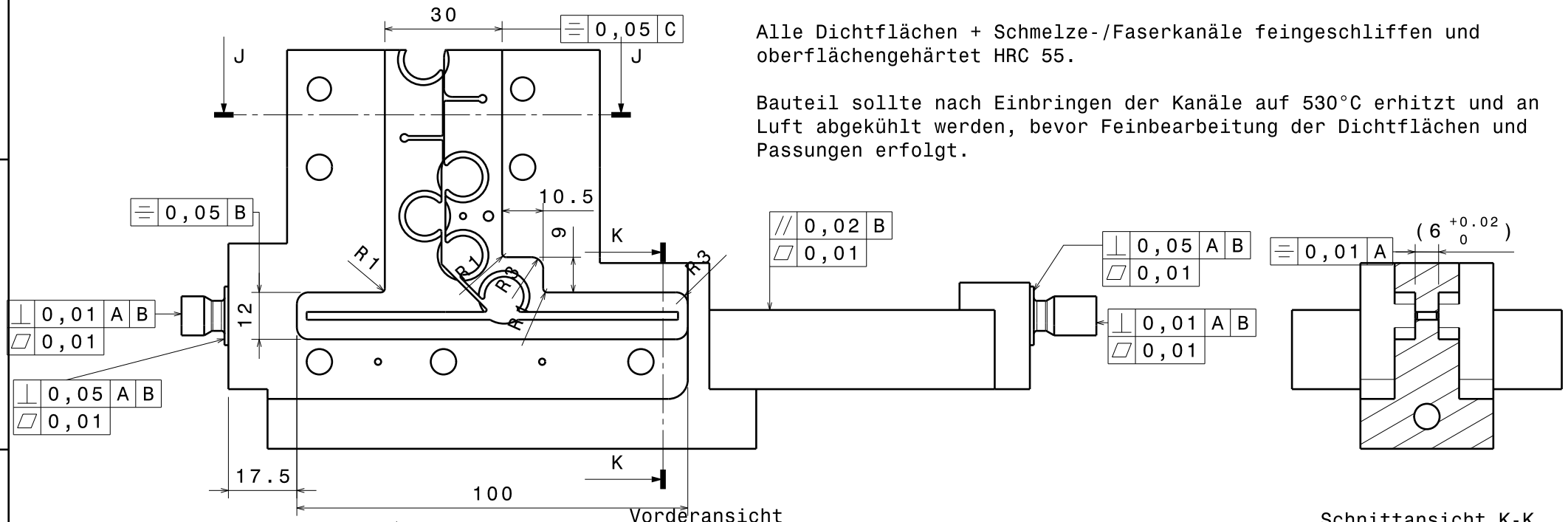
| | |
|---|---|
| I | _ |
| H | _ |
| G | _ |
| F | _ |
| E | _ |
| D | _ |
| C | _ |
| B | _ |
| A | _ |

This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.

Für die Dichtflächen sowie die Kanäle für Schmelze & Faser gelten erhöhte Anforderungen an die Oberflächenrauigkeit sowie die Ebenheit.

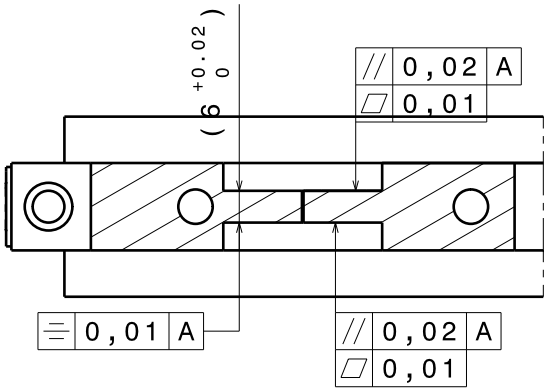
Alle Dichtflächen + Schmelze-/Faserkanäle feingeschliffen und oberflächengehärtet HRC 55.

Bauteil sollte nach Einbringen der Kanäle auf 530°C erhitzt und an Luft abgekühlt werden, bevor Feinbearbeitung der Dichtflächen und Passungen erfolgt.

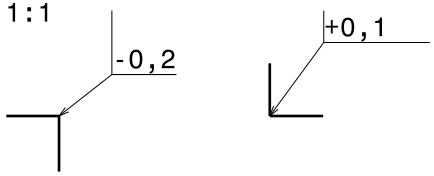



Vorderansicht
Maßstab: 1:1

Schnittansicht K-K
Maßstab: 1:1

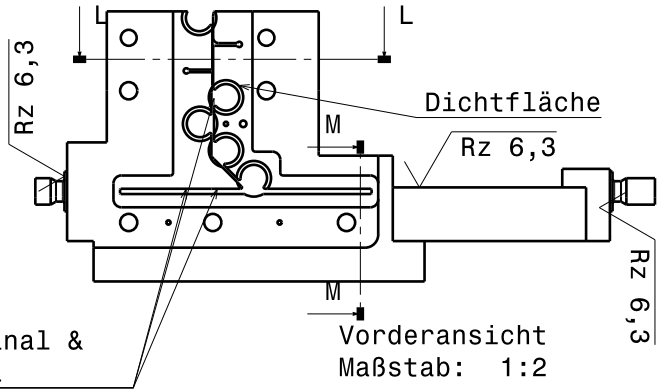



Schnittansicht J-J
Maßstab: 1:1

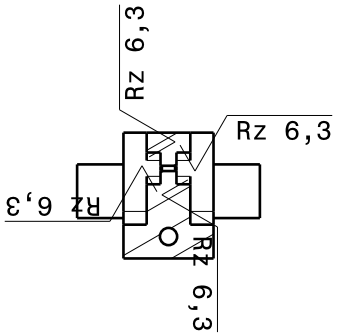


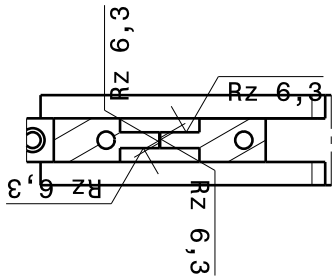

| | | | |
|---|---|---|---|
| Zul. Abw.: ISO 2768 -mK | Oberfläche: ISO 1302 | Material: verzugsarmer, verschleißfester Stahl, warmbeständig 500°C | |
| DESIGNED BY: titz_ma<br>DATE: 28.02.2021 | 103 - Fiber Insertion Body | | I _ |
| CHECKED BY: XXX<br>DATE: XXX | | | H _ |
| | | | G _ |
| | | | F _ |
| | | | E _ |
| SIZE A3 | DLR FA | | D _ |
| | | | C _ |
| SCALE 1:10 / WEIGHT (kg) 0,01 | DRAWING NUMBER | SHEET 1/1 | B _ |
| | | | A _ |

This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.




