TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN
Vienna | Austria

Diplomarbeit

Entwicklung einer Spinndüse zur Erzeugung von Hohlfasermembranen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

Diplom-Ingenieurs

eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Matthias Golda, BSc

Matr.Nr.: 01325705

unter der Leitung von

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Margit Gföhler**

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Michael Harasek**

und den Betreuern

Dipl.-Ing. Dr.techn. **Christoph Janeczek**

Dr.techn. Bahram **Haddadi Sisakht**, MSc

Institut für Konstruktionswissenschaften und Produktentwicklung

Forschungsbereich Biomechanik und Rehabilitationstechnik

Technische Universität Wien

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass die vorliegende Arbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen von mir selbstständig erstellt wurde. Alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, sind in dieser Arbeit genannt und aufgelistet. Die aus den Quellen wörtlich entnommenen Stellen, sind als solche kenntlich gemacht. Das Thema dieser Arbeit wurde von mir bisher weder im In- noch Ausland einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt. Diese Arbeit stimmt mit der von den Begutachterinnen/Begutachtern beurteilten Arbeit überein.

Wien, am _____ _____

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich während der Anfertigung dieser Diplomarbeit unterstützt und motiviert haben.

Zuerst gebührt mein Dank Frau Prof. Dr. Margit Gföhler und Herrn Prof. Dr. Michael Harasek, die meine Masterarbeit betreut und begutachtet haben. Für die hilfreichen Anregungen und die konstruktive Kritik bei der Erstellung dieser Arbeit möchte ich mich herzlich bedanken.

Ebenfalls möchte ich mich bei meinen beiden Betreuern Dr. Christoph Janeczek und Dr. Bahram Haddadi Sisakht sowie den Mitarbeitern der Forschungsgruppe Thermische Verfahrenstechnik und Simulation bedanken, die mir mit viel Geduld, Interesse und Hilfsbereitschaft zur Seite standen.

Abschließend möchte ich mich bei meinen Eltern bedanken, die mir mein Studium durch ihre Unterstützung ermöglicht haben.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

Kurzfassung

Ziel der vorliegenden Arbeit war die Entwicklung und Konstruktion einer Spinndüse zur Herstellung von Hohlfasermembranen, deren Anwendungsgebiet beispielsweise in der Medizintechnik für Dialysatoren zur Blutwäsche oder in der Lebensmittelindustrie zum Klären von Getränken liegt. Die Membranherstellung erfolgt mittels des Herstellungsverfahrens der Nichtlösungsmittel induzierten Phasenseparation (NIPS-Verfahren). Der Kontakt eines in einer Polymerlösung befindlichen Lösungsmittels mit einem Nichtlösungsmittel führt zu einer Phasenseparation, welche die Membranstruktur erzeugt. Zur geometrischen Formgebung kommt eine Spinndüse zum Einsatz. Diese setzt sich aus einem Gehäuse und einem Düsenzapfen mit integriertem Injektor zusammen. Durch Fügen beider Komponenten wird der Injektor konzentrisch, in einer im Gehäuse befindlichen Düsenöffnung, platziert. Dem Gehäuse wird die Polymerlösung und dem Düsenzapfen das Nichtlösungsmittel zugeführt, wodurch beide Stoffströme unter räumlicher Trennung zur Öffnung der Düse gelangen. Beim Verlassen der Düsenöffnung erfolgt die Ausbildung eines zylindrischen Polymerstrahls, in dem vom Injektor das Nichtlösungsmittel eingespeist wird. Der Kontakt der beiden Stoffströme führt zu einer Phasenseparation, wodurch die Ausbildung eines Faserhohlraumes während des Extrusionsprozesses erfolgt. Anschließendes Eindüsen der Faser in ein Fällbad, welches ebenfalls das Nichtlösungsmittel enthält, führt zur vollständigen Ausbildung der Membranstruktur. Da die Viskosität der Polymerlösung zu einer Beeinflussung der Membranstruktur beiträgt und diese über die Temperatur reguliert werden kann, wurde die Spinndüse mit einer Beheizungsmöglichkeit versehen. Schlussendlich wird die Faser über Umlenkrollen aus dem Fällbad befördert und einem Wickelsystem zugeführt, wovon die fertige Faser entnommen werden kann.

Um die grundlegende Funktionalität der Düse feststellen zu können fanden drei Testversuche statt. Der erste Testversuch erfolgte ohne Umlenkrollen und Wickeleinheit, um lediglich das Betriebsverhalten der Spinndüse zu untersuchen. Dabei wurde ein Luftspalt zwischen Düsenöffnung und Fällbad-Oberfläche von 6 cm gewählt. Die Temperatur der zugeführten Polymerlösung (31 w% PES/NMP-Gemisch) betrug 70 °C. Die Extrusion der ersten Hohlfaser gelang. Der zweite Testversuch fand mit Umlenkrollen und integrierter Wickeleinheit sowie einer Variation des Luftspalts (6 – 13 cm) statt. Die Temperatur der Polymerlösung betrug 65 °C. Der Versuch veranschaulichte die Funktionalität der gesamten Anlage. Die extrudierten Fasern wurden mittels Umlenkrollen aus dem Fällbad befördert und der Wickeleinheit zugeführt. Mehrere mikroskopische Aufnahmen des Faserquerschnittes zeigten jedoch einen deformiert ausgeprägten Hohlraum. Literaturrecherchen ergaben, dass diese Deformation durch Erhöhung des Luftspalts zwischen Düsenöffnung und Fällbad-Oberfläche zu beseitigen sei. Im dritten Testversuch wurde somit die Distanz des Luftspalts von 13 cm auf 26 cm erhöht. Die Temperatur der Polymerlösung blieb weiterhin auf 65 °C. Die Ergebnisse zeigten eine Hohlfaser mit voll ausgebildetem Hohlraum und gleichmäßiger Wandstärkenverteilung.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

Abstract

The aim of this thesis was the development and construction of a spinneret for the production of hollow fiber membranes, whose field of application is, for example, in medical technology for dialyzers for blood washing or in the food industry for clarifying beverages. The membrane is produced by the non-solvent-induced phase separation (NIPS process). The contact of a solvent in a polymer solution with a non-solvent leads to a phase separation, which creates the membrane structure. A spinneret is used for geometric shaping. The spinneret consists of a housing and an inner part with integrated injector. By fixing the inner part in the housing, the injector is placed concentrically in a nozzle opening of the housing. The polymer solution is fed to the housing and the non-solvent to the inner part, whereby both material flows reach the opening of the nozzle with spatial separation. When leaving the nozzle opening, a cylindrical polymer jet is formed into which the non-solvent is fed by the injector. Phase separation occurs when the two material flows come into contact, resulting in the formation of a fiber cavity during the extrusion process. Subsequent injection of the fiber into a precipitation bath, which also contains the non-solvent, leads to complete formation of the membrane structure. Since the polymer viscosity affects the membrane structure and can be regulated via the temperature, the spinneret was equipped with a heating option. Finally, the fiber is conveyed out of the precipitation bath via deflection rollers and fed to a winding system, from which the finished fiber can be removed.

To determine the basic functionality of the nozzle, three tests were carried out. The first test was carried out without deflection rollers and winder unit, in order to investigate the operating behavior of the spinneret only. An air gap of 6 cm was chosen between the nozzle opening and the precipitation bath surface. The temperature of the supplied polymer solution (31 w% PES/NMP-mixture) was 70 °C. The extrusion of the first hollow fiber was successful. The second test was carried out with deflection rollers and integrated winding unit with a variation of the air gap in the range of 6 to 13 cm. The temperature of the polymer solution was 65 °C. The test demonstrated the functionality of the entire system. The extruded fibers were conveyed out of the precipitation bath by the deflection rollers and fed to the winding unit. However, several microscopic images of the fiber cross section showed a deformed cavity. Literature research showed that this deformation could be eliminated by increasing the air gap between nozzle opening and precipitation bath surface. In the third test the distance of the air gap was thus increased from 13 cm to 26 cm. The temperature of the polymer solution remained at 65 °C. The results showed a hollow fiber with a fully developed cavity and uniform wall thickness distribution.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung 1

1.1 Funktion und Anwendung von Membranen 1

1.2 Herstellungsverfahren von Membranen 4

2. Aufgabenstellung und Aufbau der Arbeit 6

3. Grundlegende Arbeitsweise der Spinndüse nach dem NIPS-Verfahren 7

4. Viskosität der Polymerlösung bei unterschiedlichen Temperaturen 10

5. Rechnerische Auslegung einer Spinndüse 11

5.1 Berechnungsübersicht 11

5.2 Druckverlust und Scherspannungen im Düsenaustritt 13

5.2.1 Druckverlust und Scherspannung im Polymer-Kanal 13

5.2.2 Druckverlust und Scherspannung im Borefluid-Kanal 23

5.3 Festigkeitsnachweis der Verbindung von Hohlnadel und Düsenzapfen 26

5.4 Festigkeitsnachweis des Düsenzapfens 27

5.5 Festigkeitsnachweis der Füllkammer 30

5.6 Erforderlicher Durchmesser der Befestigungsschrauben 32

5.7 Zusammenfassung der Auslegungsdaten und Berechnungsergebnisse 34

6. Konstruktive Auslegung der Spinndüse 36

6.1 Spinndüse-Typ 1 36

6.1.1 Aufbau der Spinndüse 36

6.1.2 Fertigung und Assemblierung 40

6.1.3 Versuchsdurchführung 41

6.1.4 Optimierungsmaßnahmen 44

6.2 Spinndüse-Typ 2 44

6.2.1 Aufbau der Spinndüse 44

6.2.2 Fertigung und Assemblierung 47

6.2.3 Versuchsdurchführung 48

6.2.4 Optimierungsmaßnahmen 57

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

6.3 Spinndüse Typ-3 58
6.3.1 Aufbau der Spinndüse 58
6.3.2 Fertigung und Assemblierung 62
6.3.3 Versuchsdurchführung 63
6.3.4 Optimierungsmaßnahmen 67
7. Diskussion der Ergebnisse 69
8. Zusammenfassung 72
9. Abbildungsverzeichnis 75
10. Tabellenverzeichnis 79
11. Literaturverzeichnis 80
12. Anhang 82
12.1 Zusammenbau und Reinigung der Spinndüse vom Typ-3 82
12.1.1 Zusammenbau 82
12.1.2 Reinigung 83
12.2 VDI 2230-Tabelle A7 85
12.3 Technische Datenblätter 86
12.3.1 Fügeklebstoff Loctite 638 86

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

Symbolverzeichnis

Symbol	Beschreibung	Einheit
D_a	Außendurchmesser des Polymer-Kanals	mm
D_i	Innendurchmesser des Polymer-Kanals	mm
l	Durchflossene Länge	mm
A	Durchströmte Querschnittsfläche	mm^2
Q_p	Durchflussrate des Polymer-Stroms	$\frac{ml}{min}$
Q_p	Durchflussrate des Borefluid-Stroms	$\frac{ml}{min}$
v	Strömungsgeschwindigkeit	$\frac{m}{s}$
ρ	Dichte	$\frac{kg}{m^3}$
μ	Dynamische Viskosität	$Pa \cdot s$
d_h	Hydraulischer Durchmesser eines Kreisringquer-schnittes	mm
R_e	Reynoldszahl	-
k	Druckgradient	$\frac{Pa}{mm}$
R_i	Innenradius des Polymer-Kanals	mm
R_a	Außenradius des Polymer-Kanals	mm
R	Innenradius des Borefluid-Kanals	mm
Δ_{p12}	Druckverlust	bar
τ_P	Scherspannung aufgrund des Polymer-Stroms	$\frac{N}{mm^2}$
τ_B	Scherspannung aufgrund des Borefluid-Stroms	$\frac{N}{mm^2}$
F_τ	Scherkraft an der Nadeloberfläche	N
F_K	Klebekraft	N
α_{Al}	Längenausdehnungskoeffizient von Aluminium	$\frac{1}{K}$
α_{Me}	Längenausdehnungskoeffizient von Messing	$\frac{1}{K}$
α_{CrNi}	Längenausdehnungskoeffizient von Chrom-Nickel Stahl	$\frac{1}{K}$
α_K	Längenausdehnungskoeffizient des Klebers	$\frac{1}{K}$
d_F	Fügedurchmesser	mm
Δ_T	Temperaturdifferenz	K
Δ_d	Temperaturbedingte Aufweitung	µm
$\sigma_{vTresca}$	Vergleichsspannung nach Tresca	MPa
$R_{p0,2}$	0,2 % Dehngrenze von Aluminium	MPa

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzungen

NIPS: Nichtlösungsmittel induzierte Phasenseparation

FEM: Finite Elemente Methode

NMP: N-Methyl-2-pyrrolidon

PES: Polyethersulfon

PLA: Polylactid

REM: Rasterelektronenmikroskop

VDI: Verein Deutscher Ingenieure

MF: Mikrofiltration

UF: Ultrafiltration

NF: Nanofiltration

UO: Umkehrosmose

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

1. Einleitung

1.1 Funktion und Anwendung von Membranen

Technische Membranen kommen zum Einsatz, wenn es um die Trennung von gasförmigen oder flüssigen Stoffströmen geht. Diese semipermeablen Membranen ermöglichen ein mechanisches Trennverfahren. Dabei wird das zu trennende Fluid als Feed und die durch die Membran hindurchtretende Komponente als Permeat bezeichnet. Die zurückgehaltene Komponente trägt die Bezeichnung Retentat oder Konzentrat [1] (Abbildung 1).

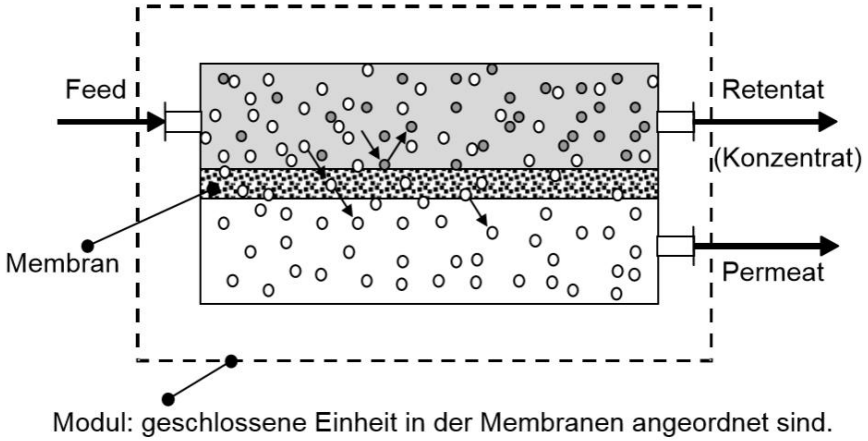


Abbildung 1: *Schematische Darstellung des Trennverhaltens von Membranverfahren [1]*

Beim Trennverfahren wird zwischen Porenmembranen und Lösungsdiffusionsmembranen unterschieden (Abbildung 2). Bei Porenmembranen erfolgt die Stofftrennung durch einen Siebmechanismus [2]. Ausschlaggebend ist hierbei die Porengröße der Membran. Diese bestimmt welche Bestandteile durchdringen beziehungsweise zurückgehalten werden. Somit werden alle Partikel zurückgehalten, die größer als der Porendurchmesser sind. Hingegen können jene Partikel die kleiner sind als der Porendurchmesser die Membran passieren [3]. Diese Membranen werden auch als poröse Membranen bezeichnet, die je nach Porengröße in den Verfahren Mikro- und Ultrafiltration (MF/UF) zur Anwendung kommen [1], [4]. Mikro- und Ultrafiltrationsmembranen besitzen Porengrößen von wenigen Mikrometern bis hin zu einem Bruchteil eines Mikrometers [4]. Bei den Lösungsdiffusionsmembranen erfolgt die Trennung der Stoffe durch unterschiedliche Löslichkeiten und Diffusionsgeschwindigkeiten in der Membranwand [2]. Im Vergleich zur Porenmembran ist hier eine Stofftrennung mit gleichem oder fast gleichem Molekulargewicht möglich [5]. Diese Membranen werden auch als dichte Membranen bezeichnet und in den Verfahren Nanofiltration und Umkehrosmose (NF/UO) angewandt [1], [4].

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

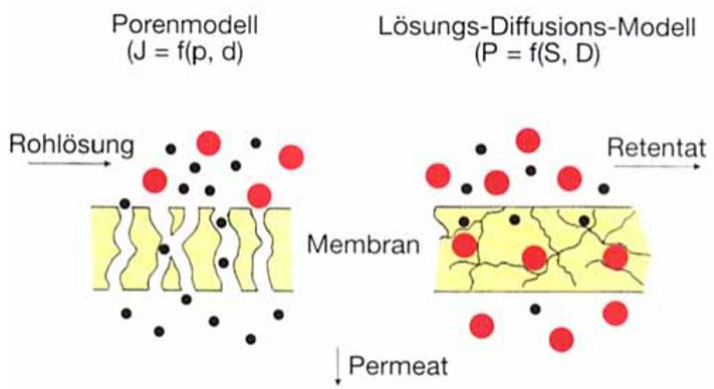


Abbildung 2: *Trennverfahren – Porenmodell und Lösungsdiffusions-Modell [2]*

Alternativ können Membranen in synthetische und biologische Membranen unterteilt werden (Abbildung 3). Biologische Membranen bestehen aus einer 8 nm dicken Lipid-Doppelschicht, die zahlreiche Transmembranproteine beinhalten. Diese Membranen, welche eine Zelle umgeben, sorgen einerseits für den Schutz der Zelle und dienen zum Stoffaustausch mit der Umgebung. Synthetische Membranen werden wiederum in feste und flüssige Membranen unterteilt. Bei den synthetisch festen Membranen wird darüber hinaus zwischen organischen und anorganischen Membranen unterschieden. Zur Herstellung organischer Membranen kommen Polymere und Polymermischungen zum Einsatz. Häufig verwendete synthetische Produkte sind: Polyethylen, Polypropylen, Polyacrylnitril, Polyvinylalkohol, Polyvinylchlorid, Polyvinylacetat und Polysulfon. Bei den anorganischen Membranen finden Werkstoffe wie Keramik, Glas, Edelmetalle und Kohlenstoff Anwendung [1], [3].

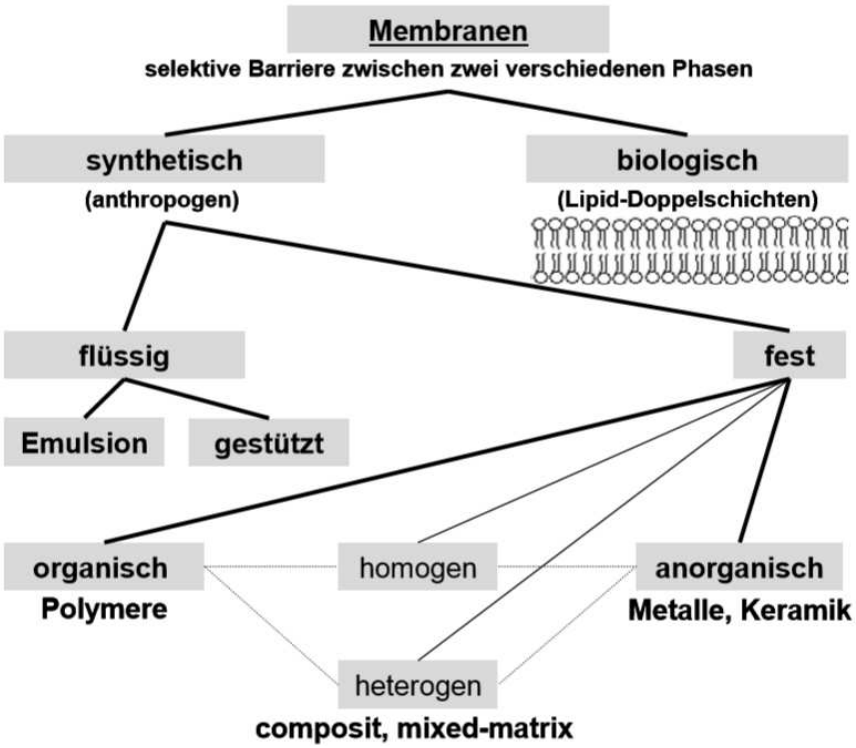


Abbildung 3: *Klassifizierung von Membranen nach Herkunft und Werkstoffen [1]*

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Um diese Membranen nutzen zu können, ist eine Verbauung in einer Vorrichtung notwendig. Dabei wird das zu trennende Fluid (Feed) in einen Konzentrat-Strom (Retentat) und einen Filtrat-Strom (Permeat) aufgeteilt (Abbildung 4). Solch eine Vorrichtung wird auch als Membranmodul bezeichnet. Dabei sollte dieses Modul folgenden Anforderungen entsprechen [1]:

- möglichst großen Membranfläche pro Volumen (Packungsdichte)
- gleichmäßige Überströmung der Membran
- geringe Druckverluste
- kostengünstige Fertigung
- gute Reinigungsmöglichkeit

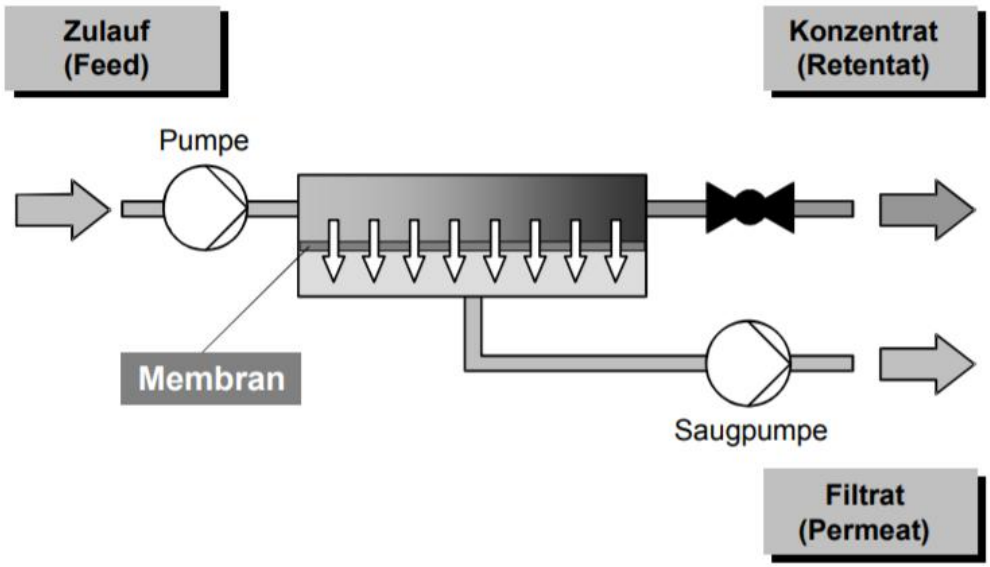


Abbildung 4: *Prinzipieller Aufbau eines Membranmoduls [1]*

Darüber hinaus wird zwischen zwei Membranarten bezogen auf den geometrischen Aufbau unterschieden [1]:

- Flachmembranen: Plattenmodul, Kissenmodul und Wickelmodul
- Schlauchmembranen: Rohrmodul, Kapillarmodul bzw. Hohlfasermodul

Die Anwendungsgebiete von Membranen sind vielfältig, die in Tabelle 1 nach Membranprozess, Membrantyp sowie Größe der permeierenden Partikel dargestellt werden:

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

Tabelle 1: *Zusammenstellung von heute genutzten Membranprozessen [1], [2]*

Membranprozess	Membrantyp	Permeierende Partikelgröße	Anwendungsgebiete
Umkehrosmose	Lösungsdiffusions-Membran	$< 1\ \mathrm{nm}$	• Aufkonzentrierung von Lösungen • Trinkwasser durch Meereswasser-Entsalzung • Abwasseraufbereitung
Nanofiltration	Lösungsdiffusions-Membran	$< 1\ \mathrm{nm}$	• Fraktionierung von gelösten Stoffen in wässriger Lösung
Dialyse	Lösungsdiffusions-Membran	$< 1\ \mathrm{nm}$	• Blutentgiftung • Alkoholreduzierung von Bier
Ultrafiltration	Poren-Membran	$< 0{,}1\ \mu\mathrm{m}$	• Lebensmittelindustrie • Klärung von Getränken • Abwasserbehandlung
Mikrofiltration	Poren-Membran	$< 10\ \mu\mathrm{m}$	• Klärung und Konzentrierung in der Getränkeindustrie • Sterilfiltration • Rohstoffgewinnung in der Nahrungsmittelindustrie

1.2 Herstellung von Membranen mittels Phaseninversionverfahren

Für die Herstellung von Membranen kommt das sogenannte Phaseninversionsverfahren zur Anwendung. Dabei wird in einer ursprünglich homogenen Polymerlösung eine Phasentrennung herbeigeführt. Dies kann mittels thermisch induzierter Phasenseparation (TIPS-Verfahren) oder durch eine Nichtlösungsmittel induzierte Phasenseparation (NIPS-Verfahren) erfolgen. Diese Arbeit beschränkt sich auf das NIPS-Verfahren, da dieses aus wirtschaftlichen Gründen in der Industrie häufiger zur Anwendung kommt, wodurch weiters die nähere Beschreibung dieses Herstellungsverfahrens erfolgt. Beim NIPS-Verfahren kommt es durch den Kontakt der Polymerlösung mit einem Nichtlösungsmittel zum Austausch des Lösungsmittels durch das Nichtlösungsmittel. Daraus resultiert eine Phasentrennung in eine polymerreiche und polymerarme Phase. Aus der polymerreichen Phase entwickelt sich die Membranmatrix, wohingegen die polymerarme Phase die Poren bildet. Durch die Wahl des Lösungsmittels, der Konzentration und Viskosität der Polymerlösung sowie der Diffusionsgeschwindigkeit des Nichtlösungsmittels, lässt sich unter anderem die Porenstruktur von Polymermembranen beeinflussen [6], [7]. Das NIPS-Verfahren kommt beispielsweise bei der Herstellung von Flachmembranen und Hohlfasermembranen zum Einsatz, die im Folgenden kurz erläuter werden [2]:

<u>Herstellung von Flachmembranen nach dem NIPS-Verfahren:</u>

Die Polymerlösung (1) wird auf einem sich bewegenden Fließband (2) aufgebracht und durch ein Behältnis (3), in dem sich das Fällbad (Nichtlösungsmittel) befindet, befördert. Der Kontakt zwischen Polymerlösung und Fällbad führt zu einer Phasenseparation, wodurch die Ausbildung der Membranstruktur erfolgt (Abbildung 5). Anschließend wird die Membran über diverse Nachbehandlungsverfahren (4) einer Wickeleinheit zugeführt [7].