Vorderansicht
Maßstab: 1:2

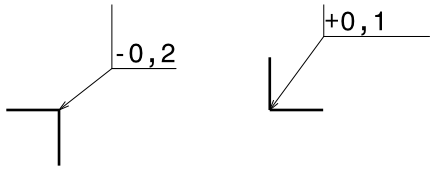



Schnittansicht L-L
Maßstab: 1:2

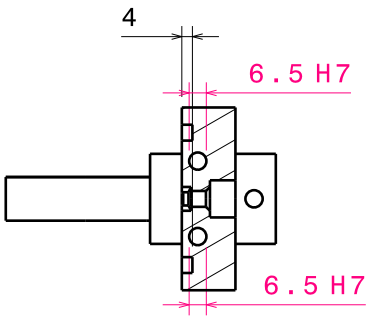
Für die Dichtflächen sowie die Kanäle für Schmelze & Faser gelten erhöhte Anforderungen an die Oberflächenrauigkeit sowie die Ebenheit.

Alle Dichtflächen + Schmelze-/Faserkanäle feingeschliffen und oberflächengehärtet HRC 55.

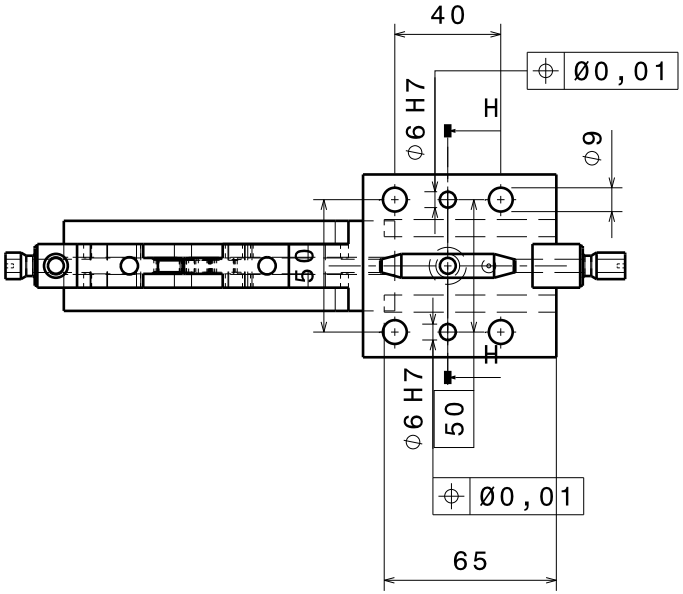



| | | | |
|---|---|---|---|
| Zul. Abw.: ISO 2768 -mK | Oberfläche: ISO 1302 | Material: verzugsarmer, verschleißfester Stahl, warmbeständig 500°C | |
| DESIGNED BY: titz_ma<br>DATE: 28.02.2021 | 103 - Fiber Insertion Body | | I – |
| CHECKED BY: XXX<br>DATE: XXX | | | H – G – F – |
| SIZE A3 | DLR FA | | E – D – |
| SCALE 1:10 | WEIGHT (kg) 0,01 | DRAWING NUMBER | SHEET 1/1 C – B – A – |

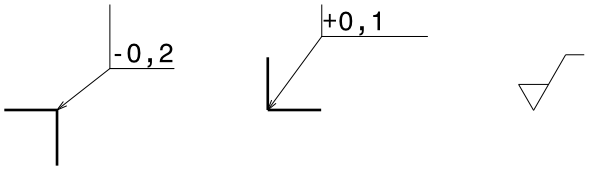
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.




Schnittansicht H-H
Maßstab: 1:2

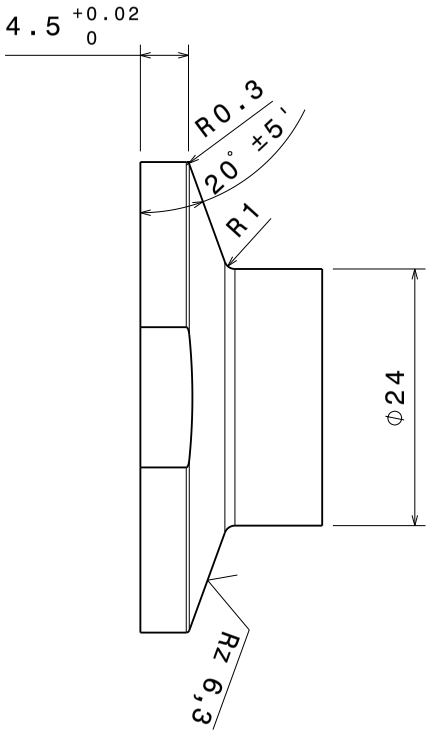



Vorderansicht
Maßstab: 1:2

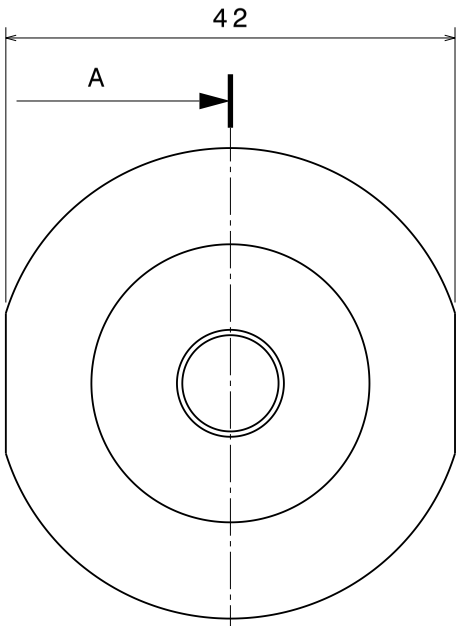



| | | | |
|---|---|---|---|
| Zul. Abw.: ISO 2768 -mK | Oberfläche: ISO 1302 | Material: verzugsarmer, verschleißfester Stahl, warmbeständig 500°C | |
| DESIGNED BY: titz_ma<br>DATE: 28.02.2021 | 103 - Fiber Insertion Body | | I _ |
| CHECKED BY: XXX<br>DATE: XXX | | | H _ |
| | | | G _ |
| | | | F _ |
| SIZE A3 | DLR FA | | E _ |
| | | | D _ |
| | | | C _ |
| SCALE 1:10 / WEIGHT (kg) 0,01 | DRAWING NUMBER | SHEET 1/1 | B _ |
| | | | A _ |