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek WIEN Your knowledge hub

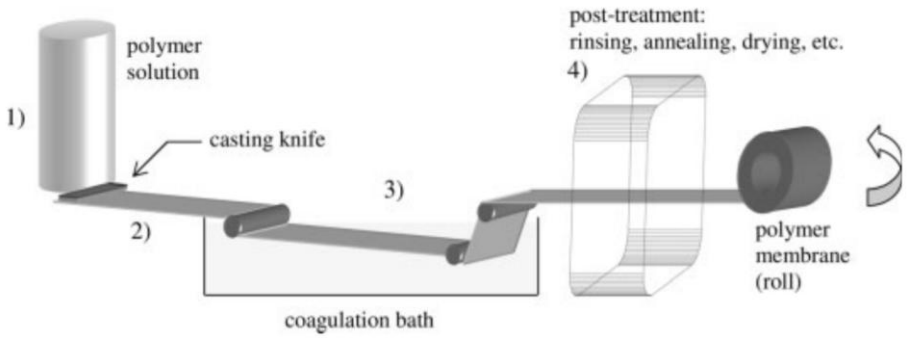


Abbildung 5: *Herstellung von Flachmembranen mittels NIPS-Verfahren [7]*

<u>Herstellung von Hohlfasermembranen nach dem NIPS-Verfahren:</u>

Die Herstellung von Hohlfasermembranen erfolgt mit einer Spinndüse nach dem NIPS-Verfahren in Form eines Nassspinnprozesses (Abbildung 6). Der Spinndüse wird eine Polymerlösung (Polymer + Lösungsmittel, gelb) sowie ein Zentralfluid (blau), welches mehrheitlich aus Nichtlösungsmittel (Wasser) besteht, über Pumpen der Spinndüse zugeführt. Diese gelangen unter räumlicher Trennung zur Öffnung der Spinndüse. Eine in der Düsenöffnung konzentrisch platzierte Hohlnadel speist dabei das Zentralfluid in den ausströmenden Polymerstrahl ein. Der Kontakt des Nichtlösungsmittels im Zentralfluid, welches auch häufig als Borefluid bezeichnet wird, mit dem Lösungsmittel der Polymerlösung induziert eine Phasenseparation. Diese führt zur Ausbildung der Membranstruktur, wodurch mithilfe des Zentralfluids die Aufrechterhaltung eines Faserhohlraumes während des Extrusionsprozesses realisierbar ist. Anschließendes Eindüsen der Faser in ein Fällbad, welches ebenfalls das Nichtlösungsmittel (Wasser) enthält, führt zur vollständigen Koagulation des Polymers. Umlenkrollen führen die Faser über diverse Nachbehandlungsverfahren (Waschbäder und Trockner) einer Wickeleinheit zu, wovon die Entnahme der fertigen Faser erfolgt [7]–[9].

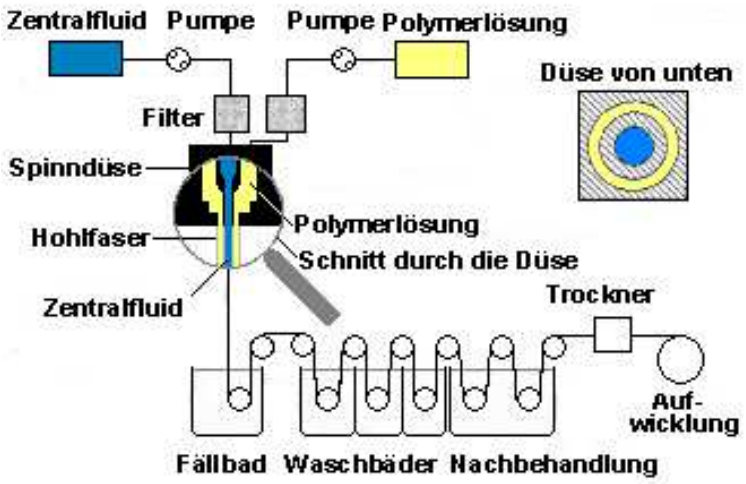


Abbildung 6: *Aufbau einer Nassspinnanlage zur Herstellung von Hohlfasermembranen mittels NIPS [2]*

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

2. Aufgabenstellung und Aufbau der Arbeit

Vorgabe für die hier abgehandelte Diplomarbeit ist die Konstruktion und Herstellung einer Spinndüse zur Erzeugung von Hohlfasermembranen nach dem NIPS-Verfahren (siehe 1.2 Herstellungsverfahren). Diese sollen einen Außendurchmesser von 600 µm sowie einen Innendurchmesser von 400 µm aufweisen. Für die Herstellung kommen folgende Polymermaterialien zur Anwendung: Polyethersulfon (PES) und Polylactid (PLA). Die Düse soll für Reinigungszwecke zerlegbar und beständig gegenüber den Einwirkungen (Temperatur und Druck) sowie den zugeführten Medien (Poylmerlösung und Borefluid) sein. Da die Membranstruktur unter anderem von der Viskosität der Polymerlösung, welche über die Temperatur reguliert werden kann, abhängt [10], ist eine Beheizung des Düsenkörpers zur Steuerung der Viskosität vorzusehen. Darüber hinaus ist jeweils ein Anschluss zum Einspeisen des Borefluids sowie der Polymerlösung zu berücksichtigen.

Der Aufbau der Diplomarbeit wird dabei in folgende Punkte gegliedert:

1. <u>Auslegung:</u>
   Festlegung der Betriebsparameter (Viskosität und Temperatur der Polymerlösung sowie Durchflussraten des Polymer- und Borefluidstroms) und Düsengeometrie sowie deren Abmessungen (Außen- und Innendurchmesser sowie Länge des durchströmten Polymer-Kanals)

2. <u>Berechnung:</u>
   Nachweis der Festigkeit gegenüber den einwirkenden Belastungen (Druck, Scherkräfte und Temperatur)

3. <u>Fertigung und Assemblierung:</u>
   Zusammenbau der gefertigten Komponenten mit Überprüfung der Fertigungsgenauigkeit

4. <u>Versuchsdurchführung des Spinnprozesses:</u>
   Überprüfung der Düsenfunktionalität (Dichtheit und Faserproduktion) sowie Eruierung von Optimierungspotential

5. <u>Umsetzen der Optimierungsmaßnahmen:</u>
   Änderung der Konstruktion und Erzeugung eines neuen Düsenmodells

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

3. Grundlegende Arbeitsweise der Spinndüse nach dem NIPS-Verfahren

Wie bereits in Kapitel 1.2 erwähnt, wird der Spinndüse eine Polymerlösung (Polymer + Lösungsmittel) sowie ein Borefluid, wofür häufig Wasser als Nichtlösungsmittel dient [6], zugeführt (Abbildung 7). Die Polymerlösung fließt dabei über eine seitliche Bohrung im Gehäuse in eine Füllkammer, wohingegen das Borefluid in den Düsenzapfen eindringt und in eine darin befindliche Hohlnadel gelangt. Beide Stoffströme fließen somit unter räumlicher Trennung zur Öffnung de Düse. Die in der Düsenöffnung konzentrisch platzierte Hohlnadel düst das Borefluid in den ausströmenden Polymerstrahl ein (Abbildung 8,9). Der Kontakt des im Borefluid befindlichen Nichtlösungsmittels mit dem Lösungsmittel der Polymerlösung führt zu einer Phasenseparation, wodurch die Ausbildung eines Faserhohlraumes während des Extrusionsprozesses erfolgt. Anschließendes Eindüsen der Faser in ein Fällbad, das ebenfalls Wasser als Nichtlösungsmittel enthält, führt zur Ausbildung der gesamten Membranstruktur. Über Umlenkrollen wird die ausgerichtete Faser einer Wickeleinheit zugeführt, wovon die Entnahme der fertigen Faser erfolgt (Abbildung 10). Da die Viskosität der Polymerlösung einen entscheidenden Einfluss auf die Membranstruktur hat und diese über die Temperatur regulierbar ist, wurde im Gehäuse der Spinndüse eine Beheizung integriert. Dabei wird Heizwasser in einem externen Behältnis aufbereitet und anschließend dem im Gehäuse integrierten Heizwasser-Kanal zugeführt. Somit lässt sich eine Temperierung des Düsenkörpers zur Steuerung der Viskosität erzielen.

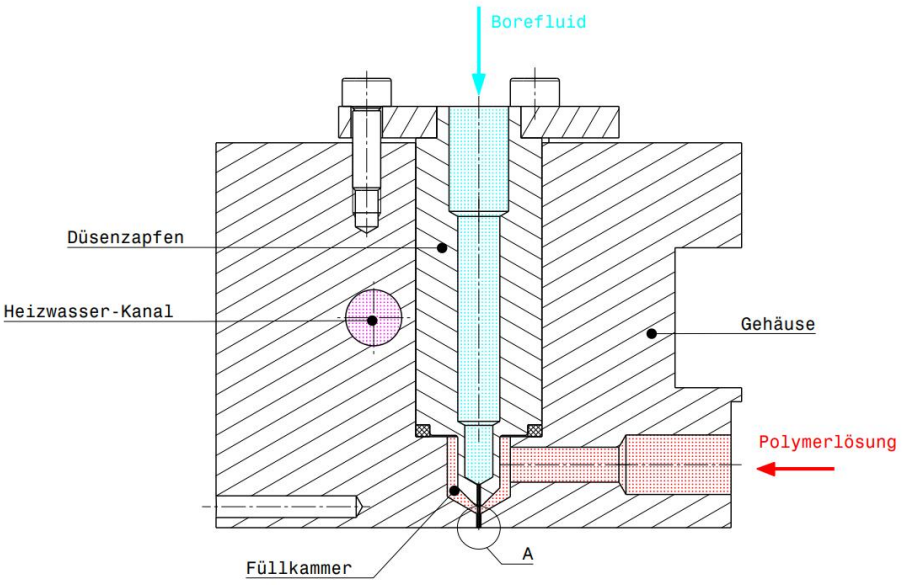


***Abbildung 7**: Gehäuse mit eingesetztem Düsenzapfen, Borefluid- und Polymerzufuhr sowie Heizwasserekanal zum Temperieren des Düsenkörpers*

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

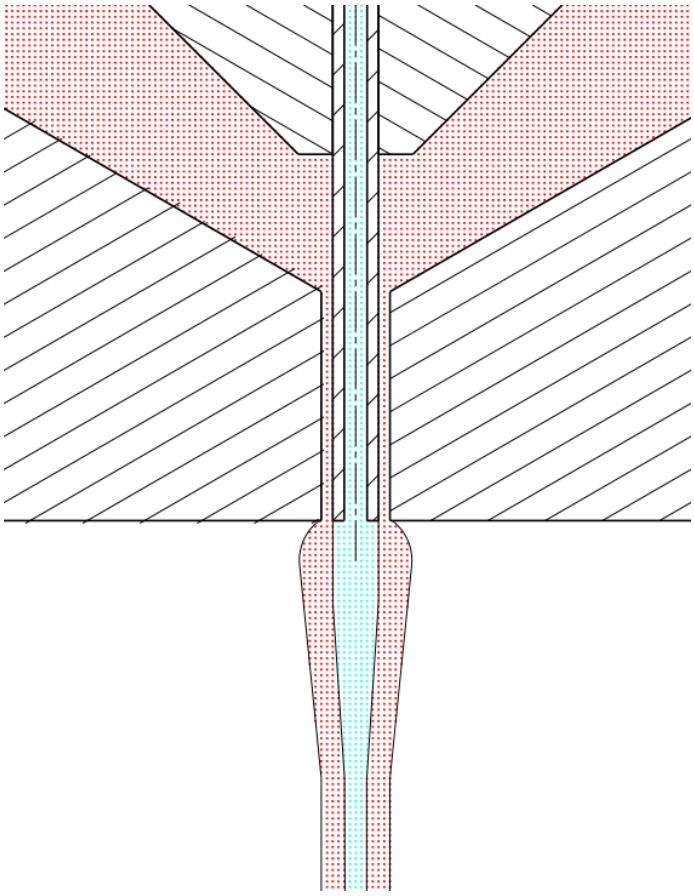


***Abbildung 8**: Detail A: Polymer- und Borefluidstrom beim Verlassen der Düsenöffnung mit zentrisch platzierter Hohlnadel (Quelle: In Anlehnung an [9])*

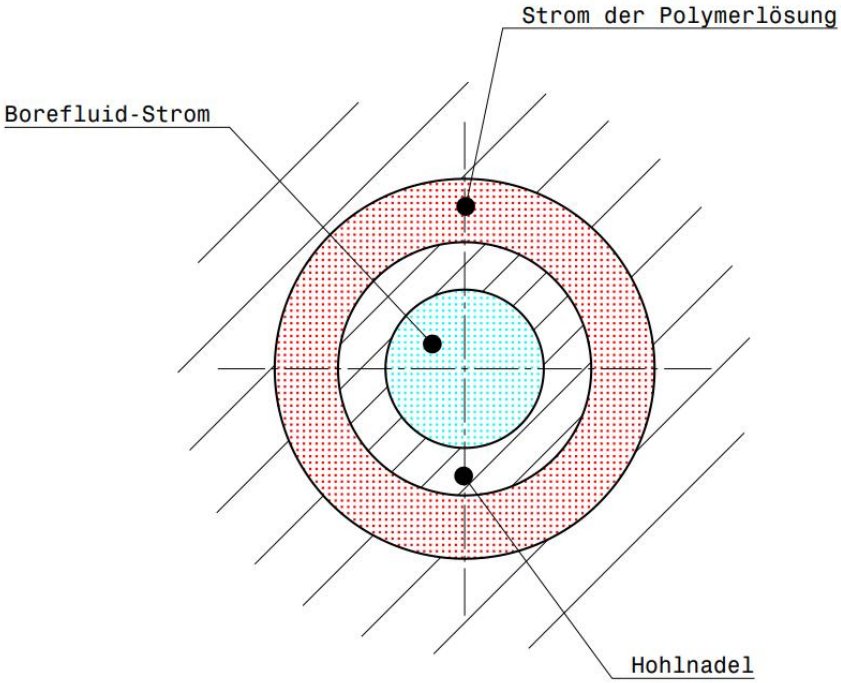


***Abbildung 9**: untere Ansicht der Düsenöffnung mit zentrisch platzierter Hohlnadel*

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek WIEN Your knowledge hub

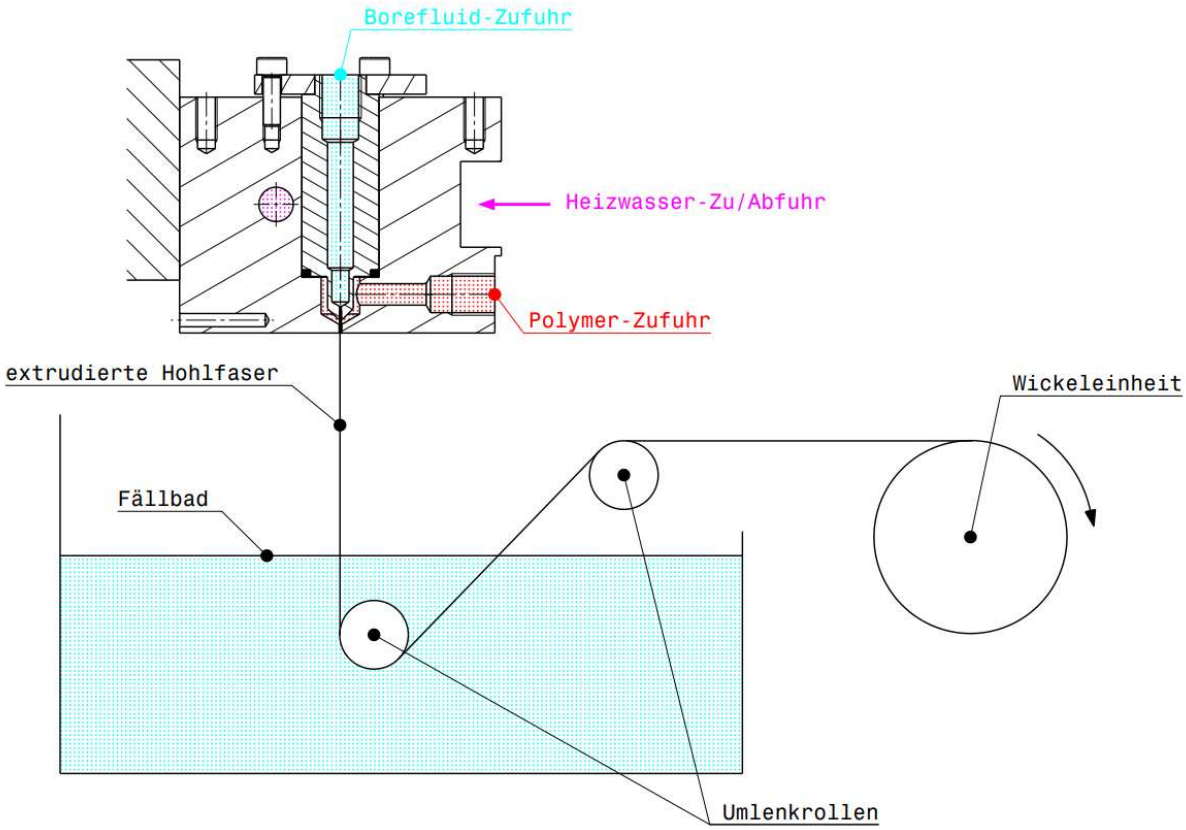


Abbildung 10: *Prinzipskizze des gesamten Herstellungsprozesses einer Hohlfasermembran nach dem NIPS-Verfahren*

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

4. Viskosität der Polymerlösung bei unterschiedlichen Temperaturen

Die Viskosität wurde mithilfe eines Rotationsviskosimeters mit koaxialem Zylinder (Messsystem - R 180, proRheo) für ein 20 w% PES/NMP-Gemisch durchgeführt. Damit wird das Verhalten der Polymerlösung bei unterschiedlichen Temperaturen ersichtlich. Für den Test erfolgte jeweils bei 25 °C, 50 °C und 75 °C eine Messung. Die dynamische Viskosität wird für die drei genannten Temperaturen über die Scherrate aufgetragen (Abbildung 11).

Aufgrund der hohen Viskosität bei 25 °C war ab einer Scherrate von $\omega = 20\ 1/s$ keine weiterführende Messung mehr möglich. Die weiteren Messungen zeigten eine starke Abnahme der Viskosität mit zunehmender Temperatur. Somit ist eine Viskositätsregulierung mithilfe einer Spinndüsen-Temperierung möglich. Ebenfalls ist aus den Messungen das für ein newtonsches Fluid unabhängige Verhalten gegenüber der Scherrate zu erkennen [11], womit die in Kapitel 5.2.1 durch Gleichung (5.34) getätigte Herleitung des Scherspannungsprofils für newtonsche Fluide zulässig ist.

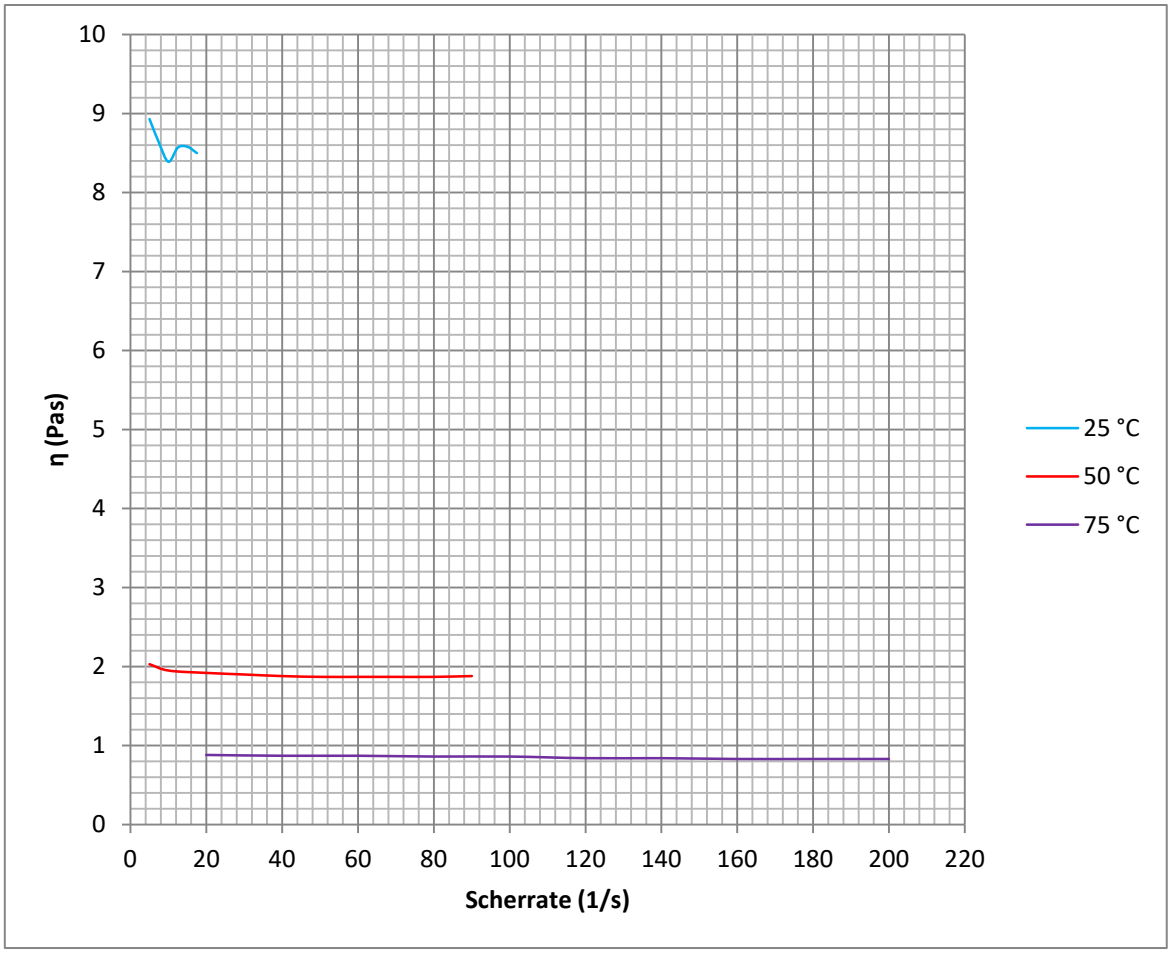


Abbildung 11: *Viskosität in Abhängigkeit der Scherrate eines 20 w% PES/NMP-Gemisches bei unterschiedlichen Temperaturen*

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

5. Rechnerische Auslegung einer Spinndüse

Die Spinndüse ist einerseits mechanischen Belastungen, bedingt durch den für die Extrusion benötigten Druck, und andererseits thermischen Belastungen, aufgrund der Spinndüsen-Temperierung, ausgesetzt. Die für einen sicheren Betrieb benötigten Festigkeitsanalysen werden im folgenden Kapitel 5.1 übersichtlich dargestellt.

5.1 Berechnungsübersicht

Im Folgenden wird eine detaillierte Auflistung aller an der Düse durchgeführten Berechnungen (Abbildung 12,13) erstellt:

- Berechnung des Druckverlustes im Polymer- und Borefluid-Kanal. Dieser dient zur Festlegung der Betriebsgrenze und zum Festigkeitsnachweis der Düse. Auch lässt sich aus der Herleitung des Druckverlustes die auf der Hohlnadel wirkenden Scherkräfte berechnen, um weitere Festigkeitskontrollen durchführen zu können (1).
- Festigkeitskontrolle der Fügestelle von Hohlnadel und Düsenzapfen mittels der zuvor ermittelten Scherkräfte sowie das Nachrechnen einer temperaturbedingten Aufweitung dieser Verbindung (2).
- Festigkeitsnachweis des Düsenzapfens im Bereich der Füllkammer, um Beständigkeit gegenüber dem einwirkenden Druck nachzuweisen (3).
- Festigkeitsnachweis der Füllkammer im Gehäuse, um Beständigkeit gegenüber dem einwirkenden Druck nachzuweisen (4).
- Ermittlung des notwendigen Schraubendurchmessers für den Befestigungsdeckel, um eine stabile Fixierung des Düsenzapfens im Gehäuse zu realisieren (5).

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

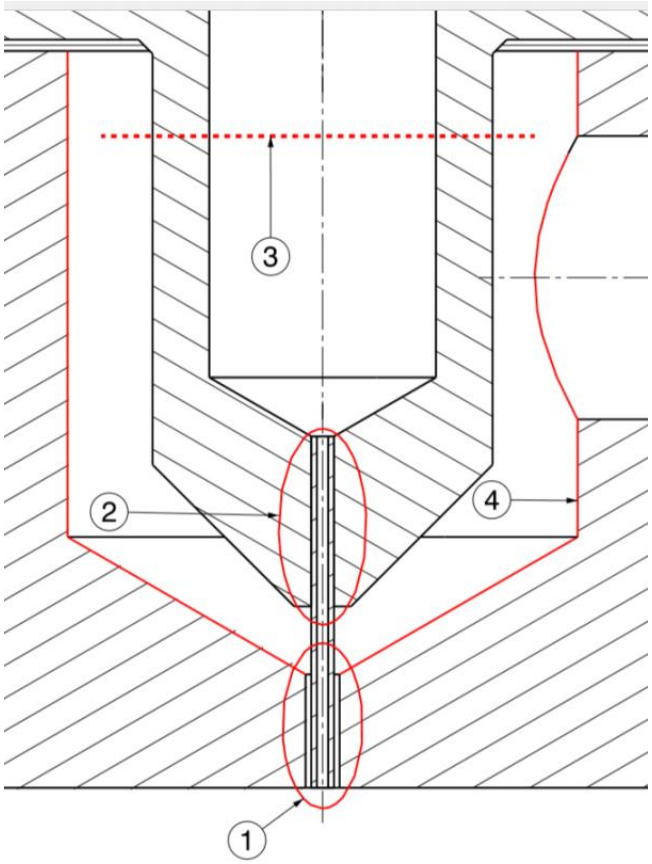


***Abbildung 12**: Berechnung der rot markierten Bereiche: (1) Berechnung des Druckverlustes und der Scherspannungen im Düsenaustritt, (2) Festigkeitsnachweis der Fügestelle von Hohlnadel und Düsenzapfen, (3) Festigkeitsnachweis des Düsenzapfens, (4) Festigkeitsnachweis der Füllkammer*

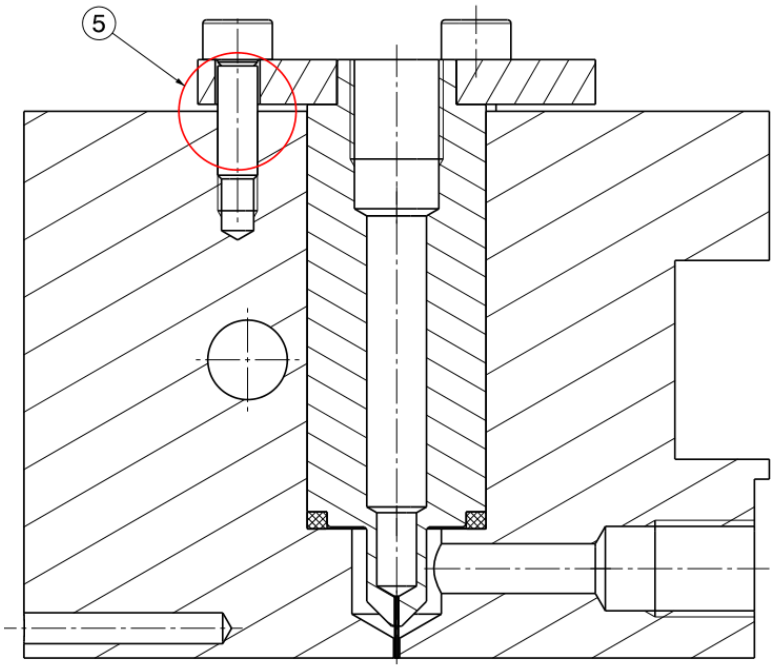


***Abbildung 13**: (5) Bestimmung des notwendigen Schraubendurchmessers*

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

5.2 Druckverlust und Scherspannungen im Düsenaustritt

Für die Auslegung der Spinndüse ist die Kenntnis des Druckverlustes und der angreifenden Scherspannungen im Düsenaustritt von Notwendigkeit. Somit erfolgt zuerst die Berechnung des Druckverlustes und der Scherspannung im Polymer-Kanal, gefolgt von der Berechnung des Druckverlustes und der Scherspannung im Borefluid-Kanal. Mit den jeweils eruierten Werten werden weitere Festigkeitsanalysen (Kapitel 5.3 bis 5.6) durchgeführt.

5.2.1 Druckverlust und Scherspannungen im Polymer-Kanal

Die Kenntnis des Druckverlustes im Polymer-Kanal, welcher ein Teildruck des Gesamtsystems (Spinndüse mit angeschlossener Polymer-Zuleitung) ist, wird für die Auslegung der Spinndüse herangezogen. Damit können die in der Düse wirkenden Kräfte ermittelt und für weitere Festigkeitsanalysen herangezogen werden.

Bevor der Druckverlust berechnet wird, müssen die Düsengeometrie sowie Betriebsparameter festgelegt werden. Wie bereits in der Aufgabenstellung erwähnt, soll die Hohlfaser einen Außendurchmesser von 600 µm und einen Innendurchmesser von 400 µm aufweisen, weshalb folgende geometrische Parameter für den ringförmigen Kanalquerschnitt gelten:

Außendurchmesser des Kanals : $D_a = 0{,}6\ \mathrm{mm}$

Innendurchmesser des Kanals (Hohlnadel-Außendurchmesser): $D_i = 0{,}4\ \mathrm{mm}$

Zur Bestimmung der durchströmten Kanallänge l wurde folgendes Verhältnis herangezogen [12]:

$$\frac{l}{D_a - D_i} \geq 10$$

Die gewählte Länge des Polymer-Kanals lautet somit: $l = (0{,}6 - 0{,}4)\ \mathrm{mm} \cdot 10 = 2\ \mathrm{mm}$

Für die Berechnung ist desweiteren die Angabe der Viskosität sowie der Durchflussrate der Polymerlösung erforderlich. Die ideale Viskosität gemessen bei einer Temperatur von 25 °C liegt im Bereich 8 – 15 Pa·s [13], [14]. Damit einerseits das Fließverhalten während des Spinndüsenbetriebs gewährleistet wird und andererseits durch Variation der Viskosität unterschiedliche Faserstrukturen entstehen, wird häufig eine Temperierung der Polymerlösung im Bereich 45 – 80 °C gewählt [15]. Zur Ermittlung des Druckverlustes sowie der Scherspannung im Polymer-Kanal wird jedoch die höhere Viskosität von 15 Pa·s bei 25 °C herangezogen, wodurch die Festlegung einer Betriebsgrenze erfolgt. Laut einem Versuchsprotokoll zur Erzeugung von Hohlfasermembranen [15] wurden Testversuche mit Durchflussraten der Polymerlösung von bis zu 2,4 ml/min durchgeführt. Werden diese Daten hier herangezogen, lassen sich folgende Betriebsparameter festlegen:

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

Volumenstrom der Polymerlösung: $Q_{p_{max}} = 2{,}4\ \frac{\mathrm{ml}}{\mathrm{min}} = 0{,}04 \cdot 10^{-6}\ \frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{s}}$

Maximal zulässige Viskosität der Polymerlösung bei 25 °C: $\mu = 15\ \mathrm{Pa} \cdot \mathrm{s}$

Für die Berechnung des Druckverlustes im Polymer-Kanal ist zuerst die Kenntnis des Geschwindigkeitsprofils vom Strom der Polymerlösung erforderlich (Abbildung 15). Um das Geschwindigkeitsprofil berechnen zu können, werden die Kontinuitätsgleichung sowie die Navier-Stokes Gleichungen in Zylinderkoordinaten herangezogen [16]. Durch folgende Annahmen ist eine vereinfachte Darstellung der Navier-Stokes Gleichungen zulässig [17]:

- Vernachlässigung der radialen Geschwindigkeitskomponente: $u_r = 0$
- Vernachlässigung der tangentialen Geschwindigkeitskomponente: $u_\vartheta = 0$
- Rotationssymmetrische Strömung: $\frac{d}{d\vartheta} = 0$
- Stationäre Strömung während des Spinndüsenbetriebs: $\frac{d}{dt} = 0$

Vor der Ermittlung des Geschwindigkeitsprofils erfolgt noch die Feststellung der Strömungsart im Polymer-Kanal. In der Strömungslehre unterscheidet man zwischen laminarer und turbulenter Strömung. Bei laminaren Rohrströmungen kann das Geschwindigkeitsfeld mit nur einer Komponente in axialer Richtung u_z beschrieben werden. Hingegen bei einer turbulenten Rohströmung ist eine komplexere Beschreibung des Geschwindigkeitsfeldes notwendig, da dieses in Raum und Zeit variiert [16]. Der Übergang von laminar auf turbulent wird durch die kritische Reynolds-Zahl beschrieben, die für Rohrströmungen folgenden Richtwert aufweist: $R_{\mathrm{e,krit}} = 2300$. Somit werden Strömungen mit einer Reynold-Zahl $R_{\mathrm{e}} < R_{\mathrm{e,krit}}$ als laminar und mit $R_{\mathrm{e}} > R_{\mathrm{e,krit}}$ als turbulent bezeichnet [18]. Die Reynolds-Zahl lässt sich nun folgendermaßen ermitteln:

Dichte der in Kapitel 4 gemessenen Polymerlösung: $\rho = 1100\ \frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3}$

Fläche des ringförmigen Kanalquerschnitts: $A = \frac{({D_a}^2 - {D_i}^2)\pi}{4} = 0{,}157\ \mathrm{mm}^2$

Mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Polymer-Kanal: $v_p = \frac{Q_{p_{max}}}{A} = 0{,}255\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$

Weiters ist die Kenntnis der charakteristischen Länge erforderlich. Diese wird mithilfe des hydraulischen Durchmessers für einen Kreisring bestimmt (Abbildung 14).

Mit der Definition des hydraulischen Durchmessers: $d_h = \frac{4 \cdot A}{U}$

, wobei A die durchströmte Querschnittsfläche und U der von der Flüssigkeit benetzte Umfang ist, ergibt sich für einen Kreisringquerschnitt folgender hydraulischer Durchmesser:

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

$$d_h = 4 \cdot \frac{\pi \cdot \frac{D^2 - d^2}{4}}{\pi \cdot (D + d)} = \frac{D^2 - d^2}{D + d} = \frac{(D - d) \cdot (D + d)}{(D + d)} = D - d$$

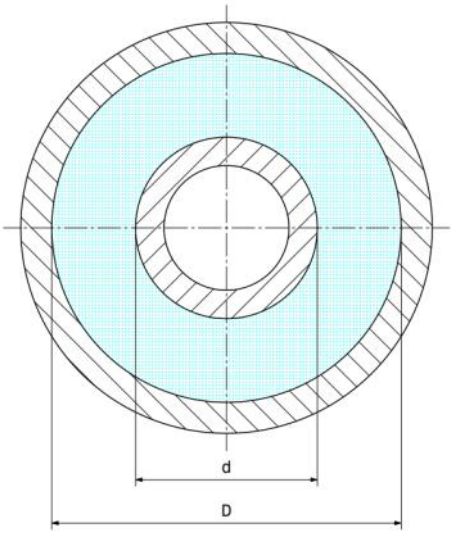


Abbildung 14: *Querschnittsfläche eines Kreisrings zur Herleitung des hydraulischen Durchmessers*

Daraus lässt sich mithilfe der vorhin festgelegten Geometrie des Polymer-Kanals folgender hydraulischer Durchmesser angeben: $d_h = D_a - D_i = 0{,}2\ \mathrm{mm}$

Zur Sicherstellung, dass keine turbulente Strömung im Polymer-Kanal vorliegt, wird hier der niedrigere Viskositätsbereich der Polymerlösung bevorzugt, um eine möglichst große Reynolds-Zahl zu generieren. Aus den in Kapitel 4 durchgeführten Messungen wird somit eine Viskosität 0,9 Pa·s bei 75 °C von entnommen. Aus den vorher ermittelten Parametern folgt:

$$Re = \frac{\rho \cdot v_p \cdot d_h}{\mu_{75}} = \mathbf{0{,}062} \ll 1 \tag{5.1}$$

Die hohe Viskosität, die geringe charakteristische Länge sowie eine niedrige Strömungsgeschwindigkeit lassen die Reynolds-Zahl gegen null gehen, womit der Fall einer laminaren Strömung vorliegt ($R_e < R_{e,krit}$). Strömungen mit $Re \ll 1$ werden auch als schleichende Strömung bezeichnet [16]. Die Beschreibung eines ebenen Geschwindigkeitsfeldes für laminare Rohrströmungen ist somit zulässig.

Bei der nun folgenden Berechnung des Druckverlustes wird der Anteil des Schweredrucks, aufgrund der kurzen Kanallänge, vernachlässigt:

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

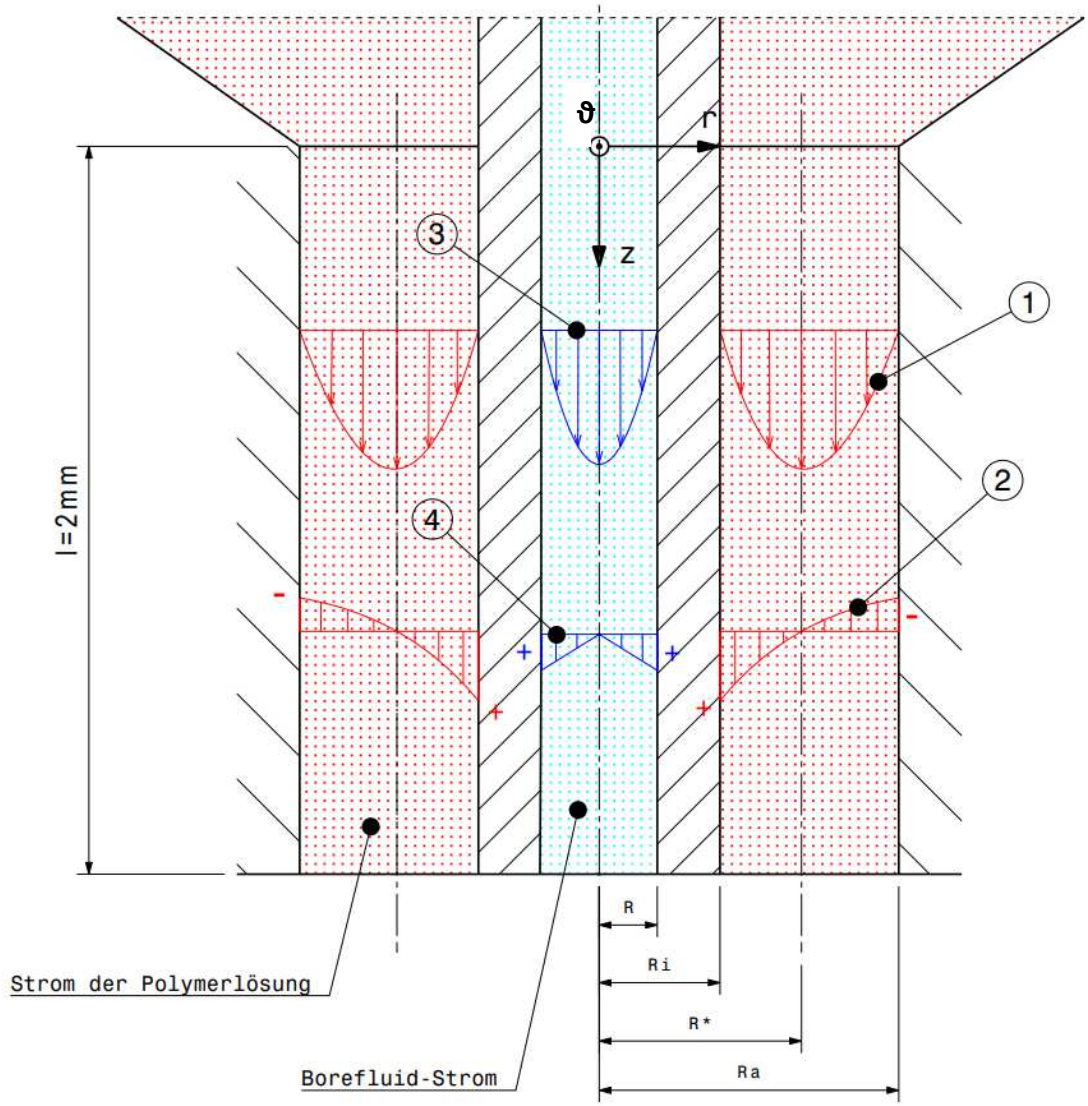


***Abbildung 15**:Prinzipskizze der Geschwindigkeits- und Scherspannungsprofile im Düsenaustritt mit R=0,125mm, Ri=0,2mm und Ra=0,3mm; (1) Geschwindigkeitsprofil des Stroms der Polymerlösung, (2) Scherspannungsprofil des Stroms der Polymerlösung, (3) Geschwindigkeitsprofil des Borefluid-Stroms, (4) Scherspannungsprofil des Borefluid-Stroms (Quelle: In Anlehnung an [17], [19])*

Für die Massenerhaltung in einem substantiellen Volumen wird zuerst die Kontinuitätsgleichung herangezogen [16]:

$$\frac{d\rho}{dt} + \frac{1}{r} \cdot \frac{d}{dr}(\rho \cdot r \cdot u_r) + \frac{1}{r} \cdot \frac{d(\rho \cdot u_\vartheta)}{d\vartheta} + \frac{d(\rho \cdot u_z)}{dz} = 0 \tag{5.2}$$

Im Fall eines inkompressiblen Fluids mit konstanter Dichte ρ ist folgende Vereinfachung der Kontinuitätsgleichung zulässig [16]:

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

$$\frac{1}{r}\cdot\frac{d}{dr}(r\cdot u_r)+\frac{1}{r}\cdot\frac{du_\vartheta}{d\vartheta}+\frac{du_z}{dz}=0 \tag{5.3}$$

- aus $u_r = 0$ und $u_\vartheta = 0$ in (5.3) eingesetzt folgt:

$$\frac{du_z}{dz}=0 \tag{5.4}$$

Mit den vorhin getroffenen Annahmen können nun die Navier-Stokes Gleichungen vereinfacht dargestellt werden:

<u>Navier-Stokes in r-Richtung:</u>

- mit $u_r = 0$, $u_\vartheta = 0$ und $\frac{d}{dt} = 0$ folgt:

$$\frac{dp}{dr}=0 \tag{5.5}$$

<u>Navier-Stokes in ϑ-Richtung:</u>

- mit $u_r = 0$, $u_\vartheta = 0$ und $\frac{d}{dt} = 0$ folgt:

$$\frac{dp}{d\vartheta}=0 \tag{5.6}$$

Aus (5.5) und (5.6) ergibt sich eine reine Druckabhängigkeit in z-Richtung: $p_{(z)}$.

<u>Navier-Stokes in z-Richtung:</u>

- mit $u_r = 0$, $u_\vartheta = 0$, $\frac{d}{d\vartheta} = 0$, $\frac{d}{dt} = 0$ und (5.4) folgt:

$$-\frac{dp}{dz}+\mu\cdot\frac{1}{r}\cdot\frac{d}{dr}\left(r\cdot\frac{du_z}{dr}\right)=0 \tag{5.7}$$

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek WIEN Your knowledge hub

$$\frac{dp}{dz} = \mu \cdot \frac{1}{r} \cdot \frac{d}{dr}\left(r \cdot \frac{du_z}{dr}\right) \tag{5.8}$$

$$\frac{1}{\mu}\frac{dp}{dz}\int rdr = \int d\left(r \cdot \frac{du_z}{dr}\right) \tag{5.9}$$

$$\frac{1}{\mu}\frac{dp}{dz} \cdot \frac{r^2}{2} + C_1 = r \cdot \frac{du_z}{dr} \tag{5.10}$$

$$\int \frac{1}{\mu}\frac{dp}{dz} \cdot \frac{r}{2} + \frac{C_1}{r}\, dr = \int du_z \tag{5.11}$$

$$u_{z(r)} = \frac{1}{\mu}\frac{dp}{dz} \cdot \frac{r^2}{4} + C_1 \cdot lnr + C_2 \tag{5.12}$$

Mit folgenenden Randbedingungen, welche sich aus der Haftbedingung an der Oberfläche der Hohlnadel und Düsenbohrung ergeben, können die in (5.12) enthaltenen Integrationskonstanten C1 und C2 berechnet werden [17]:

- $u_z(R_i) = 0$
- $u_z(R_a) = 0$

$$u_z(R_i) = \frac{1}{\mu}\frac{dp}{dz} \cdot \frac{{R_i}^2}{4} + C_1 \cdot lnR_i + C_2 = 0 \tag{5.13}$$

$$C_2 = -\frac{1}{\mu}\frac{dp}{dz} \cdot \frac{{R_i}^2}{4} - C_1 \cdot lnR_i \tag{5.14}$$

$$u_z(R_a) = \frac{1}{\mu}\frac{dp}{dz} \cdot \frac{{R_a}^2}{4} + C_1 \cdot lnR_a + C_2 = 0 \tag{5.15}$$

$$C_2 = -\frac{1}{\mu}\frac{dp}{dz} \cdot \frac{{R_a}^2}{4} - C_1 \cdot lnR_a \tag{5.16}$$

Gleichsetzen von (5.14) und (5.16) ermöglicht die Eruierung der Konstante C1:

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

$$-\frac{1}{\mu}\frac{dp}{dz}\cdot\frac{{R_i}^2}{4}-C_1\cdot lnR_i=-\frac{1}{\mu}\frac{dp}{dz}\cdot\frac{{R_a}^2}{4}-C_1\cdot lnR_a \tag{5.17}$$

$$C_1\cdot(\,lnR_a-\,lnR_i)=-\frac{1}{\mu}\frac{dp}{dz}\cdot\frac{1}{4}\left({R_a}^2-{R_i}^2\right) \tag{5.18}$$

$$C_1\cdot\ln\frac{R_a}{R_i}=-\frac{1}{\mu}\frac{dp}{dz}\cdot\frac{1}{4}\left({R_a}^2-{R_i}^2\right) \tag{5.19}$$

$$C_1=\frac{-\frac{1}{\mu}\frac{dp}{dz}\cdot\frac{1}{4}\left({R_a}^2-{R_i}^2\right)}{\ln\frac{R_a}{R_i}} \tag{5.20}$$

Mit Einsetzen von (5.20) in (5.16) kann weiters die Konstante C2 ermittelt werden:

$$C_2=-\frac{1}{\mu}\frac{dp}{dz}\cdot\frac{{R_a}^2}{4}+\frac{\frac{1}{\mu}\frac{dp}{dz}\cdot\frac{1}{4}\left({R_a}^2-{R_i}^2\right)}{\ln\frac{R_a}{R_i}}\cdot lnR_a \tag{5.21}$$