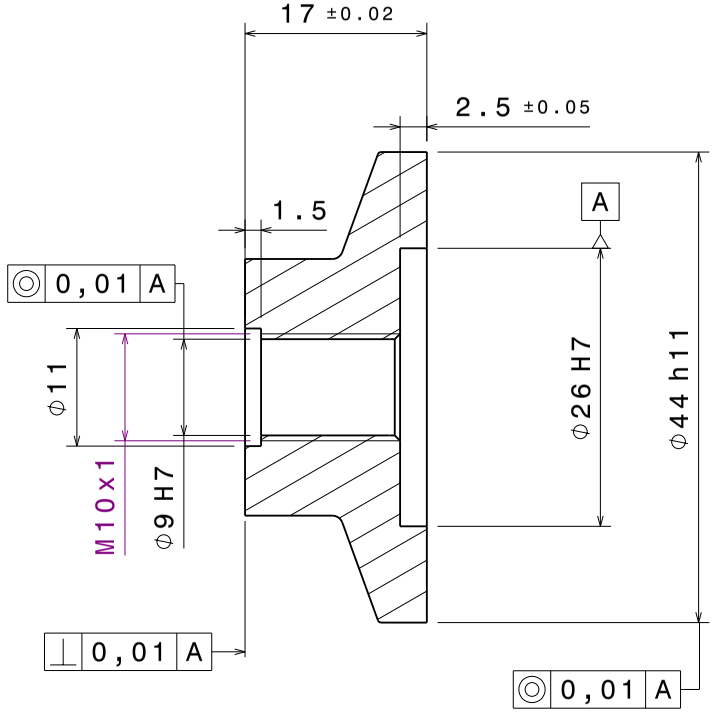
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.



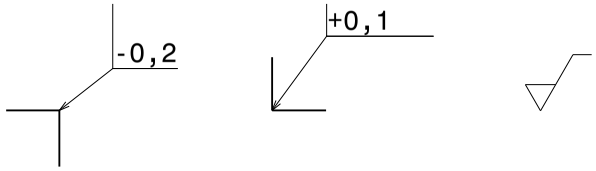

Vorderansicht
Maßstab: 2:1




Seitenansicht links
Maßstab: 2:1

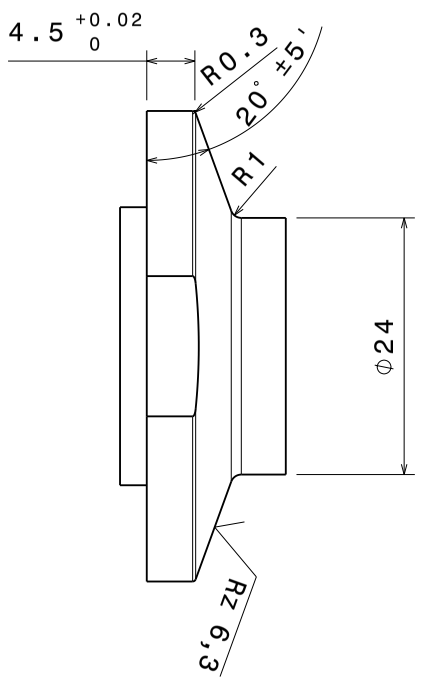



Schnittansicht A-A
Maßstab: 2:1

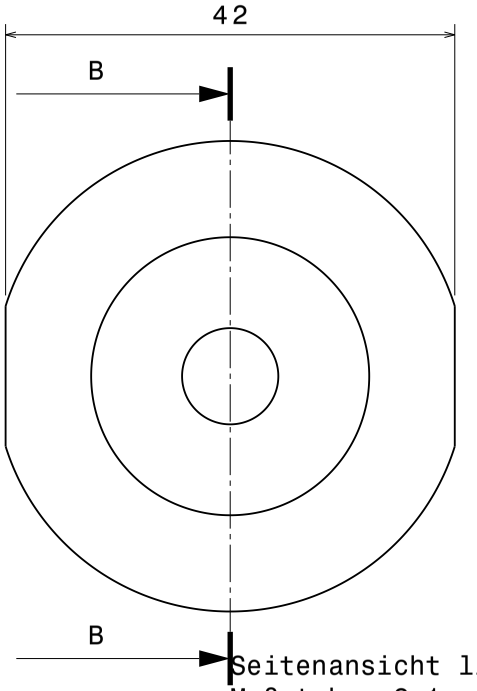



| | | | |
|---|---|---|---|
| Zul. Abw.: ISO 2768 -mK | Oberfläche: ISO 1302 | Material: verzugsarmer, verschleißfester Stahl, warmbeständig 500°C | |
| DESIGNED BY: titz_ma<br>DATE: 28.02.2021 | 101 - Flange Female Impregnation Unit | | I _ |
| CHECKED BY: XXX<br>DATE: XXX | | | H _ |
| | | | G _ |
| | | | F _ |
| SIZE A3 | DLR FA | | E _ |
| | | | D _ |
| | | | C _ |
| SCALE 1:10 / WEIGHT (kg) 0,01 | DRAWING NUMBER | SHEET 1/1 | B _ |
| | | | A _ |

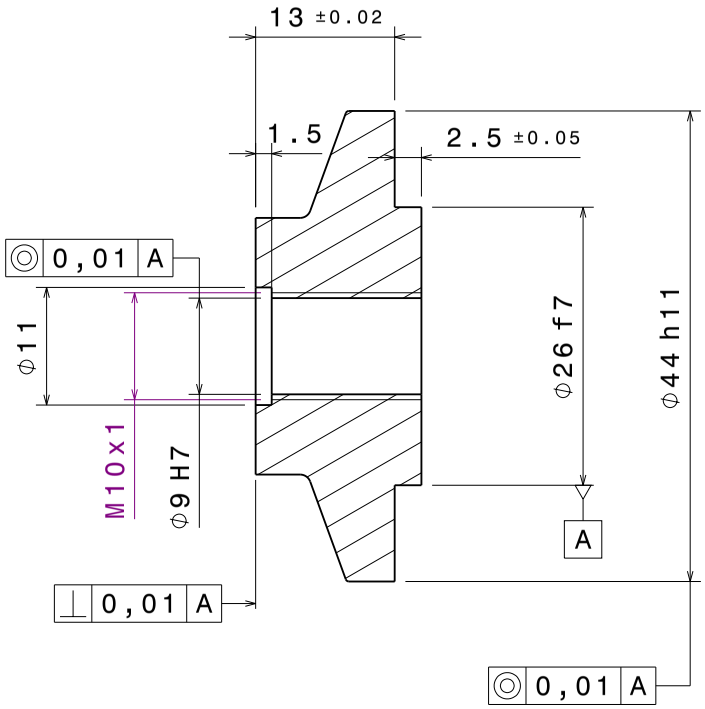
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.



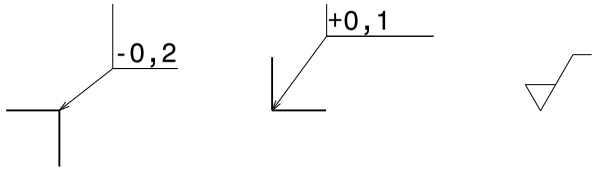

Vorderansicht
Maßstab: 2:1




Seitenansicht links
Maßstab: 2:1




Schnittansicht B-B
Maßstab: 2:1




| | | | |
|---|---|---|---|
| Zul. Abw.: ISO 2768 -mK | Oberfläche: ISO 1302 | Material: verzugsarmer, verschleißfester Stahl, warmbeständig 500°C | |
| DESIGNED BY: titz_ma<br>DATE: 28.02.2021 | 109 - Flange Male Impregnation Unit | | I – |
| CHECKED BY: XXX<br>DATE: XXX | | | H – |
| | | | G – |
| | | | F – |
| SIZE A3 | DLR FA | | E – |
| | | | D – |
| | | | C – |
| SCALE 1:10 / WEIGHT (kg) 0,01 | DRAWING NUMBER | SHEET 1/1 | B – |
| | | | A – |

This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.

# C Rheologische Materialdaten

**Tabelle C.1:** Rheologische Daten zu PLA "Natureworks Ingeo 2003D"bei 210 °C

| Kreisfrequenz [rad/s] | Speichermodul [Pa] | Verlustmodul [Pa] | Verlustfaktor [1] | Komplexe Viskosität [Pa·s] |
|---|---|---|---|---|
| 628 | 1,78E+05 | 1,59E+05 | 0,894 | 380,81 |
| 386 | 1,28E+05 | 1,40E+05 | 1,093 | 489,66 |
| 238 | 87201 | 1,15E+05 | 1,317 | 606,77 |
| 146 | 56480 | 90532 | 1,603 | 729,83 |
| 89,9 | 34579 | 68402 | 1,978 | 852,15 |
| 55,3 | 19964 | 49578 | 2,483 | 965,93 |
| 34 | 10852 | 34573 | 3,186 | 1064,6 |
| 20,9 | 5564,6 | 23306 | 4,188 | 1144,3 |
| 12,9 | 2702,6 | 15280 | 5,654 | 1204,6 |
| 7,92 | 1250,4 | 9798,5 | 7,837 | 1246,5 |
| 4,88 | 553,56 | 6185,8 | 11,175 | 1273,9 |
| 3 | 235,92 | 3861,5 | 16,368 | 1290 |
| 1,84 | 97,355 | 2392,7 | 24,577 | 1298 |
| 1,13 | 39,751 | 1474,6 | 37,096 | 1299,7 |
| 0,698 | 15,962 | 904,59 | 56,671 | 1295,8 |
| 0,43 | 6,6467 | 553,27 | 83,24 | 1288,2 |
| 0,264 | 2,1016 | 339,42 | 161,504 | 1284,5 |
| 0,163 | 1,7828 | 205,87 | 115,474 | 1266,5 |
| 0,1 | 0,33868 | 123,81 | 365,573 | 1238,1 |

**Tabelle C.2:** Rheologische Daten zu PLA "Natureworks Ingeo 2003D" bei 230 °C [extrapoliert]

| Kreisfrequenz [rad/s] | Komplexe Viskosität [Pa·s] | Speichermodul [Pa] | Verlustmodul [Pa] | Verlustfaktor [1] | Dynamische Viskosität [Pa·s] |
|---|---|---|---|---|---|
| 628 | 227,61 | 102450,00 | 99790,00 | 0,974036 | 158,9013 |
| 386 | 280,20 | 63612,00 | 88150,00 | 1,385745 | 228,3679 |
| 238 | 326,81 | 37729,00 | 68504,00 | 1,815686 | 287,8319 |
| 146 | 369,71 | 21034,00 | 50304,00 | 2,391557 | 344,5479 |
| 89,9 | 405,63 | 10967,00 | 35152,00 | 3,205252 | 391,0122 |
| 55,3 | 431,87 | 5206,00 | 23554,00 | 4,524395 | 425,9313 |
| 34 | 449,08 | 2261,40 | 15253,00 | 6,744937 | 448,6176 |
| 20,9 | 458,10 | 892,40 | 9620,00 | 10,77992 | 460,2871 |
| 12,9 | 461,08 | 318,80 | 5964,00 | 18,70765 | 462,3256 |
| 7,92 | 459,62 | 93,64 | 3654,90 | 39,0314 | 461,4773 |
| 4,88 | 456,02 | 21,98 | 2228,00 | 101,3649 | 456,5574 |
| 3 | 450,94 | 3,16 | 1354,10 | 428,5127 | 451,3667 |
| 1,84 | 443,18 | -2,31 | 818,30 | -354,703 | 444,7283 |
| 1,13 | 436,46 | -3,98 | 495,58 | -124,361 | 438,5664 |
| 0,698 | 428,40 | 0,05 | 299,17 | 6532,096 | 428,6103 |
| 0,43 | 414,14 | -0,21 | 177,91 | -833,302 | 413,7442 |
| 0,264 | 399,20 | 2,35 | 105,46 | 44,84988 | 399,4697 |
| 0,163 | 374,28 | 0,96 | 60,83 | 63,33819 | 373,1902 |
| 0,1 | 399,00 | 1,10 | 39,89 | 36,25623 | 398,92 |

# D Datenblätter

# HexTow® AS7
## Carbon Fiber

HEXCEL®

**Product Data Sheet**

HexTow® AS7 carbon fiber is a continuous, high strength, high strain, PAN based fiber available in 12,000 (12K) filament count tows. This fiber has been surface treated and can be sized to improve its interlaminar shear properties, handling characteristics, and structural properties, and is suggested for use in weaving, prepregging, filament winding, braiding, and pultrusion.