Durch Kenntnis der beiden Integrationskonstanten (5.20 und 5.21) kann nun das Geschwindigkeitsprofil (5.12) vollständig angegeben werden:

$$u_z=\frac{1}{\mu}\frac{dp}{dz}\cdot\frac{r^2}{4}-\frac{\frac{1}{\mu}\frac{dp}{dz}\cdot\frac{1}{4}\left({R_a}^2-{R_i}^2\right)}{\ln\frac{R_a}{R_i}}\cdot lnr \tag{5.22}$$

$$-\frac{1}{\mu}\frac{dp}{dz}\cdot\frac{{R_a}^2}{4}+\frac{\frac{1}{\mu}\frac{dp}{dz}\cdot\frac{1}{4}\left({R_a}^2-{R_i}^2\right)}{\ln\frac{R_a}{R_i}}\cdot lnR_a$$

$$u_z(r)=\frac{1}{\mu}\frac{dp}{dz}\cdot\frac{r^2}{4}+\frac{1}{\mu}\frac{dp}{dz}\cdot\frac{1}{4}\cdot\frac{\left({R_a}^2-{R_i}^2\right)}{\ln\frac{R_a}{R_i}}\cdot ln\frac{R_a}{r}-\frac{1}{\mu}\frac{dp}{dz}\cdot\frac{{R_a}^2}{4} \tag{5.23}$$

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

$$u_z(r) = \frac{1}{4\mu}\frac{dp}{dz} \cdot \left[r^2 + \frac{\left({R_a}^2 - {R_i}^2\right)}{\ln\frac{R_a}{R_i}} \cdot ln\frac{R_a}{r} - {R_a}^2 \right] \tag{5.24}$$

Nach Einfügen der Integrationskonstanten und einer Umformung lautet das Geschwindigkeitsprofil des Polymer-Stroms:

$$\boldsymbol{u_z(r) = -\frac{1}{4\mu}\frac{dp}{dz} \cdot \left[{R_a}^2 - r^2 + \frac{\left({R_a}^2 - {R_i}^2\right)}{\ln\frac{R_a}{R_i}} \cdot ln\frac{r}{R_a} \right]} \tag{5.25}$$

Mittels des zuvor ermittelten Geschwindigkeitsprofils (5.25) und durch Vorgabe eines Volumenstroms $Q_{p_{max}}$, welcher den Auslegungsdaten entnommen wird, kann im Polymer-Kanal der Druckverlust dargestellt werden.

$$Q_{p_{max}} = \int_0^{2\pi} \int_{R_i}^{R_a} u_z(r)\, r d\vartheta dr \tag{5.26}$$

$$Q_{p_{max}} = -2\pi \cdot \frac{1}{4\mu}\frac{dp}{dz} \cdot \int_{R_i}^{R_a} \left[{R_a}^2 - r^2 + \frac{\left({R_a}^2 - {R_i}^2\right)}{\ln\frac{R_a}{R_i}} \cdot ln\frac{r}{R_a} \right] r dr \tag{5.27}$$

$$Q_{p_{max}} = -\frac{\pi}{8\mu}\frac{dp}{dz} \cdot \left({R_a}^2 - {R_i}^2\right) \cdot \left[{R_i}^2 + {R_a}^2 - \frac{\left({R_a}^2 - {R_i}^2\right)}{\ln\frac{R_a}{R_i}} \right] \tag{5.28}$$

Durch Umformen ergibt sich nun folgender Druckgradient:

$$\frac{dp}{dz} = -\frac{8\mu Q_{p_{max}}}{\pi\left({R_a}^2 - {R_i}^2\right) \cdot \left[{R_i}^2 + {R_a}^2 - \frac{\left({R_a}^2 - {R_i}^2\right)}{\ln\frac{R_a}{R_i}} \right]} = -k = \text{const.} \tag{5.29}$$

Die weitere Integration liefert letztendlich den Druckverlust im Polymer-Kanal:

$$\int_{p_1}^{p_2} dp = -k \cdot \int_0^l dz \tag{5.30}$$

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

$$p_2 - p_1 = -k \cdot l \tag{5.31}$$

Nach Umformen ergibt sich ein Druckverlust von:

$$p_1 - p_2 = k \cdot l \tag{5.32}$$

Durch Einsetzen der Auslegungsdaten in (5.29) folgt: $k = 4{,}571 \cdot 10^6 \frac{\mathrm{Pa}}{\mathrm{mm}}$. Mit einer Kanallänge von $l = 2\ \mathrm{mm}$ ergibt sich folgender Druckverlust im Polymer-Kanal (Abbildung 16):

$$\Delta p_{12} = \mathbf{91{,}42\ bar}$$

Weitere Berechnungen werden mit einem aufgerundeten Wert des Druckverlustes von $\Delta p_{12} = 92\ \mathrm{bar}$ durchgeführt, welcher aufgrund der angenommenen zulässigen Viskosität ($\mu = 15\ \mathrm{Pa} \cdot \mathrm{s}$), eine Betriebsgrenze der Spinndüse darstellt. Darüber hinaus lässt sich nun der Betriebsdruck p_1 in der Füllkammer ermitteln. Durch Gleichsetzen des Druckes am Düsenaustritt p_2 mit dem Umgebungsdruck p_0 (ca. 1 bar [16]) ergibt sich folgender Füllkammerdruck:

$$p_1 = p_0 + k \cdot l = \mathbf{93\ bar} \tag{5.33}$$

Der Füllkammerdruck dient als Eingangsgröße für die in den Kapiteln 5.4 bis 5.6 durchgeführten Festigkeitsanalysen. Die weiteren Druckverluste im Ringspalt der Füllkammer (Leerraum zwischen Düsenzapfen und Gehäuse) sowie der Zufuhrbohrung der Polymerlösung werden aufgrund ihrer minimalen Größe ($\ll 1\ \mathrm{bar}$) vernachlässigt, womit der Druckverlust Δp_{12} im Polymer-Kanal den relevanteren Einfluss auf die Auslegung der Spinndüse hat.

Aus dem zuvor eruierten Geschwindigkeitsprofil (5.25) können schlussendlich die an der Oberfläche der Hohlnadel wirkende Scherspannung sowie die resultierende Scherkraft ermittelt werden (Abbildung 16). Mithilfe der Ableitung von (5.25) und der dynamischen Viskosität der Polymerlösung ergibt sich für ein newtonsches Fluid folgendes Scherspannungsprofil [16]:

$$\tau_{rz} = \mu \frac{d_{u_z}}{dr} \tag{5.34}$$

$$\tau_{rz} = -\frac{1}{4}\frac{dp}{dz} \cdot \left(-2r + \frac{\left({R_a}^2 - {R_i}^2\right)}{\ln \frac{R_a}{R_i}} \cdot \frac{1}{r} \right) \tag{5.35}$$

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek WIEN Your knowledge hub

Mit $\frac{dp}{dz} = -k$ aus (5.29) und dem Außenradius der Hohlnadel R_i in (5.35) eingesetzt lässt sich nun die vom Polymer-Strom hervorgerufene Scherspannung auf der Nadeloberfläche berechnen:

$$\tau_P = \tau_{rz}(R_i) = \frac{k}{4} \cdot \left(-2R_i + \frac{\left({R_a}^2 - {R_i}^2\right)}{\ln \frac{R_a}{R_i}} \cdot \frac{1}{R_i} \right) = \mathbf{0,248\ \frac{N}{mm^2}} \tag{5.36}$$

Mit der Oberfläche des Nadelmantels O_N und der zuvor berechneten Scherspannung τ_P kann die auf der Nadeloberfläche wirkende Scherkraft F_τ folgendermaßen berechnet werden (Abbildung 16):

$$F_\tau = O_N \cdot \tau_P = D_i \cdot \pi \cdot l \cdot \tau_P = \mathbf{0,623\ N} \tag{5.37}$$

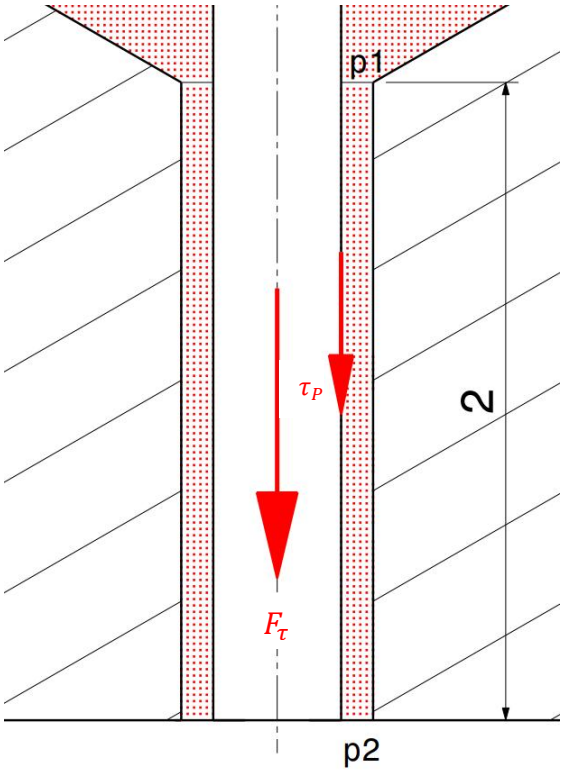


***Abbildung 16**: Druckverlust Δp_{12} im Polymer-Kanal, Scherspannung τ_P sowie resultierende Scherkraft F_τ auf der Nadeloberfläche*

Die Kenntnis der Scherkraft F_τ bildet die Grundlage zur Festigkeitsüberprüfung der Verbindung von Hohlnadel und Düsenzapfen (Kapitel 5.3).

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

5.2.2 Druckverlust und Scherspannung im Borefluid-Kanal

Zur Bestimmung des Druckverlustes im Borefluid-Kanal wird die in Kapitel 5.2.1 ermittelte Gleichung (5.12) herangezogen, wobei im Vergleich zum Polymer-Kanal andere Randbedingungen zur Ermittlung der unbekannten Konstanten C1 und C2 gelten. Mit dem Innendurchmesser R der Hohlnadel folgt [17]:

- $u_{z(r=R)} = 0$
- $\frac{du_z}{d_r}_{(r=0)} = 0$

Mithilfe von Gleichung (5.12) folgt:

$$C_1 = 0 \tag{5.38}$$

$$C_2 = -\frac{1}{4\mu} \cdot \frac{dp}{dz} \cdot R^2 \tag{5.39}$$

Nun lässt sich folgendes Geschwindigkeitsprofil im Borefluid-Kanal angeben:

$$\boldsymbol{u_{z(r)} = \frac{1}{4\mu} \cdot \frac{dp}{dz} \cdot (r^2 - R^2)} \tag{5.40}$$

Durch Integration des Geschwindigkeitsprofils über die Querschnittsfläche des Kanals ergibt sich folgender Volumenstrom:

$$Q_B = \int_0^R \int_0^{2\pi} u_z \, r d\vartheta dr \tag{5.41}$$

$$Q_B = -\frac{\pi}{8\mu} \cdot \frac{dp}{dz} \cdot R^4 \tag{5.42}$$

Der ermittelte Volumenstrom entspricht dem Gesetz von Hagen-Poiseuille.

Mit Kenntnis des Volumenstroms und einer weiteren Integration, kann nun die Berechnung des Druckverlustes im Borefluid-Kanal erfolgen:

$$\int_{p_1}^{p_2} dp = -\frac{8\mu Q_B}{R^4 \pi} \cdot \int_0^l dz \tag{5.43}$$

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

$$\Delta p_{12} = p_1 - p_2 = \frac{8\mu Q_B l}{R^4 \pi} \tag{5.44}$$

Aus der Ableitung des Geschwindigkeitsprofils (5.40) und der dynamischen Viskosität des Borefluids lässt sich nun die vom Borefluid-Strom hervorgerufene Scherspannung angeben:

$$\tau_{rz} = \mu \frac{d_{u_z}}{dr} = -\frac{4\mu r Q_B}{R^4 \pi} \tag{5.45}$$

$$\tau_B = \left|\tau_{rz(\boldsymbol{r=R})}\right| = \left|-\frac{4\mu Q_B}{R^3 \pi}\right| \tag{5.46}$$

Mit folgenden Daten lässt sich der Druckverlust (5.44) und die Scherspannung (5.46) im Borefluid-Kanal ermitteln (Abbildung 17):

Viskosität des Borefluids (Wasser) bei 25 °C [20]: $\mu = 917{,}5 \cdot 10^{-6}\ \mathrm{Pa \cdot s}$

Laut Versuchsprotokoll zur Herstellung von Hohlfasermembranen [15] wurde folgende Durchflussrate des Borefluids gewählt: $Q_B = 50\ \frac{\mathrm{ml}}{\mathrm{h}} = 0{,}833\ \frac{\mathrm{ml}}{\mathrm{min}}$

Innendurchmesser der Hohlnadel: $R = 0{,}125\ \mathrm{mm}$

Die ungefähre Länge der Hohlnadel liegt im Bereich 6 – 10 mm, für die Auslegung wird jedoch die maximale Länge herangezogen: $l = 10\ \mathrm{mm}$

Druckverlust im Borefluid-Kanal: $\Delta p_{12} = \mathbf{0{,}013\ bar}$

Resultierende Scherspannung im Borefluid-Kanal: $\tau_B = \mathbf{8{,}304 \cdot 10^{-6}\ \frac{N}{mm^2}}$

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek WIEN Your knowledge hub

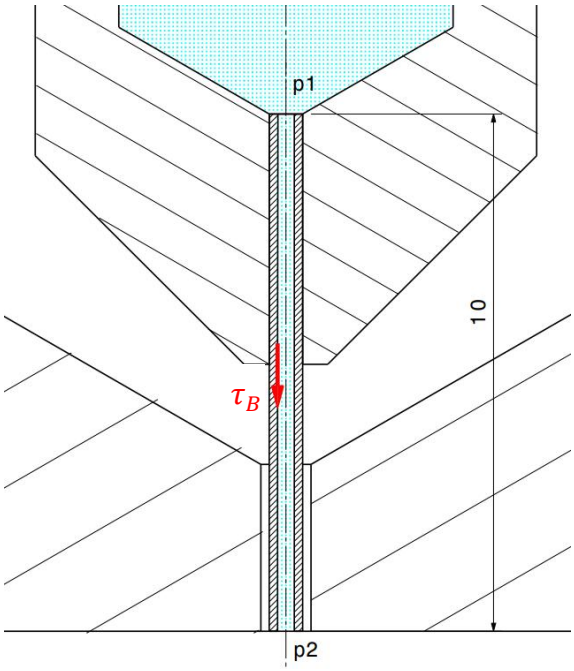


Abbildung 17: *Druckverlust Δp_{12} und Scherspannung τ_B im Borefluid-Kanal*

Aufgrund der geringen Viskosität des Borefluids sowie einer niedrigen Durchflussrate ergeben sich sehr kleine Werte für den Druckverlust und der Scherspannung, wodurch deren Einflüsse für weitere Festigkeitsanalysen zu vernachlässigen sind.

Damit im Borefluid-Kanal eine turbulente Strömung auszuschließen ist, wird ebenfalls mithilfe der Reynolds-Zahl die Strömungsart bestimmt. Auch hier wird der niedrigere Viskositätsbereich des Borefluids bei 75 °C herangezogen, um eine möglichst große Reynolds-Zahl zu generieren. Die Berechnung der Reynolds-Zahl lautet:

Charakteristische Länge (=Innendurchmesser der Hohlnadel): $D = 0{,}25\ \mathrm{mm}$

Durchströmte Querschnittsfläche im Borefluid-Kanal: $A = \frac{\mathrm{D}\cdot\pi^2}{4} = 0{,}0491\ \mathrm{mm}^2$

Mittlere Strömungsgeschwindigkeit des Borefluids: $v_B = \frac{Q_B}{A} = 0{,}283\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$

Viskosität des Borefluids (Wasser) bei 75 °C [20]: $\mu_{75} = 387 \cdot 10^{-6}\ \mathrm{Pa} \cdot \mathrm{s}$

Dichte des Borefluids (Wasser) bei 75 °C [20]: $\rho_{75} = 974{,}8\ \frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3}$

Reynoldszahl:

$$R_e = \frac{\rho_{75} \cdot D \cdot v_B}{\mu_{75}} = \mathbf{178{,}21} < 2300 \tag{5.47}$$

Der ermittelte Wert weist auf laminare Strömungsverhältnisse im Borefluid-Kanal hin, womit das vorhin beschriebene Geschwindigkeitsprofil (5.40) für eine laminare Strömung zulässig ist.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

5.3 Festigkeitsnachweis der Verbindung von Hohlnadel und Düsenzapfen

Da die Hohlnadel im Düsenzapfen verklebt ist, muss die Scherbeanspruchung der Klebestelle überprüft werden (Abbildung 18):

Gewählte Länge der verklebten Kontaktfläche zwischen Hohlnadel und Düsenzapfen: $l = 3\ \mathrm{mm}$

Fügedurchmesser (=Außendurchmesser der Hohlnadel): $d = 0{,}4\ \mathrm{mm}$.

Druckscherfestigkeit des verwendeten Klebers (Loctite 638, Firma Henkel) für Wellen-Naben Verbindungen aus Stahl (siehe Anhang): $\tau_{min} = 25\,\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{mm}^2}$

Da hier eine Verklebung zwischen Aluminium (Düsenzapfen) und rostfreiem Chrom-Nickel Stahl (Hohlnadel) vorliegt, wird für die Berechnung der Klebekraft eine reduzierte Druckscherfestigkeit von $\tau^* = \frac{\tau_{min}}{2} = 12{,}5\ \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{mm}^2}$ angenommen.

Die resultierende Klebekraft entspricht somit: $F_K = \tau^* \cdot d \cdot \pi \cdot l = \mathbf{47{,}13\ N}$.

Daraus lässt sich ableiten, dass die Beanspruchung der vom Polymer-Strom hervorgerufenen Scherkraft F_τ auf die Nadeloberfläche (Kapitel 5.2.1) weit unterhalb der Festigkeitsgrenze der Klebeverbindung liegt ($F_\tau \ll F_K$).

Wie bereits in Kapitel 5.2.1 erwähnt, sind Temperaturen der Polymerlösung im Bereich 45 bis 80 °C notwendig, um unter anderem eine ausreichende Fließfähigkeit während der Produktion zu gewährleisten. Dies wird durch Temperierung der Spinndüse ermöglicht, womit eine temperaturbedingte Aufweitung der Verbindung von Düsenzapfen und Hohlnadel nachzurechnen ist:

Längenausdehnungskoeffizient des Düsenzapfens [21]: $\alpha_{Al} = 23{,}8 \cdot 10^{-6}\,\frac{1}{\mathrm{K}}$

Längenausdehnungskoeffizient der Hohlnadel [21]: $\alpha_{CrNi} = 15{,}5 \cdot 10^{-6}\,\frac{1}{\mathrm{K}}$

Fügedurchmesser bei Raumtemperatur: $d_F = 0{,}4\ \mathrm{mm}$

Angenommene Temperatur der Spinndüse vor dem Betrieb: $20\ °\mathrm{C}$

Angenommene Temperatur der Spinndüse im Betrieb: $80\ °\mathrm{C}$

Mit der Formel für Längenausdehnung [22] ergibt sich folgende Aufweitung:

$$\Delta_\mathrm{d} = d_F \cdot \Delta_\alpha \cdot \Delta_\mathrm{T} = 0{,}4\ \mathrm{mm} \cdot (23{,}8 - 15{,}5) \cdot 10^{-6}\ \frac{1}{\mathrm{K}} \cdot (80 - 20)\ \mathrm{K} = \mathbf{0{,}2\ \mu m}$$

Aufgrund der Eigenschaft des Klebers zur Wärmeausdehnung $\left(\alpha_K = 80 \cdot 10^{-6}\,\frac{1}{\mathrm{K}}\right)$, ist nicht mit einer thermisch induzierten Lösung der Verbindung zu rechnen.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

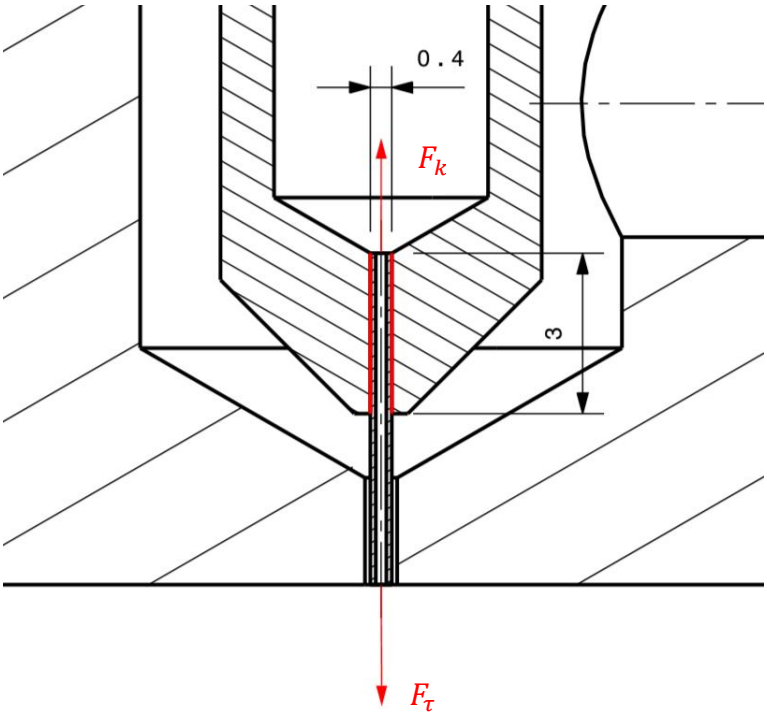


***Abbildung 18**: Fügestelle von Hohlnadel und Düsenzapfen (rot), Kraft der Klebeverbindung $\boldsymbol{F_k}$ und Scherspannungskraft F_τ an der Nadel*

5.4 Festigkeitsnachweis des Düsenzapfens

Um die Festigkeit des Düsenzapfens im Bereich der unter Druck stehenden Füllkammer beurteilen zu können, wird ein Festigkeitsnachweis durchgeführt (Abbildung 19). Der Außendurchmesser des Düsenzapfenbereiches in der Füllkammer beträgt 6 mm mit einer im Inneren befindlichen Bohrung von 4 mm Durchmesser. Für den einwirkenden Druck wird der in Kapitel 5.2.1 errechnete Füllkammerdruck von 93 bar herangezogen. Mithilfe einer FEM-Analyse (Ansys Workbench - Static Structural) erfolgt die Überprüfung der Bauteilfestigkeit. Die Erstellung einer Hälfte des Bauteilquerschnitts ermöglicht das Generieren eines rotationssymmetrischen Modells mit Druckeinwirkung (Abbildung 20). Ersichtlich sind nun die farblich gekennzeichneten Spannungsbereiche, welche nach der Tresca-Vergleichsspannung ermittelt wurden. Zu beachten ist die Spannungsspitze in der Bohrkerbe von $\sigma_{vTresca} = \mathbf{51,605\ MPa}$ (Abbildung 21,22). Dieser Wert wird als Vergleich mit der Mindeststreckgrenze einer Standardlegierung für Aluminium-Rundprofile (Werkstoff: AlMgSi1) $R_{p0,2} = 260\ \mathrm{MPa}$ herangezogen [23].