AS7-GS 12k (0.5%) carbon fiber has been qualified to NMS 818 Carbon Fiber Specification (NCAMP). This allows customers to call out an industry standard, aerospace grade carbon fiber without the need to write and maintain their own specification.

| Typical Fiber Properties | U.S. Units | SI Units |
|---|---|---|
| Tensile Strength | 715 ksi | 4930 MPa |
| Tensile Modulus (Chord 6000-1000) | 35.3 Msi | 243 GPa |
| Ultimate Elongation at Failure | 1.8% | 1.8% |
| Density | 0.0647 lb/in$^3$ | 1.79 g/cm$^3$ |
| Weight/Length (12K) | 44.8 x 10$^{-6}$ lb/in | 0.800 g/m |
| Approximate Yield (12K) | 1,860 ft/lb | 1.25 m/g |
| Tow Cross-Sectional Area (12K) | 6.93 x 10$^{-4}$ in$^2$ | 0.45 mm$^2$ |
| Filament Diameter | 0.271 mil | 6.9 microns |
| Carbon Content | 94.0% | 94.0% |
| Twist | Never Twisted | Never Twisted |

| Typical HexPly 8552 Composite Properties (at Room Temperature) | U.S. Units | SI Units | Test Method |
|---|---|---|---|
| 0° Tensile Strength | 340 ksi | 2344 MPa | ASTM D3039 |
| 0° Tensile Modulus | 19.2 Msi | 133 GPa | |
| 0° Tensile Strain | 1.6% | 1.6% | |
| 0° Short Beam Shear Strength | 18.4 ksi | 127 MPa | ASTM D2344 |
| 0° Compressive Strength | 260 ksi | 1790 MPa | ASTM Mod. D695 |
| Open Hole Tensile Strength | 52.9 ksi | 364 MPa | ASTM D5766 |
| Open Hole Compressive Strength | 46.0 ksi | 317 MPa | ASTM D6484 |
| Fiber Volume | 60% | 60% | |

### Carbon Fiber Certification

This carbon fiber is manufactured to Hexcel aerospace grade specification HS-CP-4000. A copy of this specification is available upon request. A Certification of Analysis will be provided with each shipment of HS-CP-4000 fiber.

### Available Sizing

Sizing compatible with various resin systems, based on application are available to improve handling characteristics and structural properties. Please see additional information on available sizes on our website or contact our technical team for additional information.

*Copyright © 2023– Hexcel Corporation – All Rights Reserved.*

## Sizing

| Size | Compatibility | Recommended Uses |
|---|---|---|
| GP | Epoxy, Phenolic, Vinyl Ester, Polyurethane, Cyanate Ester, BMI | Weaving, Filament Winding, Prepreg Tape |
| GS | Epoxy, Vinyl Ester, Polyurethane | Prepreg Tape |
| Unsized | All Resins | Prepreg Tape |

**Compatibility with these Matrices is considered theoretically compatible. Hexcel cannot guarantee their results.*

## Packaging

Standard packaging of HexTow® AS7 is as follows:

| Filament Count | Sizing | Nominal Weight | | Nominal Length | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | (lb) | (kg) | (ft) | (m) |
| 12K | GP (0.9%) | 8.0 | 3.6 | 14,880 | 4,540 |
| | GS (0.5%) | | | | |
| | Unsized | | | | |

*Other package sizes may be available on request. The fiber is wound on a 3-inch ID by 11-inch long cardboard tube and overwrapped with plastic film.*

## Safety Information

Obtain, read, and understand the Safety Data Sheet (SDS) before use of this product.

## For more information

Hexcel is a leading worldwide supplier of composite materials to aerospace and industrial markets. Our comprehensive range includes:

- HexTow® carbon fibers
- HexForce® reinforcements
- HiMax® multiaxial reinforcements
- HexPly® prepregs
- HexAM® additive manufacturing
- HexMC® molding compounds
- HiFlow® RTM resins
- HexBond® adhesives
- HexTool® tooling materials
- HexWeb® honeycomb
- Acousti-Cap® sound attenuating honeycomb
- Engineered core
- Engineered products
- Polyspeed® laminates & pultruded profiles

For U.S. quotes, orders and product information call toll-free 1-800-688-7734. For other worldwide sales office telephone numbers and a full address list, please go to:

**http://www.hexcel.com/contact**

*©2023 Hexcel Corporation – All rights reserved. Hexcel Corporation and its subsidiaries ("Hexcel") believe that the technical data and other information provided herein was materially accurate as of the date this document was issued. Hexcel reserves the right to update, revise or modify such technical data and information at any time. Any performance values provided are considered representative but do not and should not constitute a substitute for your own testing of the suitability of our products for your particular purpose. Hexcel makes no warranty or representation, express or implied, including but not limited to the implied warranties of merchantability and fitness for a particular purpose, and disclaims any liability arising out of or related to, the use of or reliance upon any of the technical data or information contained in this document.*

CTA 347 AG23

Kunststoffformenstahl, Werkzeugstahl

# TOOLOX 33

## VERWENDUNGSMÖGLICHKEITEN

- Formenwerkzeuge
- Gleitführungen
- Verschleißplatten
- Kunststoff- und Gummiformen
- Matrizen
- Vorrichtungsbau
- Maschinenbauteile mit hohen Ansprüchen an die Festigkeit
- Verschleißteile
- Biege- und Umformwerkzeuge

## BESONDERHEITEN

- nitrierbar
- maximale Härte: 30 HRC

Toolox® ist ein vergüteter Werkzeugstahl, der die positiven Eigenschaften der Werkstoffe 1.2312 und 1.2311 vereint, bzw. ihn ersetzt. Zunächst als Kunststoffformenstahl entwickelt, hat sich Toolox33 jedoch im Vorrichtungs- und im Maschinenbau bewährt, aufgrund seiner Zähigkeit, Verzugsarmut, hohen Festigkeit und der leichten Bearbeitbarkeit. Zudem besitzt er ein sehr gleichmäßiges, homogenes Gefüge. Eine erneute Wärmebehandlung durch Anlassen ist nicht nötig, da er bereits werksseitig wärmebehandelt und vergütet ist.

## LIEFERUNG

| | |
|---|---|
| Lieferhärte: | 275 - 325 HB |
| Lieferzugfestigkeit: | 1000 N/mm$^2$ |
| Lieferzustand | vergütet |

**WERKSTOFF DATENBLATT** **GRUPPE** Kunststoffformenstahl, Werkzeugstahl

# TOOLOX 33

**TOOLOX 33 ONLINE KAUFEN**

## CHEMISCHE ZUSAMMENSETZUNG

| | max. | min. |
|---|---|---|
| C (Kohlenstoff) | 0,24 | 0,22 |
| Si (Silicium) | 1,1 | 0,6 |
| Mn (Mangan) | 0,8 | |
| Cr (Chrom) | 1,2 | 1,0 |
| Ni (Nickel) | 1,0 | |
| V (Vanadium) | 0,11 | 0,10 |
| Mo (Molybdän) | 0,3 | |
| S (Schwefel) | 0,003 | |
| P (Phosphor) | 0,01 | |