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

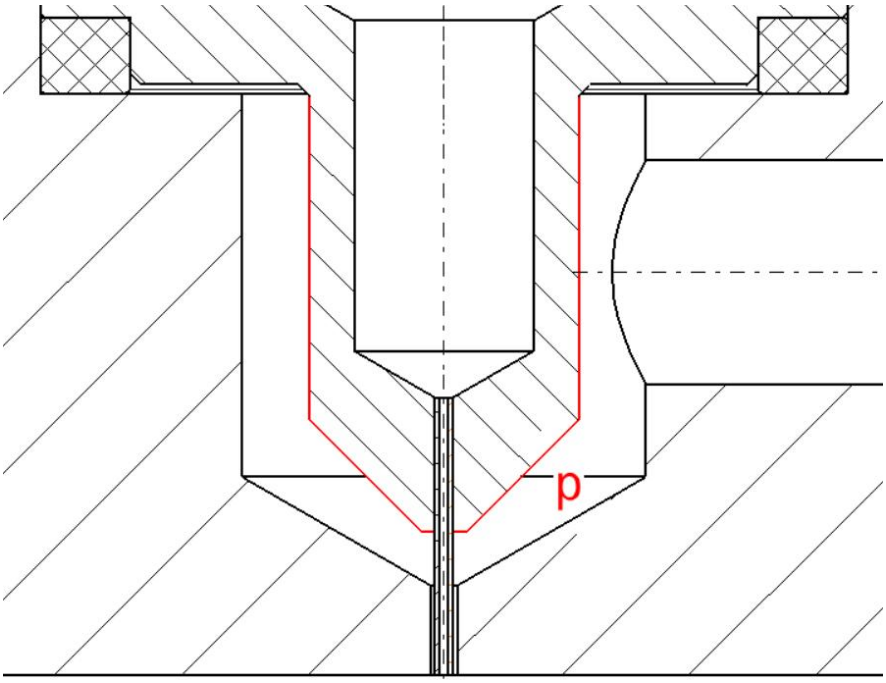


***Abbildung 19**: Festigkeitsanalyse des Düsenzapfenbereiches in der Füllkammer mit einwirkendem Druck von p=93 bar*

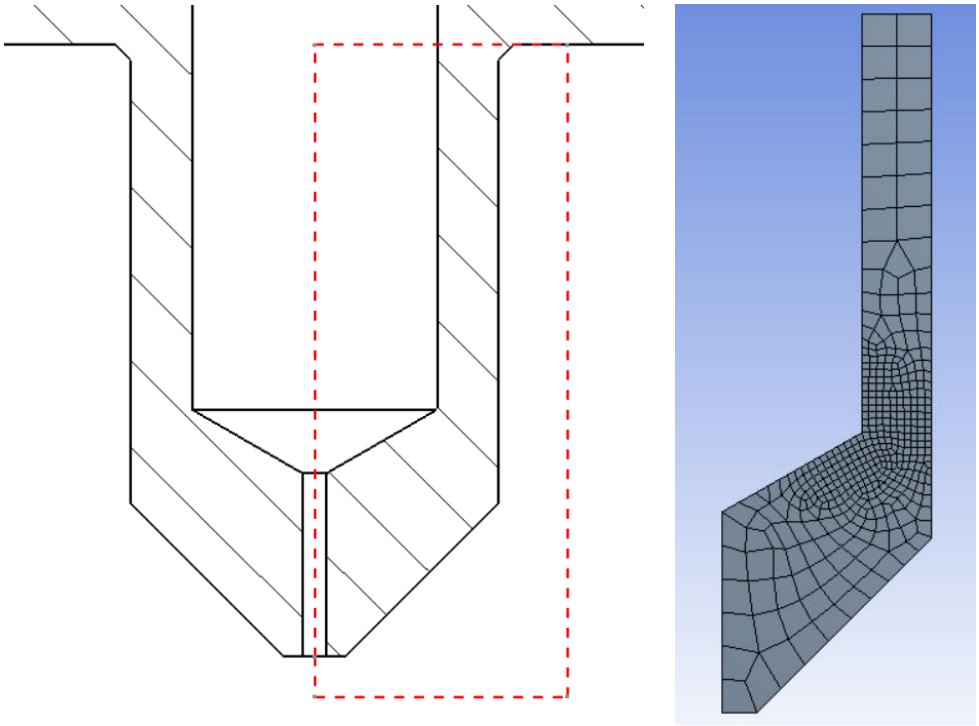


***Abbildung 20:** Links – Rot markierter Bereich des Düsenzapfens für FEM-Analyse, Rechts – Rotationssymmetrisches Modell mit Vernetzung*

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

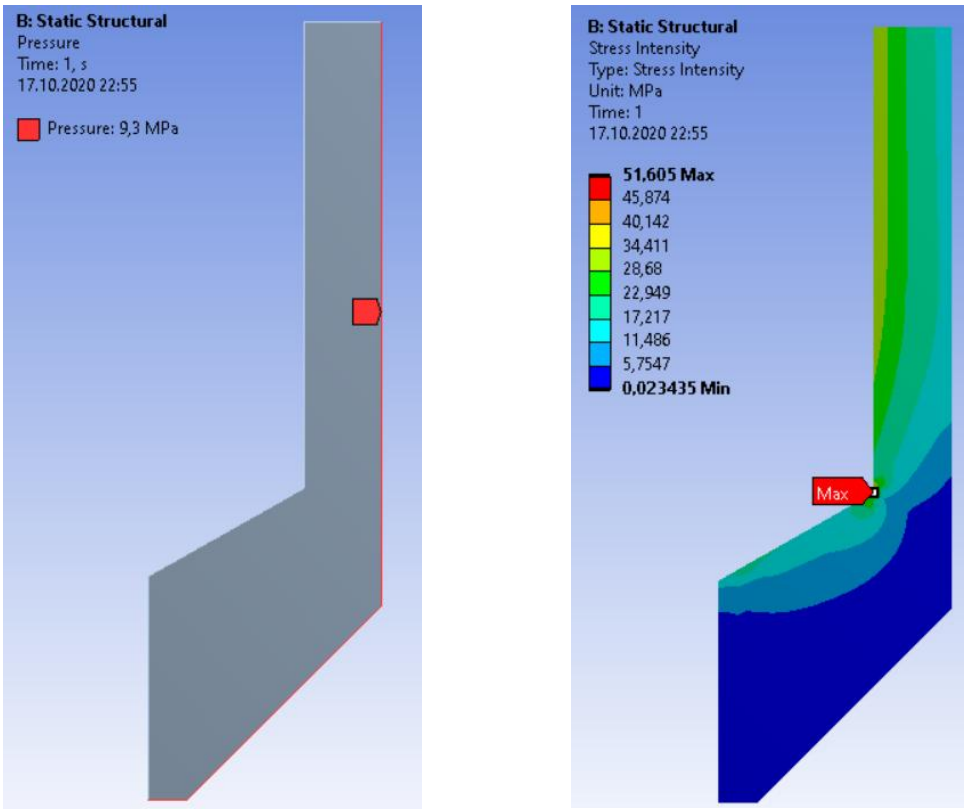


Abbildung 21: *Links – Modell mit beaufschlagtem Druck von 93 bar; Rechts - Spannungsverteilung im Bauteilquerschnitt mit Maximum in der Bohrkerbe*

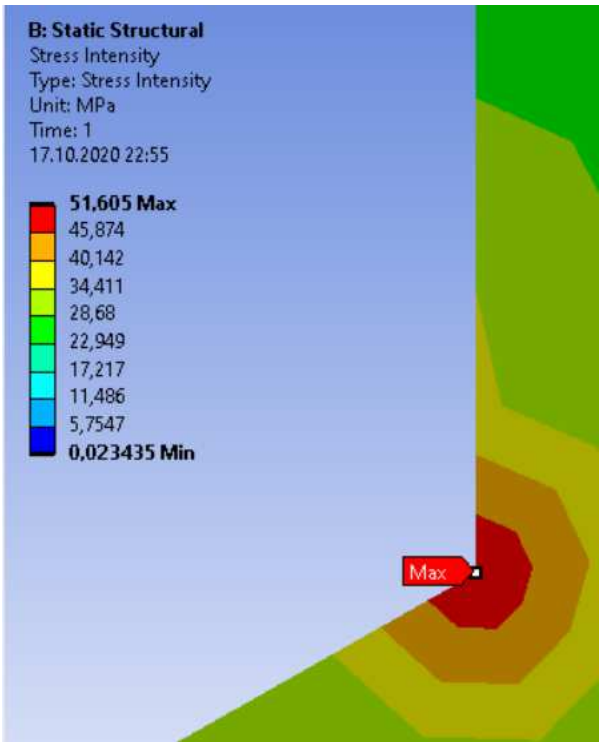


Abbildung 22*: Spannungsspitze von 51,605 MPa in der Bohrkerbe*

Der Vergleich $\boldsymbol{\sigma_{vTresca}} < \boldsymbol{R_{p0,2}}$ zeigt, dass der Abschnitt des Düsenzapfens im Bereich der Füllkammer dem einwirkenden Druck standhält.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

5.5 Festigkeitsnachweis der Füllkammer

Um die Festigkeit der Füllkammer im Gehäuse beurteilen zu können (Abbildung 23) wurde ebenfalls eine FEM-Analyse (Ansys Workbench – Static Stuctural) herangezogen. Durch Modellierung einer Hälfte des Bauteilquerschnitts erfolgte die Erstellung eines rotationssymmetrischen Modells (Abbildung 24). Dieses wird anschließend an der Innenfläche mit einem Druck von 93 bar beaufschlagt (Abbildung 25). Zu sehen ist der Querschnitt um den Füllkammerbereich sowie die farblich gekennzeichneten Spannungsbereiche, welche der Tresca-Vergleichsspannung entsprechen. Die durchschnittliche Spannung im Bauteil beträgt 10,142 MPa, jedoch ist im Bereich der Bohrkerbe mit einer Spannungsspitze von $\sigma_{VTresca} = \mathbf{48,351\ MPa}$ zu rechnen (Abbildung 25,26).

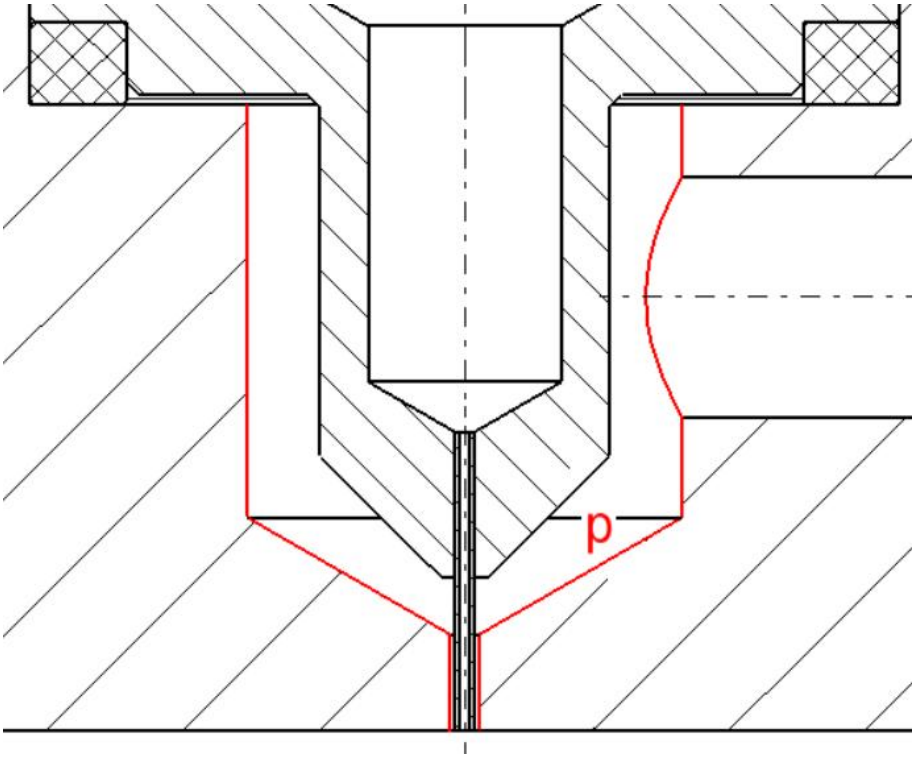


***Abbildung 23**: Festigkeitsanalyse der Füllkammer mit beaufschlagtem Druck von p=93 bar*

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

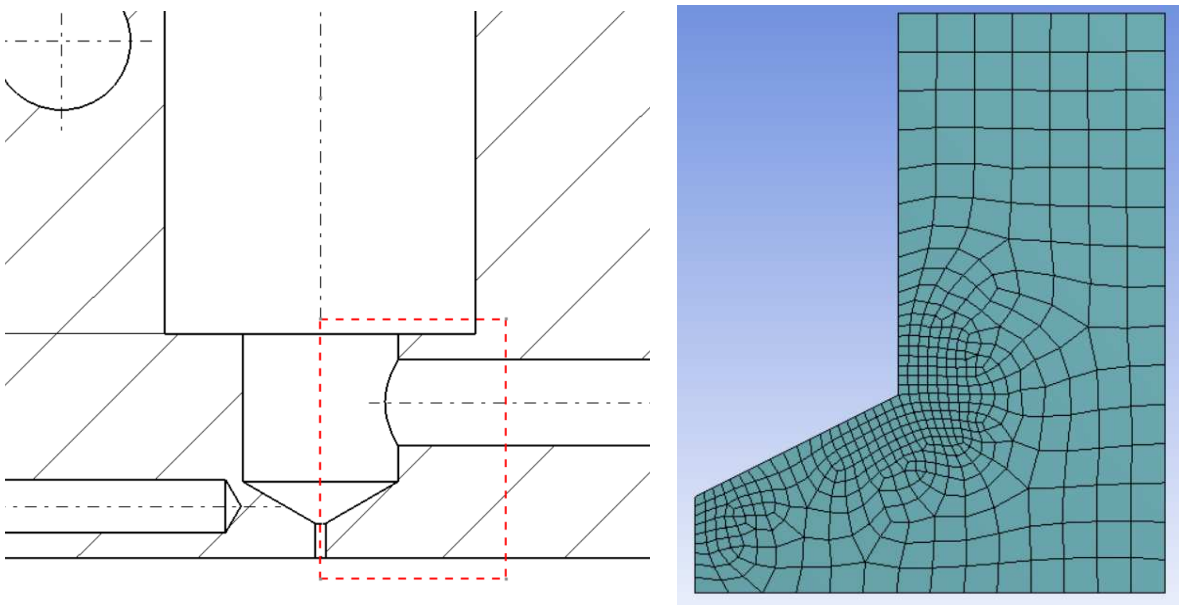


Abbildung 24: *Links – Rot markierter Bereich des Düsengehäuses für FEM-Analyse, Rechts – rotationssymmetrisches Modell mit Vernetzung*

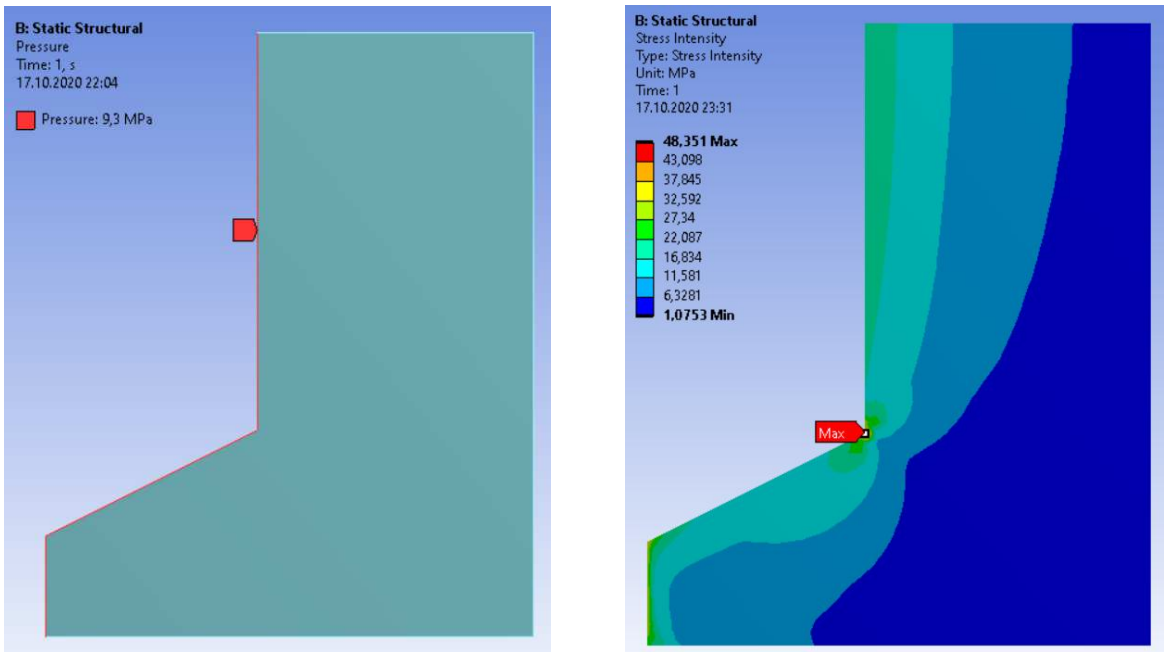


Abbildung 25: *Links – Modell mit baufschlagtem Druck von 93 bar; Rechts - Spannungsverteilung im Bauteilquerschnitt mit Maximum in der Bohrkerbe*

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

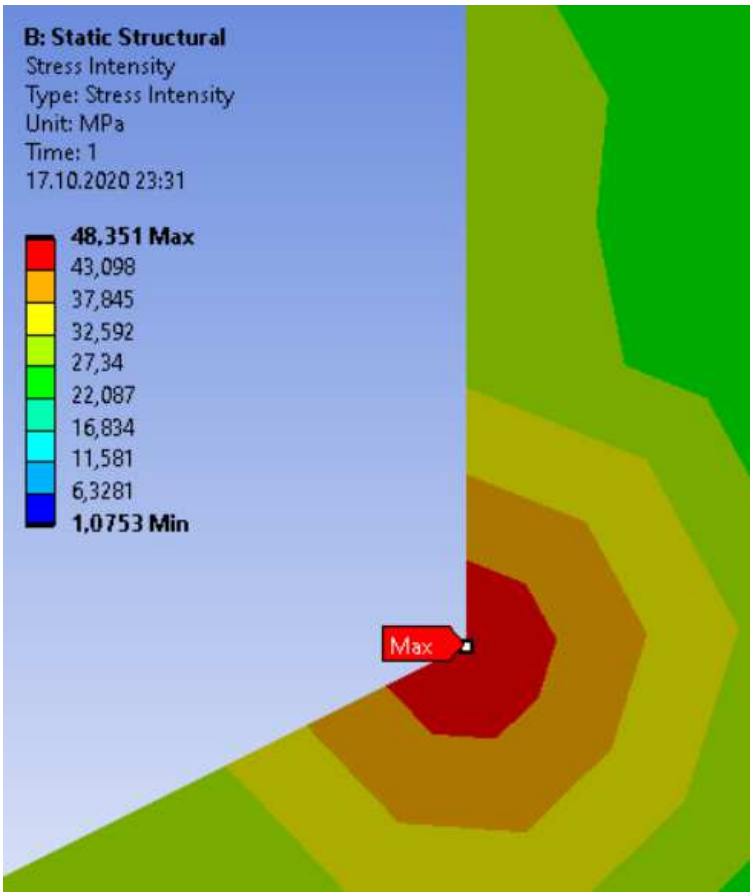


***Abbildung 26**: Spannungsspitze in der Bohrkerbe*

Bei einer Mindeststreckgrenze einer Standardlegierung für Aluminium-Rundprofile (Werkstoff: AlMgSi1) mit $R_{p0,2} = 260$ MPa gilt: $\boldsymbol{\sigma_{VTresca} < R_{p0,2}}$.

Der Nachweis verdeutlicht somit die Beständigkeit gegenüber dem einwirkenden Druck.

5.6 Erforderlicher Durchmesser der Befestigungsschrauben

Um eine feste Verbindung zwischen Gehäuse und Düsenzapfen garantieren zu können, ist die Eruierung des notwendigen Schraubendurchmessers erforderlich. Die Auswahl der Schraubendimension wird mithilfe der VDI-Richtlinien 2230-Tabelle A7 (siehe Anhang) durchgeführt. Dabei dient die Schraubenkraft als Eingangsgröße für diese Analyse, womit deren Kenntnis von Notwendigkeit ist. Zur Berechnung der Schraubenkraft wird die projizierte Fläche des Druckes in der Füllkammer auf den Düsenzapfen herangezogen (Abbildung 27). Die daraus resultierende Axialkraft wird in weiterer Folge auf die Anzahl der Schrauben, welche über einen Befestigungsdeckel die Fixierung des Düsenzapfens im Gehäuse ermöglichen, aufgeteilt (Abbildung 28). Mit der nun berechneten Kraft pro Schraube kann die Auswahl des notwendigen Schraubendurchmessers erfolgen.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

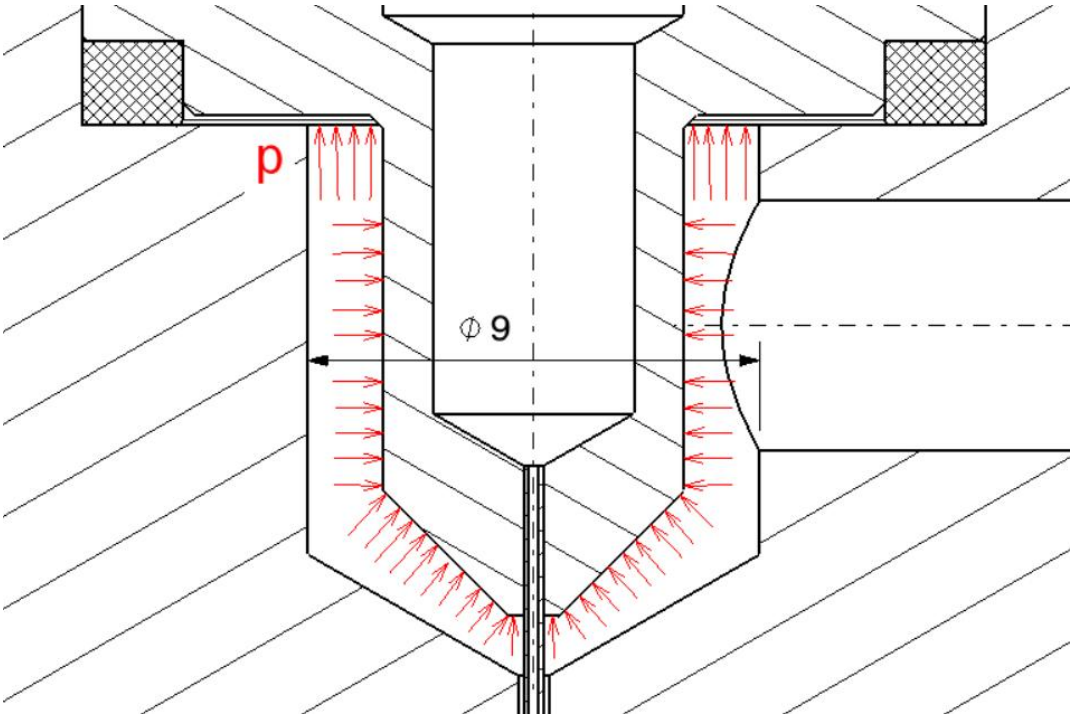


***Abbildung 27**: Druckkräfte am Düsenzapfen im Bereich der Füllkammer*

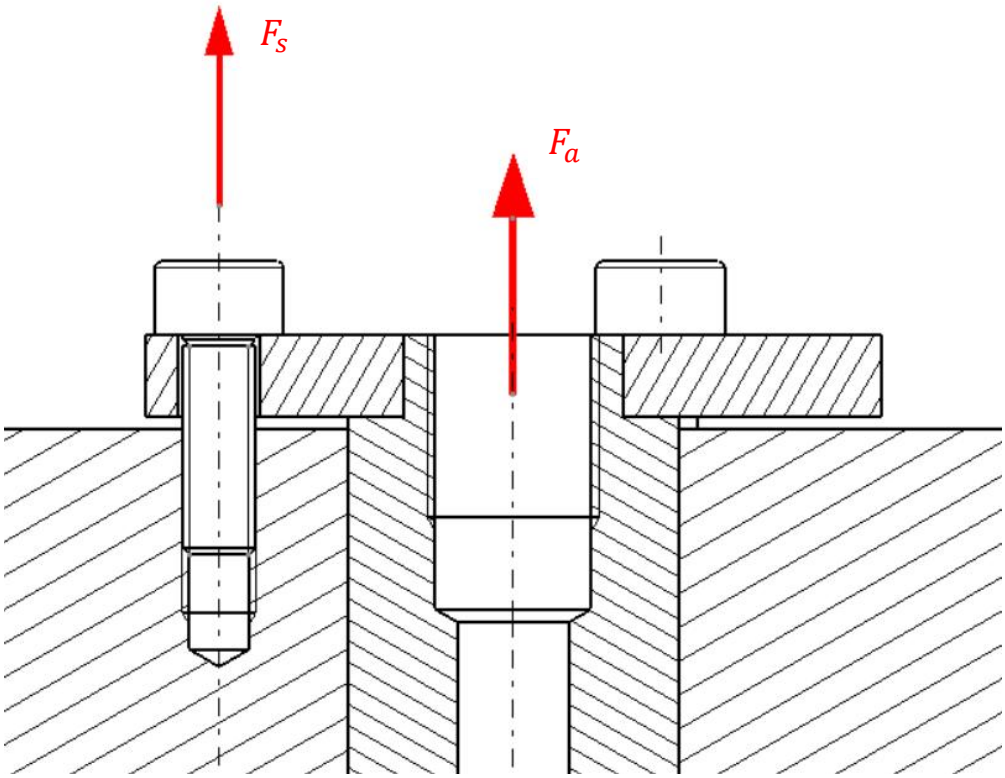


***Abbildung 28**: Resultierende Axialkraft F_a infolge der Druckeinwirkung auf den Düsenzapfen im Bereich der Füllkammer sowie Schraubenkraft F_s*

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

Maximal zulässiger Betriebsdruck in der Füllkammer (festgelegt in Kapitel 5.2.1):

$p_{max} = 93\ \text{bar} = 93 \cdot 10^5\ \text{Pa} = 9{,}3 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Projizierte Angriffsfläche des Druckes: $A_p = \frac{(9\text{mm})^2 \cdot \pi}{4} = 63{,}62\ \text{mm}^2$

Auf den Düsenzapfen wirkende Axialkraft: $F_a = p_{max} \cdot A_p = 591{,}67\ \text{N}$

Gewählte Anzahl der Deckelschrauben: $n = 3$

Kraft pro Schraube: $F_s = \frac{F_a}{n} = 197{,}22\ \text{N}$

Mithilfe der nun ermittelten Schraubenkraft F_s lässt sich anhand der Tabelle-A7 der VDI-Richtlinien 2230 (siehe Anhang) ein erforderlicher Schrauben-Nenndurchmesser von 3 mm ableiten. Für die Fixierung des Düsenzapfens im Gehäuse wurden jedoch drei M4 Innen-Sechskantschrauben der Festigkeitsklasse 8.8 gewählt.

5.7 Zusammenfassung der Auslegungsdaten und Berechnungsergebnisse

Die nochmalige Auflistung der Auslegungsdaten und Berechnungsergebnisse soll zu einer übersichtlichen Darstellung verhelfen.

<u>Auslegungsdaten:</u>

Durchflussrate des Polymer-Stroms: $Q_P = 2{,}4\ \frac{\text{ml}}{\text{min}}$

Durchflussrate des Borefluid-Stroms: $Q_B = 50\ \frac{\text{ml}}{\text{h}}$

Mittlere Strömungsgeschwindigkeit der Polymerlösung: $v_P = 0{,}255\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Mittlere Strömungsgeschwindigkeit des Borefluids: $v_B = 0{,}283\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Maximal zulässige Viskosität der Polymerlösung bei 25 °C: $\mu = 15\ \text{Pa} \cdot \text{s}$

Außendurchmesser des Polymer-Kanals: $D_a = 0{,}6\ \text{mm}$

Innendurchmesser des Polymer-Kanals: $D_i = 0{,}4\ \text{mm}$

Durchmesser des Borefluid-Kanals: $D = 0{,}25\ \text{mm}$

Länge des Polymer-Kanals: $l = 2\ \text{mm}$

Länge des Borefluid-Kanals: $l = 10\ \text{mm}$

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

<u>Ergebnisse der Auslegungsrechnung:</u>

Reynoldszahl der Polymer-Strömung: $R_e = 0{,}062 \ll 1$

Reynoldszahl der Borefluid-Strömung: $R_e = 178{,}21 < 2300$

Druckdifferenz im Polymer-Kanal: $\Delta p_{12} = 92\ \mathrm{bar}$

Füllkammerdruck: $p_1 = 93\ \mathrm{bar}$

Druckdifferenz im Borefluid-Kanal: $\Delta p_{12} = 0{,}013\ \mathrm{bar}$

Scherspannung aufgrund des Polymer-Stroms: $\tau_P = 0{,}248 \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{mm}^2}$

Scherspannung aufgrund des Borefluid-Stroms: $\tau_B = 8{,}304 \cdot 10^{-6} \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{mm}^2}$

Klebekraft zwischen Hohlnadel und Düsenzapfen: $F_K = 47{,}13\ \mathrm{N}$

Resultierende Scherkraft auf der Hohlnadel: $F_\tau = 0{,}623\ \mathrm{N} \ll F_K$

Temperaturbedingte Aufweitung der Fügestelle von Hohlnadel und Düsenzapfen: $\Delta_d = 0{,}2\ \mu\mathrm{m}$

Vergleichsspannung nach Tresca im Düsenzapfen:

$\sigma_{vTresca} = 51{,}605\ \mathrm{MPa} < R_{p0,2} = 260\ \mathrm{MPa}$

Vergleichsspannung nach Tresca in der Füllkammer des Gehäuses:

$\sigma_{vTresca} = 48{,}351\ \mathrm{MPa} < R_{p0,2} = 260\ \mathrm{MPa}$

Erforderlicher Nenndurchmesser der Befestigungsschrauben: M3 – gewählt M4

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

6. Konstruktive Auslegung der Spinndüse

Die Auslegung der Spinndüse fand unter Zuhilfenahme von Literaturrecherchen zur Eruierung gängiger Düsendesigns statt [24]–[26]. Es wurden drei Spinndüsen-Typen (Typ-1, 2 und 3) konstruiert und getestet. Nach jedem Test eines Spinndüsen-Typs erfolgte die Feststellung von Optimierungsmaßnahmen, welche durch Berücksichtigung im darauffolgenden Typ zu einer sukzessiven Verbesserung des Spinndüsenaufbaus führten.

Jeder Spinndüsen-Typ setzt sich grundlegend aus einem Gehäuse mit Düsenbohrung sowie einem Düsenzapfen mit integrierter Hohlnadel, die als Injektor fungiert, zusammen. Durch Fügen beider Komponenten wird die Hohlnadel konzentrisch in der Düsenbohrung des Gehäuses platziert. Zur Fixierung des Düsenzapfens im Gehäuse dient ein Befestigungsdeckel, um ein Lösen der Verbindung während des Betriebs zu verhindern. Eine Beheizung des Gehäuses beeinflusst die Viskosität der zugeführten Polymerlösung. Dies ermöglicht das Herstellen unterschiedlicher Membranstrukturen sowie die Aufrechterhaltung des Fließverhaltens. Für die Zufuhr der Polymerlösung im Gehäuse und die Zufuhr des Borefluids im Düsenzapfen wurde jeweils ein Anschluss berücksichtigt.

6.1 Spinndüse – Typ 1

Dieses Kapitel veranschaulicht den Aufbau, die Fertigung sowie Versuchsdurchführung der Spinndüse vom Typ 1.

6.1.1 Aufbau der Spinndüse

Die Spinndüse (Abbildung 29) setzt sich im Wesentlichen aus einem Gehäuse und einem Düsenzapfen zusammen. Damit wird eine separate Reinigung und Wartung der Komponenten ermöglicht. Das Fügen der beiden Komponenten erfolgt mittels Übergangspassung, um eine konzentrische Positionierung der Hohlnadel in der Düsenbohrung zu ermöglichen.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

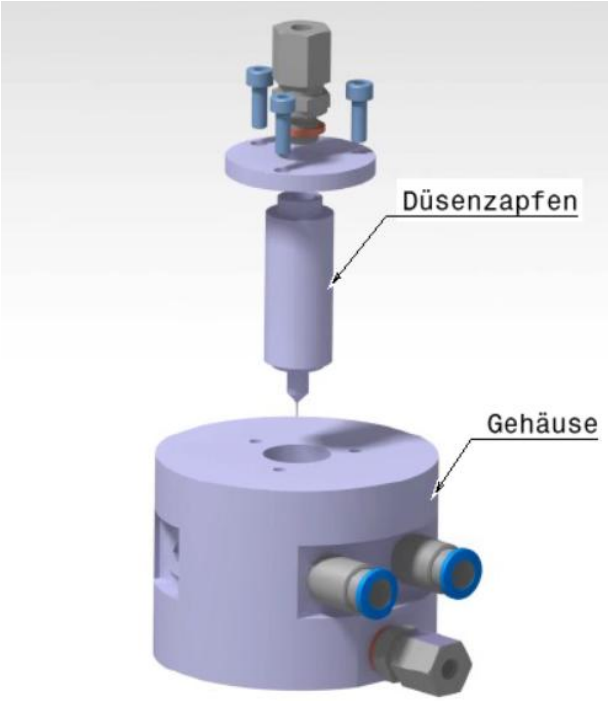


***Abbildung 29**: Düse mit Gehäuse und Düsenzapfen*

Da die Viskosität der zugeführten Polymerlösung einen Einfluss auf die Membranstruktur hat [10], ist eine Viskositätsregulierung während des Spinndüsenbetriebs vorzusehen. Dies erfolgt durch Temperieren des Düsenkörpers. Zur Wahl standen zwei Möglichkeiten:

- Temperierung mittels Heizfolie am Düsenkörper mit elektronisch gesteuerter Temperaturregelung.
- Temperierung mittels Heizwasser, welches einem im Gehäuse befindlichen Kanal zu- und abgeführt wird.

Für den Spinndüsenbetrieb bietet jedoch die Temperierung mittels Heizwasser, gegenüber der Verwendung von Heizfolie, folgende Vorteile:

- Erzielung einer homogenen Erwärmung des Düsenkörpers.
- Unterbindung einer punktuellen Überhitzung.

Somit fiel der Entschluss, die Düsentemperierung durch Einspeisen von Heizwasser durchzuführen. Die Aufbereitung des Heizwassers erfolgt in einem externen Heizbad mit integrierter Temperaturregelung des Typs CORIO CD-B5 (Julabo Gmbh, Seelbach, Deutschland), dass anschließend über Leitungen der Düse zu- und abgeführt wird. Das Heizwasser durchfließt die um den Düsenkern angeordneten Kanäle und führt zu einer Erwärmung des Düsenkörpers. Um mit einem Thermoelement die Temperatur der Düse überprüfen zu können, wurde eine Bohrung in der Nähe der Düsenöffnung ausgeführt.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek WIEN Your knowledge hub

Das Gehäuse (Abbildung 30) setzt sich somit folgendermaßen zusammen:

- Zufuhr für die Polymerlösung (Nr. 1)
- 0,6 mm Düsenöffnungsbohrung (Nr.2)
- Bohrung für ein Thermoelement in der Nähe der Düsenöffnung (Nr.3)
- Heizwasserkanäle zur Thermostatisierung der Spinndüse (Nr.4)
- Fügesitz für Düsenzapfen (Nr.5)
- Anschlüsse für Heizwasser Zu-und Abfuhr (Nr. 6)
- Füllkammer der Polymerlösung (Nr.7)
- Verschlussschraube zum Abdichten der Verbindungsbohrung (Nr. 8)
- Gewindelöcher (Anordnung: 3x120°) zum Verschrauben des Deckels (Nr.9)
- Gewindelöcher (Anordnung: 4x90°) zum Befestigen der Spinndüse am Rahmen der Anlage (Nr.10)

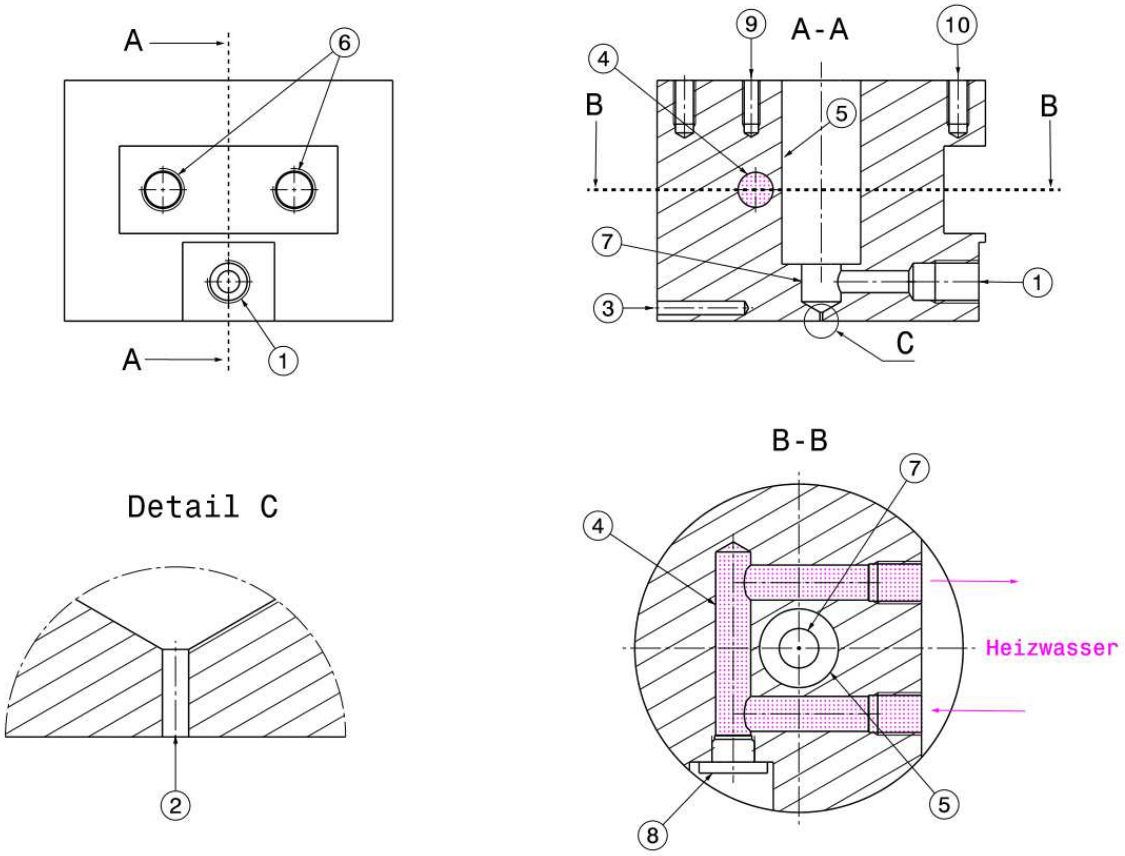


Abbildung 30: *Aufbau des Gehäuses – (1) Zufuhr der Polymerlösung; (2) 0,6 mm Düsenbohrung; (3) Thermoelement-Bohrung; (4) Heizwasser-Kanal; (5) Fügesitz des Düsenzapfens; (6) Heizwasser-Anschlüsse; (7) Füllkammer; (8) Verschlussschraube; (9,10) Gewindelöcher*

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Das Innenteil (Abbildung 31) beinhaltet:

- Anschluss für die Borefluid-Zufuhr (Nr.1)
- Bohrung zur Positionierung und Verklebung der Hohlnadel (Nr.2)
- Mit dem Innenteil verbundene Hohlnadel (Nr.3)
- Nut für den Dichtring zwischen Gehäuse und Düsenzapfen (Nr.4)

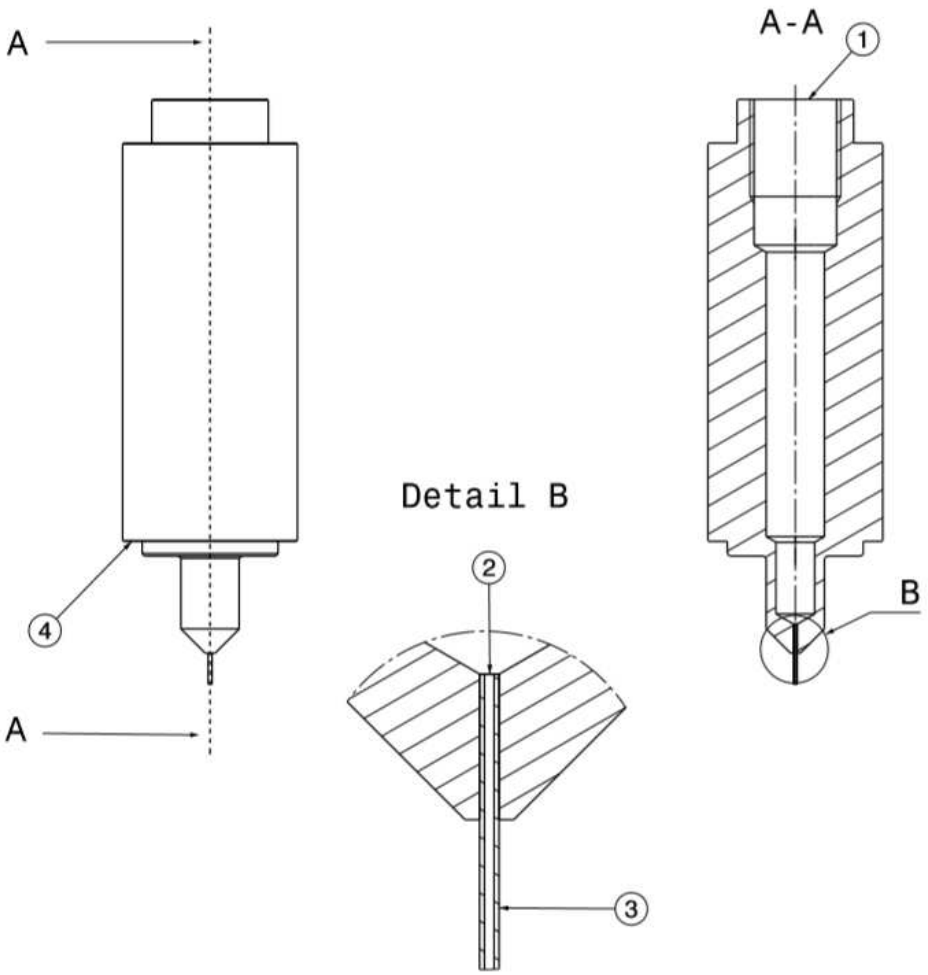


***Abbildung 31**: Innenteil mit Schnittansicht A-A: (1) Borefluid-Zufuhr, (2) Bohrung zur Fixierung Hohlnadel, (3) Hohlnadel, (4) Nut für Dichtring*

Die Fixierung des Düsenzapfens im Gehäuse erfolgt über einen Deckel mit drei M4 Innen-Sechskantschrauben (Abbildung 32 - Nr.3 und 6). Als Anschlüsse für die Polymer- und Borefluid-Zufuhr sowie für die Heizwasser Zu- und Abfuhr wurden gerade Einschraubverschraubungen mit einem zylindrischen 1/8 Zoll Außengewinde verwendet (Abbildung 32 - Nr.4, 8, 9). Ein Dichtring aus Teflon sorgt für eine dichte Verbindung zwischen Gehäuse und Düsenzapfen (Abbildung 32 - Nr. 13).

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

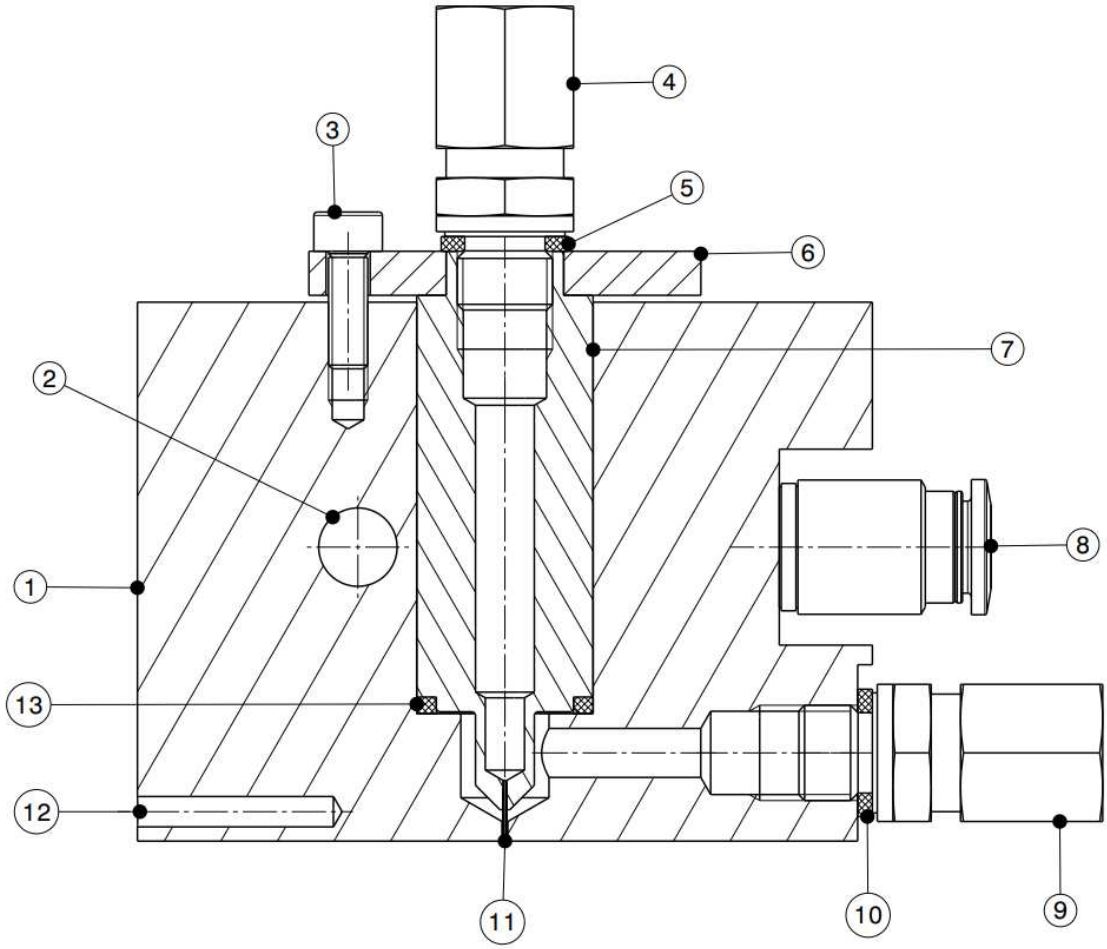


***Abbildung 32**: Zusammengebaute Düse im Querschnitt: (1) Gehäuse, (2) Heizwasserkanal, (3) M3 Innensechskantschraube, (4) Borefluid-Anschluss, (5) Dichtring, (6) Befestigungsdeckel, (7) Düsenzapfen, (8) Heizwasseranschluss, (9) Anschluss für die Polymerlösung, (10) Dichtring, (11) Düsenöffnung, (12) Anschluss für ein Thermoelement, (13) Teflon-Dichtring*

6.1.2 Fertigung und Assemblierung

Die Spinndüse wurde mittels einer manuellen Dreh- und Fräsmaschine eigenständig am Institut für Konstruktionswissenschaften und Produktentwicklung der Technischen Universität Wien gefertigt (Abbildung 33, 34). Als Werkstoff für das Gehäuse kam Aluminium zum Einsatz, da zum einen eine werkzeugschonende Bearbeitung ermöglicht wird und zum anderen die gute Wärmeleitfähigkeit für die Erwärmung der Polymerlösung genutzt werden kann. Für den Düsenzapfen wurde Messing als Werkstoff gewählt, da bei anfänglichen Versuchen mit Aluminium beim Zusammenbau ein Festfressen im Bereich der Passung zwischen Düsenzapfen und Gehäuse auftrat. Die Verbindung der Hohlnadel mit dem Düsenzapfen erfolgte mithilfe eines geeigneten Metallklebers des Typs Loctite 938 (Henkel AG, Düsseldorf, Deutschland). Auch musste bei allen Dichtungen die Verträglichkeit mit dem in der Polymerlösung enthaltenen Lösungsmittel NMP berücksichtigt werden, weshalb nur Dichtungen aus Teflon oder Silikon zum Einsatz kamen.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

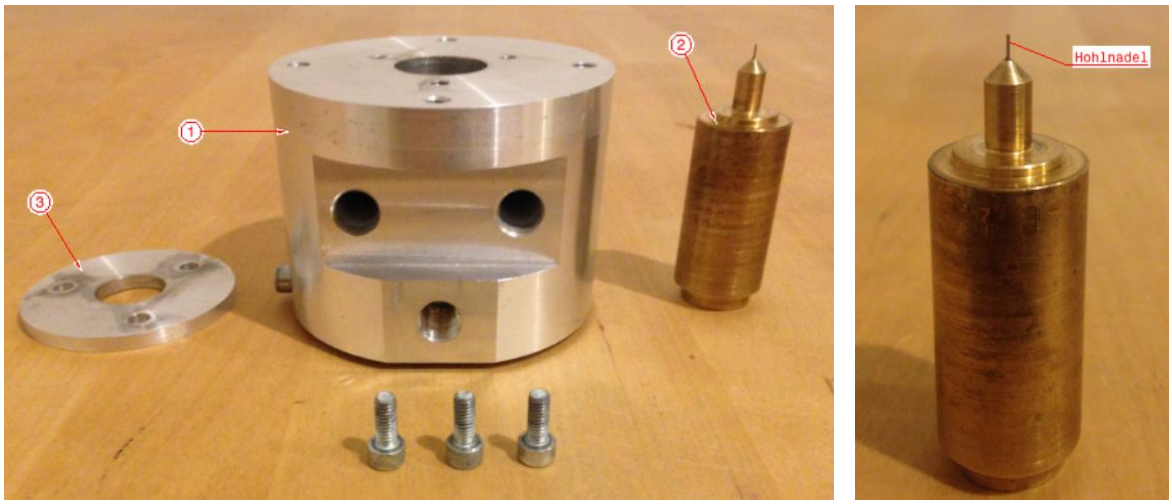


Abbildung 33: *Links – Einzelteile der Spinndüse vom Typ-1: (1) Befestigungsdeckel, (2) Gehäuse und (3) Düsenzapfen, Rechts – Düsenzapfen mit integrierter Hohlnadel*