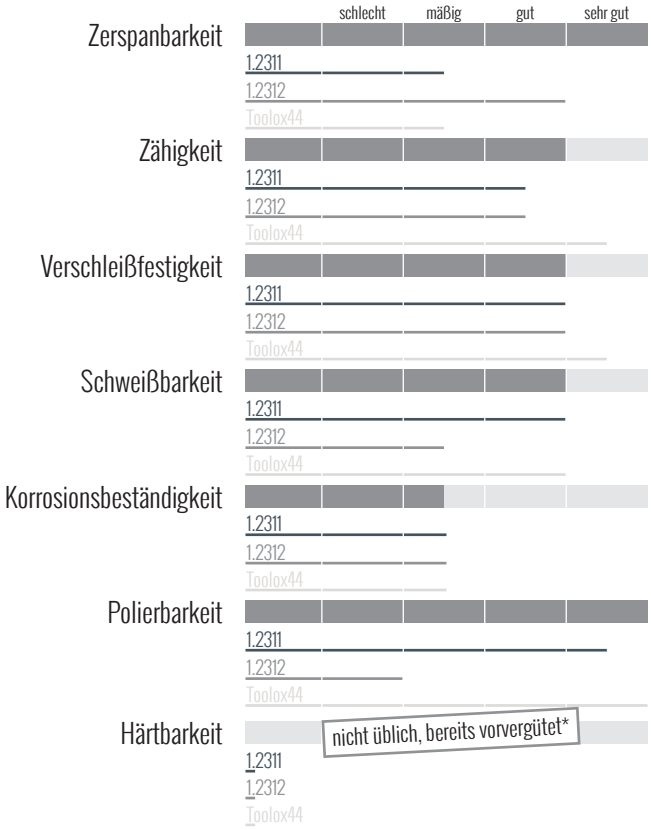
## BEHANDLUNGSMÖGLICHKEITEN

| | | |
|---|---|---|
| nitrieren | bis 590° C | erreichbare Oberflächenhärte: **60-65 HRC** |
| spannungsarm glühen | ca. 540 °C | |
| härten | nicht vorgesehen, vergütet geliefert* | |
| anlassen | wärmebehandelt und vergütet geliefert | |

## PHYSIKALISCHE EIGENSCHAFTEN

| | |
|---|---|
| Dichte | 7,85 kg/dm³ |
| Wärmeleitfähigkeit bei 20° | 35 W/m • K |
| Elastizitätsmodul | 210 **k**N/mm² |
| Kerbschlagarbeit bei 20° | 18 J |

## WERKSTOFF-EIGENSCHAFTEN




| | | |
|---|---|---|
| Zugfestigkeit $R_m$ [N/mm²] | Toolox33 | 800 - 980 |
| | 1.2311 | 950 - 1100 |
| | 1.2312 | 950 - 1100 |
| | Toolox44 | 1450 |
| Bruchdehnung $A_5$ [%] | Toolox33 | 16 bei 20° |
| | 1.2311 | 18 bei 20 ° |
| | 1.2312 | 18 bei 20° |
| | Toolox44 | 13 bei 20° |
| Streckgrenze $R_{p0,2}$ [N/mm²] | Toolox33 | 850 - 700 |
| | 1.2311 | 800 bei 20° |
| | 1.2312 | 800 bei 20° |
| | Toolox44 | 1150 |

* sie suchen härteren Stahl?
Wir empfehlen den Toolox®44 mit 44 HRC

Haftungsausschluss: Da die Werte je nach Verarbeitung variieren können, sind die genannten Werte lediglich Richtwerte und ohne Garantie.

NatureWorks

# Ingeo™ Biopolymer 2003D Technical Data Sheet

# For Fresh Food Packaging and Food Serviceware

Ingeo biopolymer 2003D, a NatureWorks LLC product, is a thermoplastic resin derived from annually renewable resources and is specifically designed for use in fresh food packaging and food serviceware applications. Ingeo biopolymer 2003D is a transparent general purpose extrusion grade that is used naturally or as part of a formulated blend. This is a high molecular weight biopolymer grade that processes easily on conventional extrusion equipment. Extruded roll stock is readily thermoformable. See table at right for properties.

| Typical Material & Application Properties (1) | | |
|---|---|---|
| **Physical Properties** | **Ingeo 2003D** | **ASTM Method** |
| Specific Gravity | 1.24 | D792 |
| MFR, g/10 min (210°C, 2.16kg) | 6 | D1238 |
| Melting Point | 140–155ºC | D3418 |
| Clarity | Transparent | |
| **Mechanical Properties** | | |
| Tensile Strength @ Break, psi (MPa) | 7,700 (53) | D882 |
| Tensile Yield Strength, psi (MPa) | 8,700 (60) | D882 |
| Tensile Modulus, kpsi (GPa) | 500 (3.5) | D882 |
| Tensile Elongation, % | 6.0 | D882 |
| Notched Izod Impact, ft-lb/in (J/m) | 0.3 (16) | D256 |
| Shrinkage is similar to PET (2) | | |
| Heat Distortion Temperature (°C) | 55 | E2092 |

(1) Typical properties; not to be construed as specifications.

(2) Refer to Ingeo biopolymer Sheet Extrusion Processing Guide

## Applications

Potential applications for Ingeo biopolymer 2003D include:

- Dairy containers
- Food serviceware
- Transparent food containers
- Hinged-ware
- Cold drink cups

## Processing Information

Ingeo biopolymer 2003D is easily processed on conventional extrusion equipment. The material is stable in the molten state, provided that the drying procedures are followed. More detailed recommendations and processing requirements are found in the Ingeo biopolymer sheet extrusion processing guide, the purging technical data sheet, and the drying and crystallizing processing guide, all of which can be found at www.natureworksllc.com.

### Machine Configuration

Ingeo biopolymer 2003D will process on conventional extrusion machinery with the following equipment: General purpose screw with L/D ratios from 24:1 to 32:1 and compression ratio of 2.5:1 to 3:1. Smooth barrels are recommended.

## Process Details

### Startup and Shutdown

Ingeo biopolymer 2003D is not compatible with a wide variety of commodity resins, and special purging sequences should be followed:

| Processing Temperature Profile (1) | | |
|---|---|---|
| Melt Temperature | 410ºF | 210ºC |
| Feed Throat | 113ºF | 45ºC |
| Feed Temperature | 355ºF | 180ºC |
| Compression Section | 375ºF | 190ºC |
| Metering Section | 390ºF | 200ºC |
| Adapter | 390ºF | 200ºC |
| Die | 375ºF | 190ºC |
| Screw Speed | 20-100 rpm | |

(1) These are starting points and may need to be optimized.

1. Clean extruder and bring temperatures to steady state with low viscosity, general purpose polystyrene or polypropylene.
2. Vacuum out hopper system to avoid contamination.
3. Introduce Ingeo biopolymers into the extruder at the operating conditions used in Step 1.
4. Once Ingeo biopolymer has purged, reduce barrel temperatures to desired set points.
5. At shutdown, purge machine with high viscosity polystyrene or polypropylene.