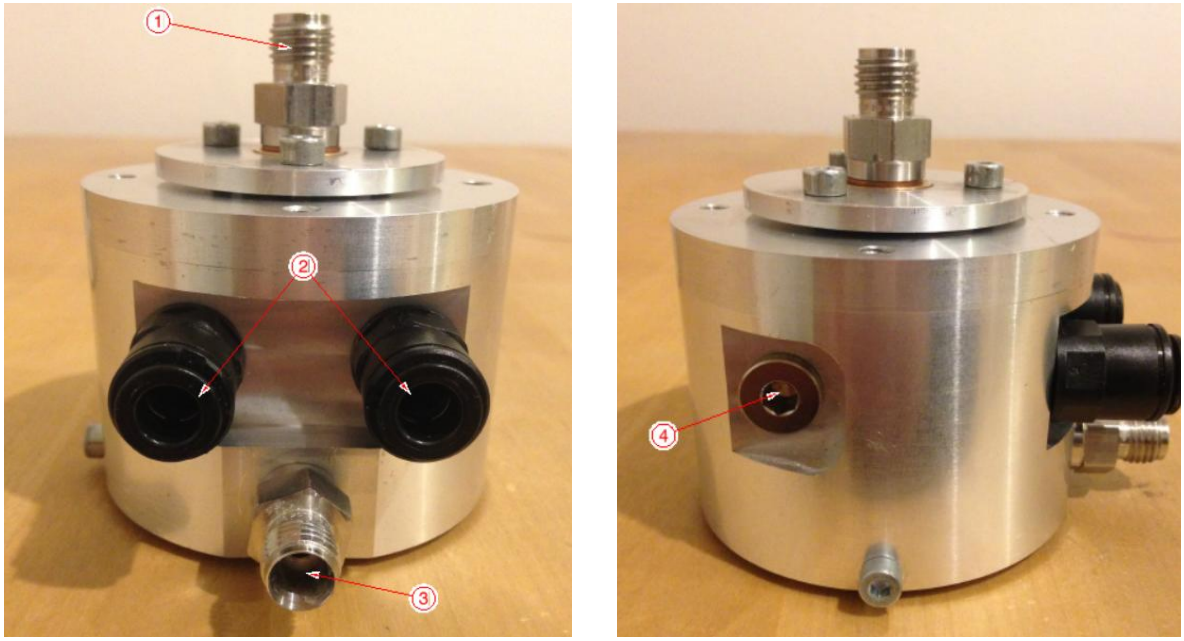


Abbildung 34: *Spinndüse Typ-1 im zusammengebauten Zustand mit Anschlüssen – (1) Anschluss für die Borefluid-Zufuhr, (2) Anschlüsse für die Heizwasser Zu- und Abfuhr, (3) Anschluss für die Zufuhr der Polymerlösung, (4) Verschlussschraube*

6.1.3 Versuchsdurchführung

Die Produktion der ersten Hohlfaser (Abbildung 35, 36) wurde ohne Umlenkrollen und Wickeleinheit durchgeführt, um das grundsätzliche Verhalten der Spinndüse zu überprüfen. In Abbildung 36 ist eine REM-Aufnahme des Faserquerschnitts zu sehen. Der Außendurchmesser der Faser beträgt 771,7 µm und kann durch die Hinzunahme der Wickeleinheit sowie der Aufwicklungsgeschwindigkeit der Rollen weiter reduziert werden [27]. Die Wandstärke ist derzeit ungleichmäßig ausgeprägt, womit

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek WIEN Your knowledge hub

eine Erhöhung der Borefluidrate zur besseren Ausprägung des Faserhohlraumes sinnvoll wäre [28]. Der Einfluss des Luftspalts, der durch die vertikale Distanz zwischen Düsenöffnung und Fällbad-Oberfläche entsteht, auf die Ausprägung des Faserhohlraumes ist ebenfalls durch weitere Testversuche zu eruieren. Aufgrund fertigungstechnischer Ungenauigkeiten konnte die Zentrierung der Hohlnadel nur durch Rotation des Düsenzapfens im Gehäuse, bis zur Aufhebung der zwischen den Komponenten vorhandenen Exzentrizität, erreicht werden. Überdies befanden sich auf der Faseroberfläche Kratzer und Einkerbungen, die aufgrund einer rauen Innenoberfläche der 0,6 mm Düsenbohrung resultierten. Außerdem war der Borefluid-Anschluss wegen eines fehlenden Gabelschlüsselansatzes undicht, da dieser nicht mit ausreichender Festigkeit angezogen werden konnte, weshalb bei der Konstruktion des nächsten Modells darauf eingegangen werden muss. Darüber hinaus kam es bei Druckanstiegen bis zu 40 bar im Borefluid-Kanal (bedingt durch Abrieb oder durch Verunreinigungen entstehende Partikel, die zu einem Verstopfen der Hohlnadel führen) zu einer Verformung des Teflon-Dichtringes im Anschlussbereich des Düsenzapfens, was zu einer Erhöhung der Undichtheit beitrug. Positiv zu vermerken sei dennoch, dass die Spinndüse ihre grundlegende Funktionalität erfüllte und die Produktion einer Faser mit Hohlraum erfolgreich bewerkstelligt werden konnte. Die Durchführung des Testversuches fand mit folgenden Parametern statt (Tabelle 2):

Tabelle 2: *Betriebsparameter des ersten Testversuchs*

Symbol	Betriebsparameter	Werte
Q_P	Durchflussrate der Polymerlösung	$0{,}25\ \mathrm{mL}\ /\ \mathrm{min}$
Q_B	Durchflussrate des Borefluids	$0{,}25\ \mathrm{mL}\ /\ \mathrm{min}$
c_P	Polymerkonzentration in der Polymerlösung	$31\ \mathrm{wt.\%}$
c_B	Nichtlösungsmittelkonzentration im Borefluid	$100\ \mathrm{wt.\%}$
l	Länge des Luftspalts	$6\ \mathrm{cm}$
v	Aufwickelgeschwindigkeit	-
T_K	Temperatur des Koagulationsbades	$23\ °\mathrm{C}$
T_P	Temperatur der Polymerlösung	$70\ °\mathrm{C}$
T_S	Temperatur der Spinndüse	$65\ °\mathrm{C}$

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

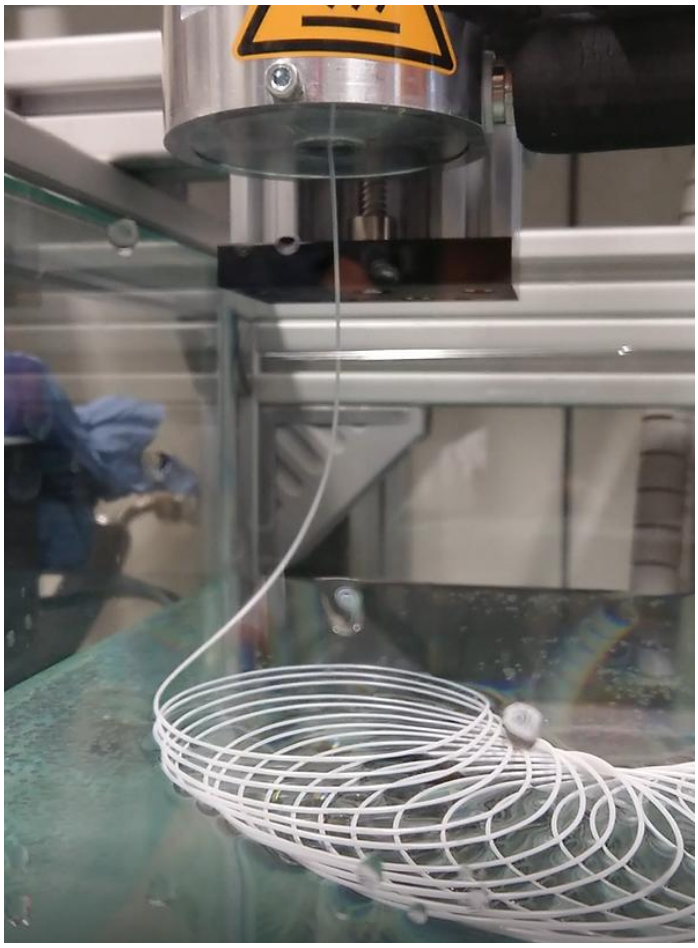


***Abbildung 35**: Spinndüse im Betrieb, Produktion der ersten Faser ohne Wickeleinheit*

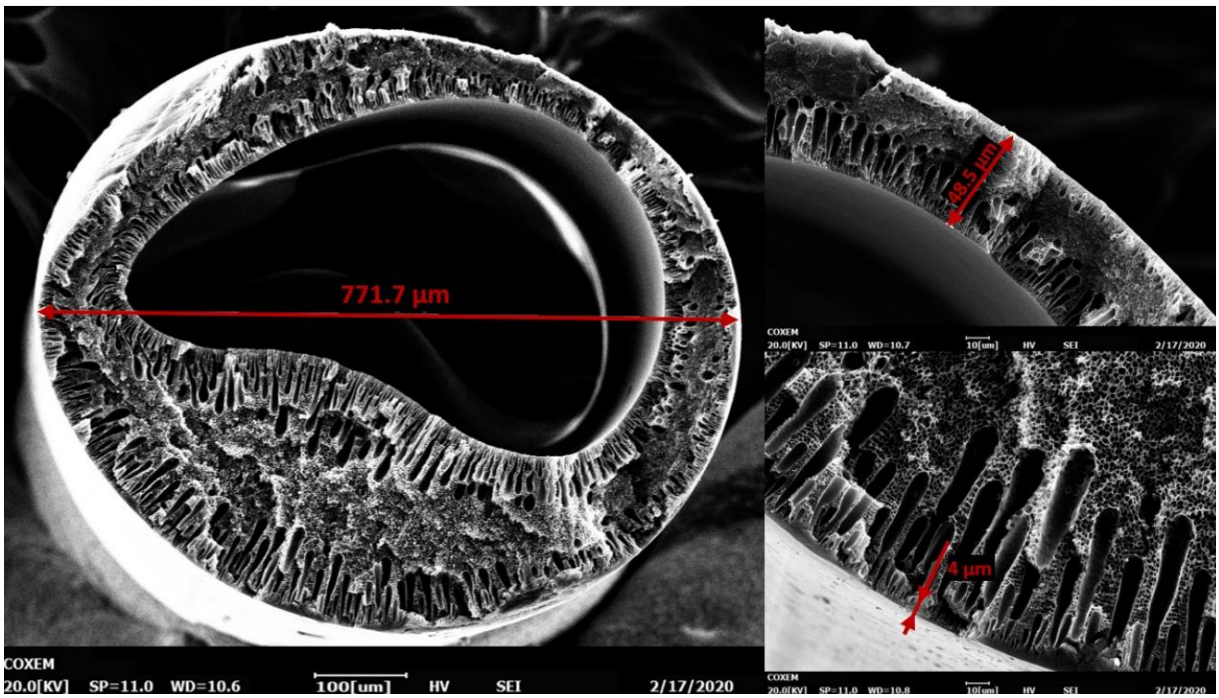


***Abbildung 36**: REM-Aufnahme der ersten Hohlfaser*

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

6.1.4 Optimierungsmaßnahmen

Folgende Optimierungsmaßnahmen sind zur Erlangung einer verbesserten Hohlfaserproduktion durchzuführen:

- Erhöhung der Fertigungsgenauigkeit, um eine genauere Fügung des Düsenzapfens im Gehäuse zu erzielen. Dies führt zur vereinfachten konzentrischen Positionierung der Hohlnadel im Düsenausgang.
- Beseitigung von Oberflächenrauigkeiten in der 0,6 mm Düsenbohrung, um die daraus resultierenden Einkerbungen auf der Faseroberfläche zu reduzieren.
- Behebung des undichten Borefluid-Anschlusses im Düsenzapfen, durch Berücksichtigung eines Gabelschlüsselansatzes. Damit kann eine feste und dichte Montage des Anschlusses gewährleistet werden.

Damit der Einfluss der Optimierungsmaßnahmen auf die Faserentwicklung beurteilt werden kann, wird ein neuer Spinndüsen-Typ (Typ-2) generiert (Kapitel 6.2).

6.2 Spinndüse – Typ 2

Dieses Kapitel veranschaulicht den Aufbau, die Fertigung sowie Versuchsdurchführung der Spinndüse vom Typ 2.

6.2.1 Aufbau der Spinndüse

Der grundsätzliche Aufbau und die Funktion der Spinndüse blieben unverändert, jedoch mussten weitere konstruktive Maßnahmen zur Qualitätssteigerung der Faser durchgeführt werden. Diese werden im Folgenden genauer erläutert:

Die Höhe der Spinndüse konnte von 55 auf 44 mm reduziert werden (Abbildung 37). Beim Düsenzapfen wurde der obere Bereich mit zwei planen Seitenflächen ergänzt (Abbildung 38), um eine bessere Montage des Borefluid-Anschlusses mittels eines Gabelschlüssels vornehmen zu können. Die Versuchsdurchführung mit Typ-1 zeigte, dass Abrieb oder Verunreinigungen in der Borefluid-Zuleitung zu einem Verschließen der Hohlnadel und einem plötzlichen Druckanstieg (bis zu 40 bar) führen. Dieser verursacht ein Stabilitätsversagen des Teflon-Dichtrings im Anschlussbereich des Düsenzapfens, wodurch Undichtheiten an dieser Stelle entstanden. Beim Borefluid-Anschluss kommt somit für mehr Stabilität ein Dichtring aus Kupfer anstatt des Teflon-Dichtrings zum Einsatz. Aufgrund des geringen Druckverlustes in der Zufuhrbohrung der Polymerlösung wurde diese von 5 auf 3 mm reduziert. Auch wurde der Anschlussbereich für die Heizwasser Zu- und Abfuhr sowie der Polymer-Zufuhr auf eine Ebene gesetzt, um genügend Platz für die Montage der jeweiligen Anschlüsse zu schaffen. Ein besonderes Augenmerk erhielt die 0,6 mm Düsenbohrung im Gehäuse, da diese für die Qualität der Faser eine wichtige Rolle spielt. Mittels einer Miniatur-Reibahle (Schneid-Reibahlen 0,6 – 2 mm; Modelcraft) konnte das Düsenloch gesäubert und entgratet werden, um eine möglichst glatte Innenoberfläche zu schaffen. Für

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek WIEN Your knowledge hub

die Befestigung des Düsenzapfens im Gehäuse werden nun vier M5 (statt drei M4 bei Typ-1) Innen-Sechskantschrauben verwendet (Abbildung 39), um einen gleichmäßigeren Anpressdruck auf den Teflon-Dichtring, welcher zwischen Düsenzapfen und Gehäuse positioniert ist, zu erzeugen. Beim Auseinanderbau der Spinndüse nach dem ersten Test fiel auf, dass die Verbindung zwischen Gehäuse und Düsenzapfen per Hand schwer zu lösen war. Der Grund für diese Problematik war ein Festfressen der beiden Teile, hervorgerufen durch Wasser und Verunreinigungen, die in den Fügespalt gelangten. Die zusätzliche Konstruktion eines Abziehers ist daher notwendig (Abbildung 40). Dabei wird der Borefluid-Anschluss entfernt und ein Abziehdeckel aufgelegt. Dieser wird weiters über einen Gewindebolzen mit dem Düsenzapfen verbunden. Nun kann mittels Druckschrauben, welche in den vier Gewindelöchern der Abziehplatte positioniert sind, die notwendige Kraft zum Lösen der Verbindung aufgebracht werden.

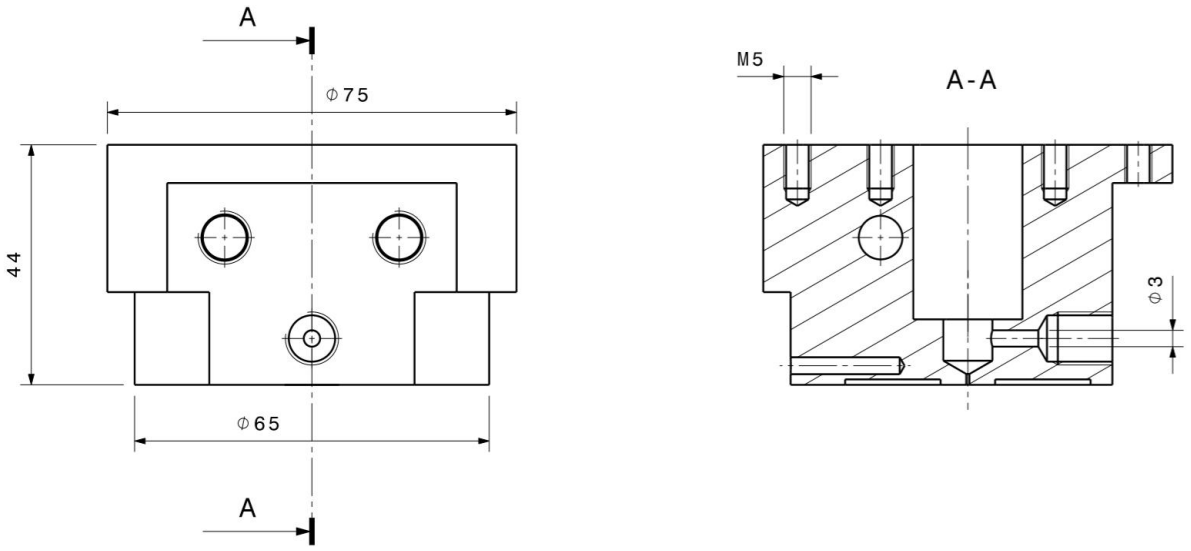


Abbildung 37: *Gehäuse mit Schnitt A-A: links -Vorderansicht der Düse mit eben gefertigtem Anschlussbereich; rechts - Querschnitt der Düse mit einer 3 mm Bohrung für die Zufuhr der Polymerlösung*

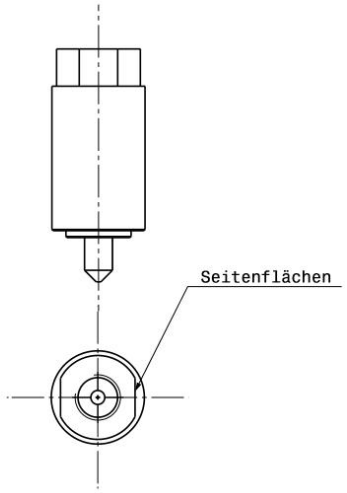


Abbildung 38: *Düsenzapfen mit seitlich gefrästen Stirnflächen für den Gabelschlüsselansatz zur verbesserten Montage des Borefluid-Anschlusses*

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

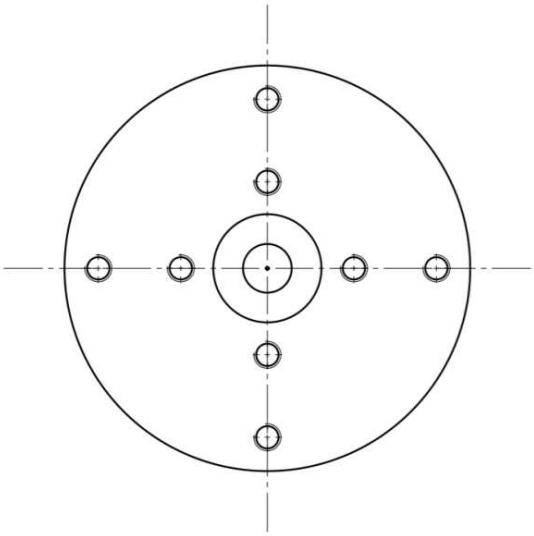


***Abbildung 39**: Draufsicht des Düsengehäuses, innerer Lochkreis: 4 Gewindelöcher zur Fixierung des Düsenzapfens im Gehäuse, äußerer Lochkreis: 4 Gewindelöcher zur Fixierung der Düse am Rahmen der Produktionsanlage*

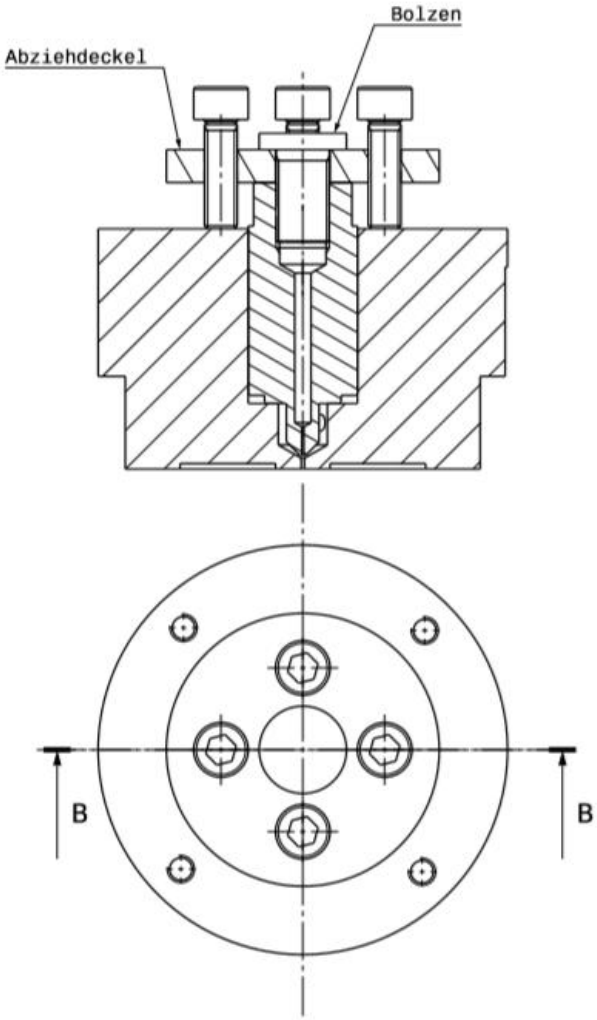


***Abbildung 40**: Schnitt B-B: Düse mit Abziehdeckel sowie vier Druckschrauben*

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

6.2.2 Fertigung und Assemblierung

Für das Düsengehäuse kam wieder Aluminium und für den Düsenzapfen Messing zum Einsatz (Abbildung 41, 42), um ein wie bereits im Kapitel 6.1.2 beschriebenes Festfressen (durch Verwendung eines Düsenzapfens aus Aluminium) im Gehäuse zu verhindern. Wie bereits im vorherigen Kapitel erwähnt, erhielt die 0,6 mm Bohrung eine zusätzliche Nachbearbeitung mittels einer Miniaturreibahle, um das Düsenloch von Einkerbungen zu befreien. Ein im Bereich des Borefluid-Anschlusses integrierter Gabelschlüsselansatz ermöglicht nun die für einen dichten Anschluss notwendige Montage. Ebenso wurde auf eine genaue Fertigung der Fügestelle zwischen Gehäuse und Düsenzapfen geachtet, um das Zentrieren der Hohlnadel im Düsenausgang des Gehäuses zu vereinfachen.

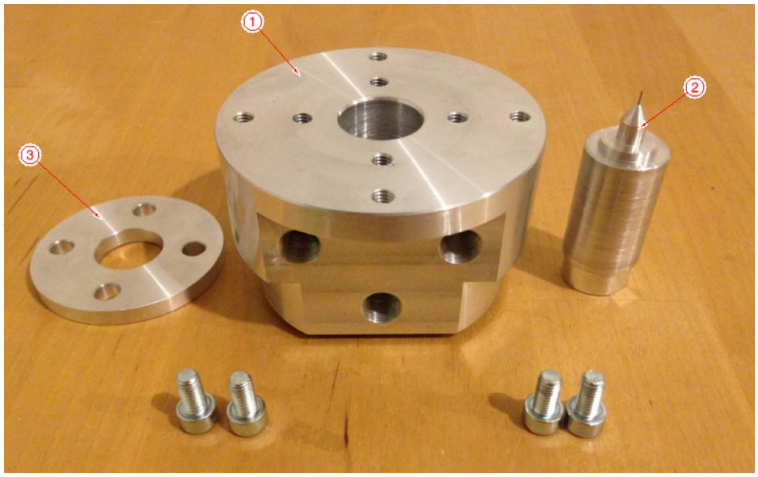


Abbildung 41: *Links – Einzelteile der Spinndüse vom Typ-2: (1) Gehäuse, (2) Düsenzapfen und (3) Befestigungsdeckel; Rechts – Düsenzapfen mit integrierter Hohlnadel*

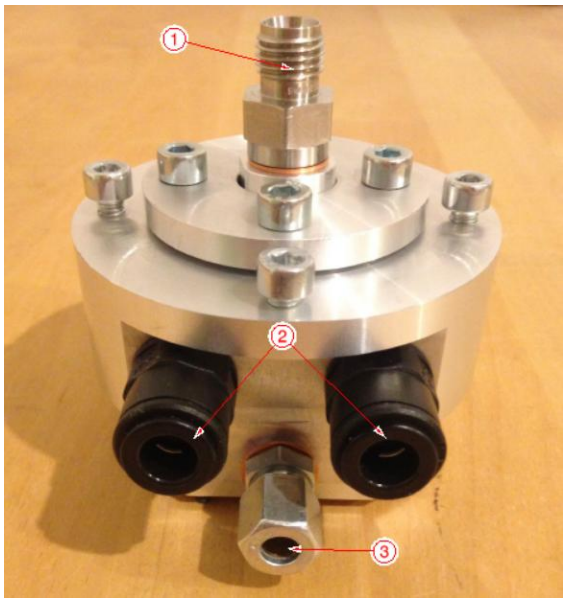


Abbildung 42*: Spinndüse Typ-2 im zusammengebauten Zustand mit Anschlüssen – (1) Anschluss für die Borefluid-Zufuhr, (2) Anschlüsse für die Heizwasser Zu- und Abfuhr, (3) Anschluss für die Zufuhr der Polymerlösung, (4) Verschlussschraube*

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

6.2.3 Versuchsdurchführung

Die Produktion fand mit Umlenkrollen und Wickeleinheit statt, somit konnte die Funktionalität der gesamten Anlage getestet werden (Abbildung 43, 44). Bei einem Druckanstieg (bis zu 40 bar), bedingt durch ein Verstopfen der Borefluid-Nadel, konnte der Kupferdichtring das Austreten des Borefluids reduzieren. Zur vollständigen Reduktion der Undichtheit ist jedoch eine zusätzliche Abdichtung mittels eines Teflonbandes erforderlich. Aufgrund von unvermeidbaren Fertigungsungenauigkeiten der manuellen Bearbeitungsmaschinen, die auch durch verschiedenste Justierungsmaßnahmen nicht zu beseitigen waren, kann eine Zentrierung weiterhin nur durch Rotation des Düsenzapfens im Gehäuse erreicht werden. Somit ist eine Eliminierung der vorhandenen Exzentrizität zwischen den beiden Komponenten zu erzielen. Für Testzwecke gelang jedoch eine akzeptable Zentrierung (Abbildung 45).