### Drying

In-line drying may be required. A moisture content of less than 0.025% (250 ppm) is recommended to prevent viscosity degradation. Typical drying conditions for crystallized granules are 2 hours at 195ºF (90ºC) or to a dew point of -



Ingeo and the Ingeo logo are trademarks or registered trademarks in the USA and other countries.

40ºF (-40ºC), airflow rate of greater than 0.5 cfm/lbs per hour of resin throughput. The resin should not be exposed to atmospheric conditions after drying. Keep the package sealed until ready to use and promptly reseal any unused material. Pellets that have been exposed to the atmosphere for extended time periods will require additional drying time. Amorphous regrind must be crystallized prior to drying, to assure efficient and effective drying.

## Food Packaging Status

### U.S. Status

On January 3, 2002 FCN 000178 submitted by NatureWorks LLC to FDA became effective. This effective notification is part of list currently maintained on FDA's website at

http://www.fda.gov/food/ingredientspackaginglabeling/packagingfcs/notifications/default.htm

This grade of Ingeo biopolymer may therefore be used in food packaging materials and, as such, is a permitted component of such materials pursuant to section 201(s) of the Federal, Drug, and Cosmetic Act, and Parts 182, 184, and 186 of the Food Additive Regulations. All additives and adjuncts contained in the referenced Ingeo biopolymer formulation meet the applicable sections of the Federal Food, Drug, and Cosmetic Act. The finished polymer is approved for all food types and B-H use conditions. We urge all of our customers to perform GMP (Good Manufacturing Procedures) when constructing a package so that it is suitable for the end use.

### European Status

This grade of Ingeo biopolymer complies with Plastics Regulation 10/2011 as amended. No SML's for the above referenced grade exist in Plastics Regulation 10/2011 as amended. NatureWorks LLC would like to draw your attention to the fact that the EU- Plastics Regulation 10/2011, which applies to all EU-Member States, includes a limit of 10 mg/dm2 of the overall migration from finished plastic articles into food. In accordance with Plastics Regulation 10/2011 the migration should be measured on finished articles placed into contact with the foodstuff or appropriate food simulants for a period and at a temperature which are chosen by reference to the contact conditions in actual use, according to the rules laid down in Plastics Regulation 10/2011.

Please note that it is the responsibility of both the manufacturers of finished food contact articles as well as the industrial food packers to make sure that these articles in their actual use are in compliance with the imposed specific and overall migration requirements.

This grade as supplied meets European Parliament and Council Directive 94/62/EC of 20 December 1994 on packaging and packaging waste heavy metal content as described in Article 11.

Should you need further clarification, contact NatureWorks LLC.

## Bulk Storage Recommendations

The resin silos recommended and used by NatureWorks LLC are designed to maintain dry air in the silo and to be isolated from the outside air. This design would be in contrast to an open, vented to atmosphere system that we understand to be a typical polystyrene resin silo. Key features that are added to a typical (example: polystyrene) resin silo to achieve this objective include a cyclone and rotary valve loading system and some pressure vessel relief valves. The dry air put to the system is sized to the resin flow rate out of the silo. Not too much dry air would be needed and there may be excess instrument air (-30°F dew point) available in the plant to meet the needs for dry air. Our estimate is 10 scfm for a 20,000 lb/hr rate resin usage. Typically, resin manufacturers specify aluminum or stainless steel silos for their own use and avoid epoxy-lined steel.



Ingeo and the Ingeo logo are trademarks or registered trademarks of NatureWorks in the USA and other countries.

## Safety and Handling Considerations

Safety Data Sheets (SDS) for Ingeo biopolymers are available from NatureWorks. SDS's are provided to help customers satisfy their own handling, safety, and disposal needs, and those that may be required by locally applicable health and safety regulations. SDS's are updated regularly; therefore, please request and review the most current SDS's before handling or using any product.

*The following comments apply only to Ingeo biopolymers; additives and processing aids used in fabrication and other materials used in finishing steps have their own safe-use profile and must be investigated separately.*

## Hazards and Handling Precautions

Ingeo biopolymers have a very low degree of toxicity and, under normal conditions of use, should pose no unusual problems from incidental ingestion or eye and skin contact. However, caution is advised when handling, storing, using, or disposing of these resins, and good housekeeping and controlling of dusts are necessary for safe handling of product. Pellets or beads may present a slipping hazard.

No other precautions other than clean, body-covering clothing should be needed for handling Ingeo biopolymers. Use gloves with insulation for thermal protection when exposure to the melt is localized. Workers should be protected from the possibility of contact with molten resin during fabrication.

Handling and fabrication of resins can result in the generation of vapors and dusts that may cause irritation to eyes and the upper respiratory tract. In dusty atmospheres, use an approved dust respirator.

Good general ventilation of the polymer processing area is recommended. At temperatures exceeding the polymer melt temperature (typically 175ºC), polymer can release fumes, which may contain fragments of the polymer, creating a potential to irritate eyes and mucous membranes. Good general ventilation should be sufficient for most conditions. Local exhaust ventilation is recommended for melt operations. Use safety glasses (or goggles) to prevent exposure to particles, which could cause mechanical injury to the eye. If vapor exposure causes eye discomfort, improve localized fume exhausting methods or use a full-face respirator.

The primary thermal decomposition product of PLA is acetaldehyde, a material also produced during the thermal degradation of PET. Thermal decomposition products also include carbon monoxide and hexanal, all of which exist as gases at normal room conditions. These species are highly flammable, easily ignited by spark or flame, and can also auto ignite. For polyesters such as PLA, thermal decomposition producing flammable vapors containing acetaldehyde and carbon monoxide can occur in almost any process equipment maintaining PLA at high temperature over longer residence times than typically experienced in extruders, fiber spinning lines, injection molding machines, accumulators, pipe lines and adapters. As a rough guideline based upon some practical experience, significant decomposition of PLA will occur if polymer residues are held at temperatures above the melting point for prolonged periods, e.g., in excess of 24 hours at 175°C, although this will vary significantly with temperature.

## Combustibility

Ingeo biopolymers will burn. Clear to white smoke is produced when product burns. Toxic fumes are released under conditions of incomplete combustion. Do not permit dust to accumulate. Dust layers can be ignited by spontaneous combustion or other ignition sources. When suspended in air, dust can pose an explosion hazard. Firefighters should wear positive-pressure, self-contained breathing apparatuses and full protective equipment. Water or water fog is the preferred extinguishing medium. Foam, alcohol-resistant foam, carbon dioxide or dry chemicals may also be used. Soak thoroughly with water to cool and prevent re-ignition.

## Disposal

DO NOT DUMP INTO ANY SEWERS, ON THE GROUND, OR INTO ANY BODY OF WATER. For unused or uncontaminated material, the preferred option is to recycle into the process otherwise, send to an incinerator or other thermal destruction device. For used or contaminated material, the disposal options remain the same, although additional evaluation is required. Disposal must be in compliance with Federal, State/Provincial, and local laws and regulations.

## Environmental Concerns

Generally speaking, lost pellets, while undesirable, are benign in terms of their physical environmental impact, but if ingested by wildlife, they may mechanically cause adverse effects. Spills should be minimized, and they should be cleaned up when they happen. Plastics should not be discarded into the environment.

## Product Stewardship

NatureWorks has a fundamental duty to all those that use our products, and for the environment in which we live. This duty is the basis for our Product Stewardship philosophy, by which we assess the health and environmental information on our products and their intended use, and then take


Ingeo and the Ingeo logo are trademarks or registered trademarks of NatureWorks in the USA and other countries.

appropriate steps to protect the environment and the health of our employees and the public.

## Customer Notice

NatureWorks encourages its customers and potential users of its products to review their applications from the standpoint of human health and environmental quality. To help ensure our products are not used in ways for which they were not intended or tested, our personnel will assist customers in dealing with ecological and product safety considerations. Your sales representative can arrange the proper contacts. NatureWorks literature should be consulted prior to the use of the company's products.

**NOTICE:**
No freedom from infringement of any patent owned by NatureWorks LLC or others is to be inferred. No information in this publication can be considered a suggestion to infringe patents.

The technical information, recommendations and other statements contained in this document are based upon tests or experience that NatureWorks believes are reliable, but the accuracy or completeness of such information is not guaranteed. Many factors beyond NatureWorks control can affect the use and performance of a NatureWorks product in a particular application, including the conditions under which the product is used and the time and environmental conditions in which the product is expected to perform. Since these factors are uniquely within the user's knowledge or control, it is essential that the user evaluate the NatureWorks product to determine whether it is fit for a particular purpose and suitable for the user's method of application. In addition, because use conditions are outside of NatureWorks control and applicable laws may differ from one location to another and may change with time, Customer is solely responsible for determining whether products and the information in this document are appropriate for Customer's use and for ensuring that Customer's workplace, use and disposal practices are in compliance with applicable laws and regulations. NatureWorks LLC assumes no obligation or liability for the information in this document.

NATUREWORKS MAKES NO WARRANTY, EXPRESS OR IMPLIED, REGARDING THE INFORMATION CONTAINED HEREIN OR ITS PRODUCTS, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO ANY WARRANTY AS TO ACCURACY OR COMPLETENESS OF INFORMATION, OR ANY IMPLIED WARRANTY OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE.

**NOTICE REGARDING PROHIBITED USE RESTRICTIONS**: Unless specifically agreed to in writing by NatureWorks, NatureWorks LLC will not knowingly sell or sample any product into any of the following commercial or developmental applications (i) components of or packaging for tobacco products, (ii) components of products intended for human or animal consumption, (iii) any application that is intended for any internal contact with human body fluids or body tissues, (iv) as a critical component in any medical device that supports or sustains human life, (v) in any product that is designed specifically for ingestion or internal use by pregnant women, (vi) in any application designed specifically to promote or interfere with human reproduction, (vii) in microbeads, including those used in personal care/cosmetic applications, or (vii) to manufacture bottles or bottle pre-forms in North America.

For additional information please contact NatureWorks via our website on the tab called FAQ's or by clicking here.

NatureWorks
15305 Minnetonka Blvd., Minnetonka, MN 55345


Ingeo and the Ingeo logo are trademarks or registered trademarks of NatureWorks in the USA and other countries.

Mit integriertem Verstärker - Ausgang mA oder V

# Drucktransmitter Serie DAI

Die Serie DAI bietet dem Anwender höchsten Komfort bei der Bedienung und maximale Sicherheit in punkto Zuverlässigkeit. Durch die Auto-Zero Funktion ist eine Kalibrierung direkt am Gerät oder von der Warte / Steuerung aus möglich.

Am Ausgang stellt der Massedrucktransmitter mA oder V Signale zur Weiterverarbeitung bereit. Die populäre und weit verbreitete 2-Leiter 4…20mA Ausführung zeichnet sich durch eine unübertroffene Störsicherheit in kritischer Umgebung aus.

- Störsichere Signalübertragung über weite Distanzen
- Bei vertauschten Anschlüssen keine Schädigung
- 3- und 4-Leiter Technik ohne Aufpreis
- Hochtemperaturausführung bis zu 500 °C
- Maximale Zuverlässigkeit durch neue Membrantechnologie
- Gneuß-Spezialbeschichtung gegen anhaftende und abrasive Medien als Standard

## Technische Daten

| | |
|---|---|
| Druckbereich | 0...17 bis 0...2000 bar |
| Genauigkeit inkl. Linearität, Hysterese und Wiederholbarkeit in % vom Endwert | 0,15%, 0,25 % oder 0,5 % |
| Reproduzierbarkeit in % vom Endwert | ± 0,1 % |
| Beschichtung der Trennmembran | G-Coating |
| Auflösung | 16 Bit |
| Max. Überlast ohne Einfluß auf die Betriebsdaten | 2 x Druckbereich bis 1000 bar<br>1,5 x Druckbereich ab 1000 bar |
| Brückenwiderstand | 3500 Ohm DMS |
| Speisespannung | 19 - 32 V DC |
| Ausgangssignal | V oder mA |
| Übertragungsmedium | NTX™ im Standard |
| Einschraubgewinde | 1/2"20 UNF oder M18 x 1,5 |
| Kalibrierpunkt v. E. | 80 % |
| Isolationswiderstand | >1000 MOhm bei 50 V |
| max. Temperatur an der Trennmembran bis zu | 300 °C NTX<br>400 °C HG<br>500 °C NAK |
| max. Temperatur am Messkopf im Betrieb | - 40... +85 °C |
| Nullpunktabweichung bei Temperaturänderungen an der Membran | ± 0,02 bar / °C * |
| Nullpunktabweichung bei Temperaturänderungen am Messkopf in % / 1°C | ± 0,003 % |
| Schutzart Gehäuse /<br>Schutzart Stecker | IP 65 /<br>IP 55 |
| max. zulässiges Einschraubmoment | 1/2"20 UNF 30 Nm<br>M18 x 1,5 50 Nm |

* Bei Standardmembrane, Übertragungsmedium NTX™ und 1/2"20 UNF. Änderungen abweichend.

## Produktvarianten (Beispiele)

**Hochpräzise Drucksensoren**
Wahlweise mit Messgenauigkeit 0,15 %, 0,25 % , 0,5 % vom Endwert

**Auto-Zero Funktion**
Optional mit optischer Auto-Zero Auslösung im Sensorkopf