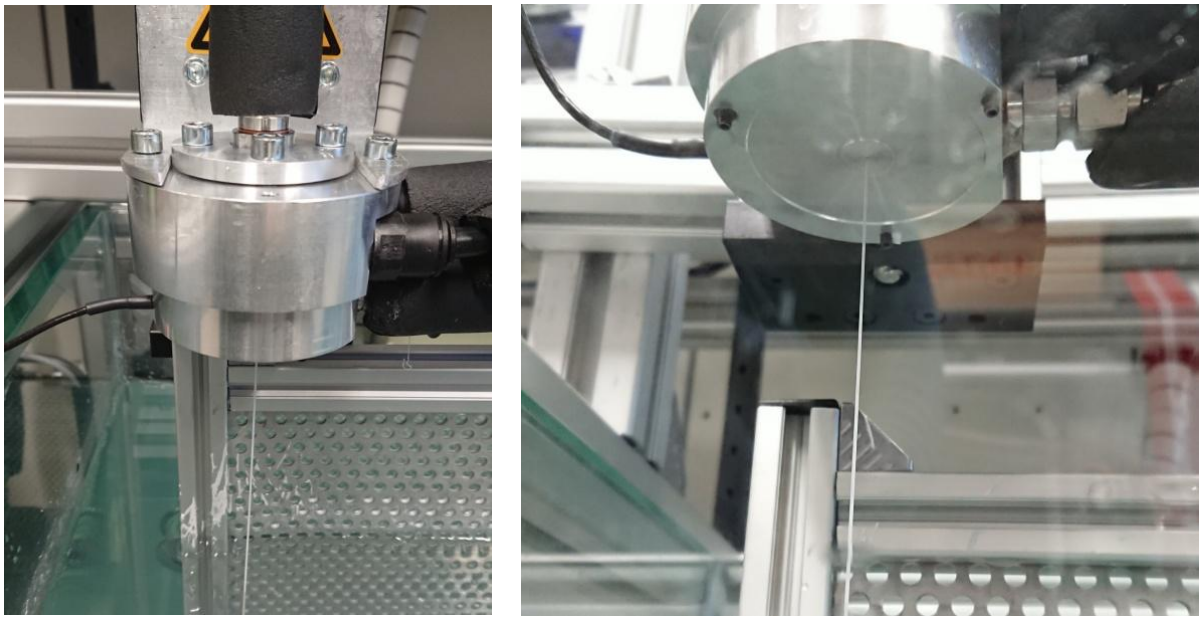


Abbildung 43: *Links – Spinndüse im Betrieb, Rechts – Extrudierte Faser beim Verlassen der Düsen-öffnung*

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

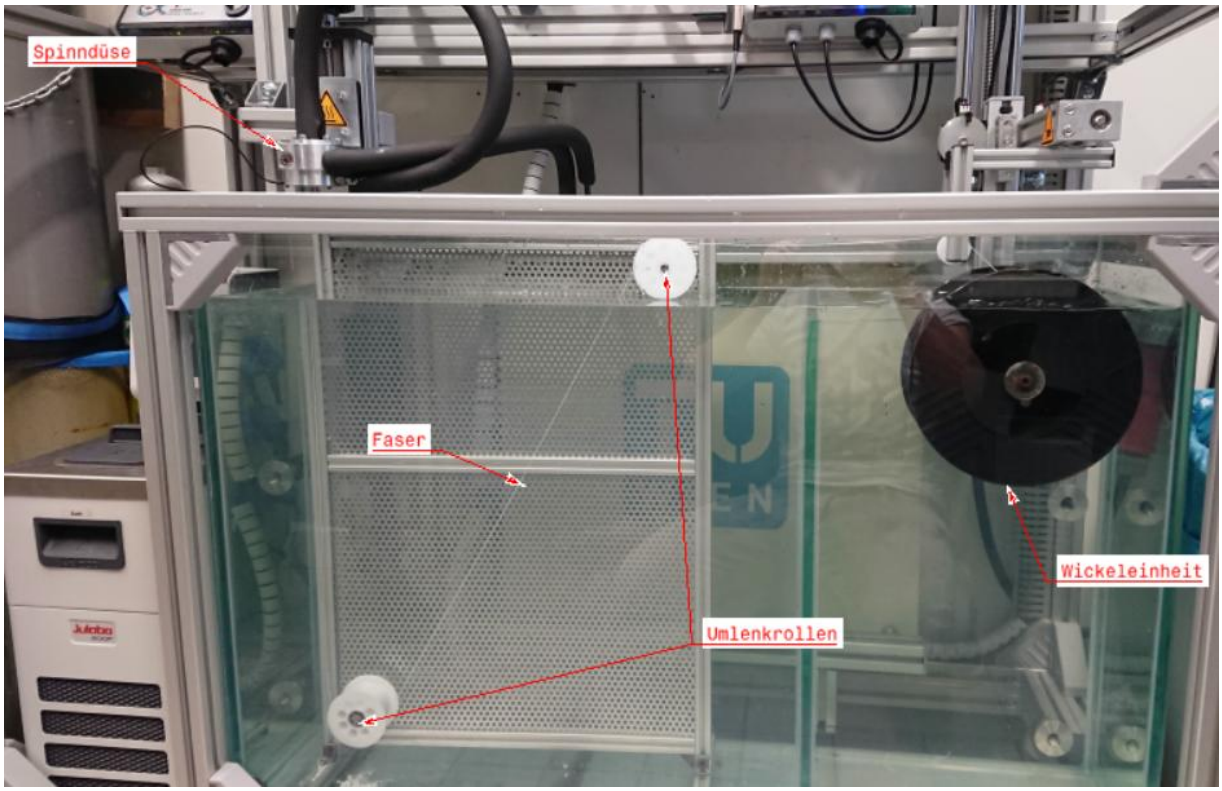


Abbildung 44: *Gesamte Anlage des Spinnprozesses mit Umlenkrollen und Wickeleinheit*

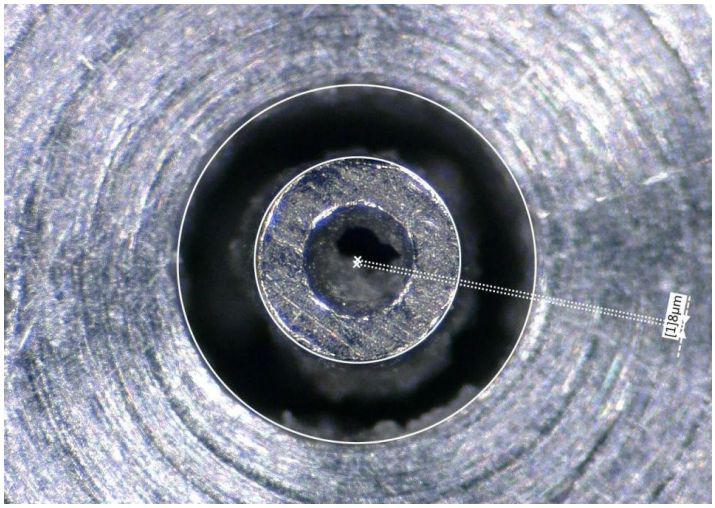


Abbildung 45: *Mikroskopische Aufnahme der Nadel-Zentrierung*

Die Temperierung der Spinndüse führte ebenfalls zu einer Beeinflussung der konzentrischen Nadelposition. Durch Erwärmung der Spinndüse beispielsweise auf 80 °C treten unterschiedliche Materialausdehnungen zwischen dem Gehäuse (Material: Aluminium) und Düsenzapfen (Material: Messing) auf.

Da Aluminium einen größeren Wärmeausdehnungskoeffizienten als Messing besitzt, kommt es zu einer Aufweitung der Fügestelle zwischen Gehäuse und Düsenzapfen. Folgende Berechnung soll dies veranschaulichen:

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Wärmeausdehnungskoeffizient von Aluminium [21]: $\alpha_{Al} = 23{,}8 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\mathrm{K}}$

Wärmeausdehnungskoeffizient von Messing [21]: $\alpha_{Me} = 18{,}5 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\mathrm{K}}$

Durchmesser der Fügestelle: $d_F = 20\ \mathrm{mm}$

Angenommene Temperatur vor Inbetriebnahme der Spinndüse: $20\ °\mathrm{C}$

Angenommene Temperatur der Spinndüse im Betrieb: $80\ °\mathrm{C}$

Temperaturdifferenz: $\Delta T = (80 - 20)\mathrm{K} = 60\ \mathrm{K}$

Differenz der Wärmeausdehnung: $\Delta_\alpha = (\alpha_{Al} - \alpha_{Me}) = 5{,}3 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\mathrm{K}}$

Aufweitung der Fügestelle: $\Delta_d = d_F \cdot \Delta T \cdot \Delta_\alpha = \mathbf{6{,}36\ \mu m}$

Eine Aufweitung der Fügestelle von mehr als 6 µm führt zu einer Beeinflussung der Hohlnadel-Konzentrizität im Düsenaustritt, aufgrund einer nicht exakten Führung des Düsenzapfens im Gehäuse. Um in weiterer Folge eine Temperatur bedingte Aufweitung zu unterbinden, ist die Verwendung einer gleichen Materialpaarung, beispielsweise Messing für Gehäuse und Düsenzapfen, sinnvoll. Trotz dieser Schwierigkeiten konnten verschiedene Testversuche durchgeführt werden, die zu einem positiven Ergebnis führten. Die Versuche zeigten die grundlegende Funktionalität der Düse hinsichtlich des Düsenaufbaus und der Düsengeometrie. Es fanden vier Testversuche (A, B, C und D) mit unterschiedlichen Betriebsparametern statt:

<u>Betriebsparameter für Versuch A:</u>

Versuch A wurde mit einer Variation der Durchflussrate des Borefluids durchgeführt (Tabelle 3), um den Einfluss auf die Hohlraumentwicklung der Faser feststellen zu können (Abbildung 46,47).

Tabelle 3: *Betriebsparameter für Versuch A*

Symbol	**Variable Betriebsparameter**	**Werte**
Q_B	Durchflussrate des Borefluids	• Versuch A.1: $0{,}059\ \mathrm{mL/min}$ • Versuch A.2: $0{,}118\ \mathrm{mL/min}$
Symbol	**Konstante Betriebsparamter**	**Werte**
Q_P	Durchflussrate der Polymerlösung	$0{,}059\ \mathrm{mL/min}$
v	Aufwickelgeschwindigkeit	$47\ \mathrm{mm/s}$
c_P	Polymerkonzentration in der Polymerlösung	$31\ \mathrm{wt.\%}$
c_B	Nichtlösungsmittelkonzentration im Borefluid	$100\ \mathrm{wt.\%}$
l	Länge des Luftspalts	$6\ \mathrm{cm}$
T_K	Temperatur des Koagulationsbades	$22\ °\mathrm{C}$
T_P	Temperatur der Polymerlösung	$65\ °\mathrm{C}$
T_S	Temperatur der Spinndüse	$65\ °\mathrm{C}$
T_B	Temperatur des Borefluids	$55\ °\mathrm{C}$

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

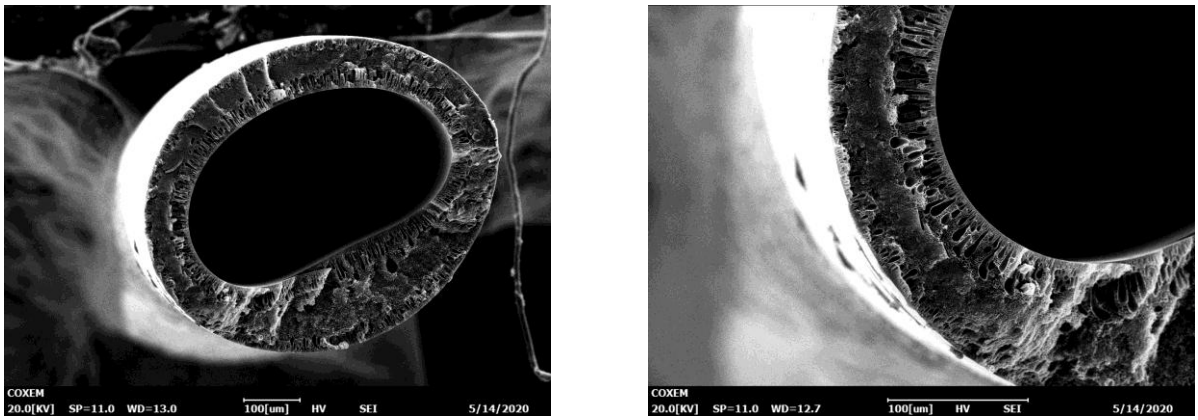


Abbildung 46: *REM-Aufnahme von Versuch A.1, Durchflussrate des Borefluids = 0,059 ml/min*

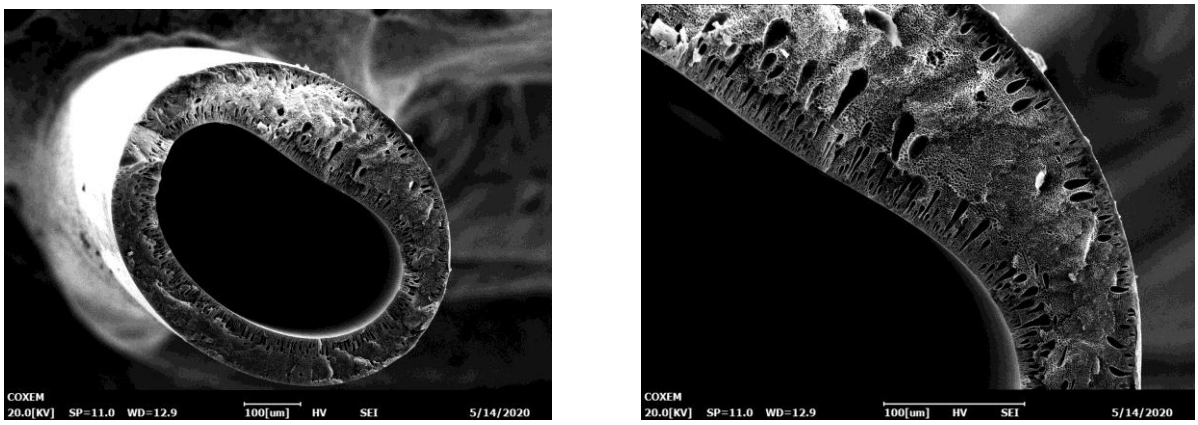


Abbildung 47: *REM-Aufnahme von Versuch A.2, Durchflussrate des Borefluids = 0,118 ml/min*

Der Versuch A veranschaulichte, dass eine Variation der Durchflussrate des Borefluids zu keiner verbesserten Ausprägung des Faserhohlraumes führte.

<u>Betriebsparameter für Versuch B:</u>

Im Versuch B wurde die Durchflussrate der Polymerlösung sowie des Borefluids variiert (Tabelle 4), um deren Einfluss auf die Ausprägung des Faserhohlraumes eruieren zu können (Abbildung 48-50).

Tabelle 4: *Betriebsparameter für Versuch B*

Symbol	Variable Betriebsparameter	Werte
Q_P	Durchflussrate der Polymerlösung	• Versuch B.1: $0{,}059\ \mathrm{mL/min}$ • Versuch B.2: $0{,}059\ \mathrm{mL/min}$ • Versuch B.3: $0{,}07\ \mathrm{mL/min}$
Q_B	Durchflussrate des Borefluids	• Versuch B.1: $0{,}059\ \mathrm{mL/min}$ • Versuch B.2: $0{,}07\ \mathrm{mL/min}$ • Versuch B.3: $0{,}07\ \mathrm{mL/min}$
v	Aufwickelgeschwindigkeit	• Versuch B.1: $58\ \mathrm{mm/s}$ • Versuch B.2: $55\ \mathrm{mm/s}$ • Versuch B.3: $56\ \mathrm{mm/s}$
Symbol	**Konstante Betriebsparameter**	**Werte**
c_P	Polymerkonzentration in der Polymerlösung	$31\ \mathrm{wt.\%}$
c_B	Nichtlösungsmittelkonzentration im Borefluid	$100\ \mathrm{wt.\%}$
l	Länge des Luftspalts	$13\ \mathrm{cm}$
T_K	Temperatur des Koagulationsbades	$22\ °\mathrm{C}$

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

T_P	Temperatur der Polymerlösung	65 °C
T_S	Temperatur der Spinndüse	65 °C
T_B	Temperatur des Borefluids	55 °C

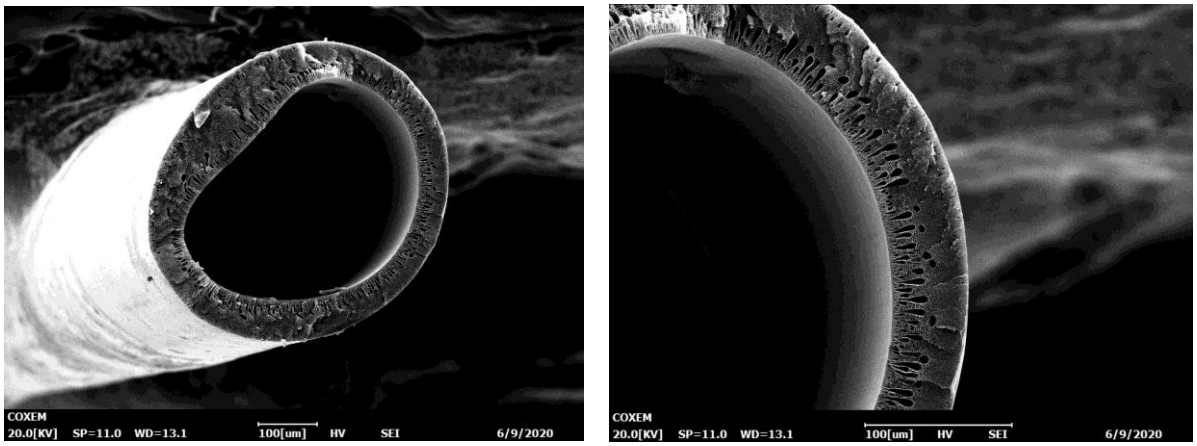


Abbildung 48: *REM-Aufnahme von Versuch B.1, Durchflussrate Polymer = 0,059 ml/min, Durchflussrate Borefluid = 0,059 ml/min*

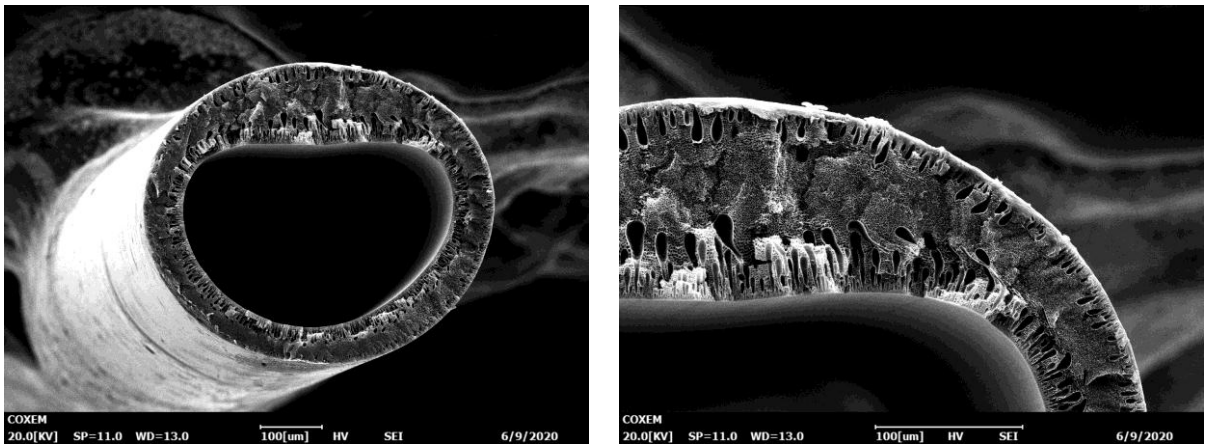


Abbildung 49: *REM-Aufnahme von Versuch B.2, Durchflussrate Polymer = 0,059 ml/min, Durchflussrate Borefluid = 0,07 ml/min*

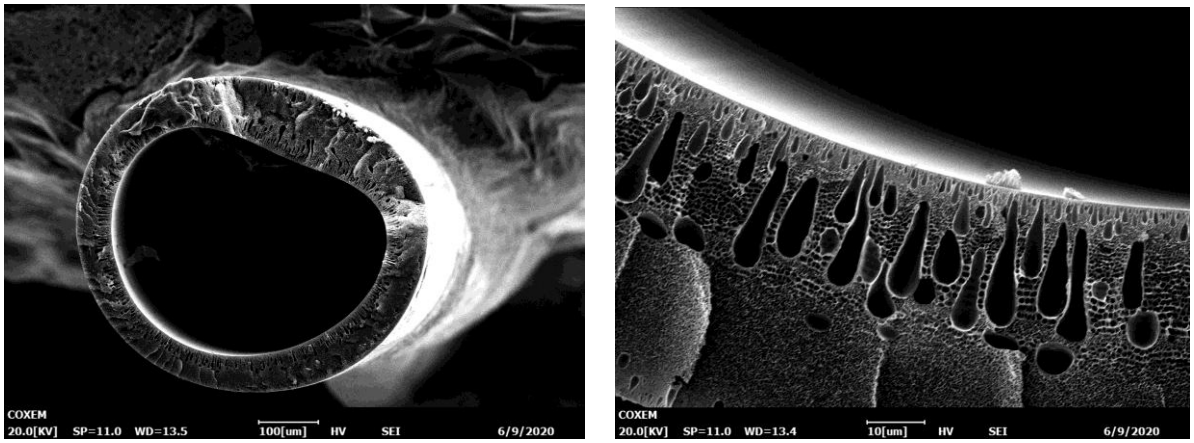


Abbildung 50: *REM-Aufnahme von Versuch B.3, Durchflussrate Polymer = 0,07 ml/min, Durchflussrate Borefluid = 0,07 ml/min*

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Der Versuch B zeigte ebenfalls keine Verbesserung in der Ausprägung des Faserhohlraumes. Auch durch Änderung der Polymer- und Borefluid-Durchflussrate ließ sich der nierenförmig ausgeprägte Hohlraum nicht beseitigen. Ein Hinweis aus folgender Literatur [29] ergab, dass diese Deformation aus dem sogenannten „Die-Swell“ Phänomen resultiert. Dabei handelt es sich um eine visko-elastische Expansion der extrudierten Faser beim Verlassen der Düsenöffnung (Abbildung 51).

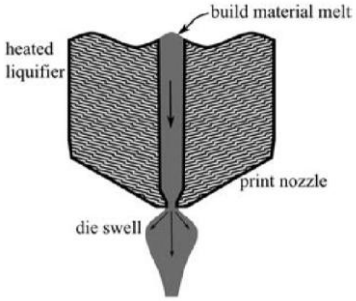


Abbildung 51: *„Die Swell“ Phänomen beim Extrudieren der Faser [30]*

Dieses auftretende Phänomen kann durch eine Erhöhung der Distanz zwischen Düsenöffnung und Fällbad (Luftspalt) sowie eine Erhöhung des Lösungsmittelanteiles NMP im Borefluid reduziert werden [29]. Um den Einfluss des Luftspalts und der Zugabe von NMP im Borefluid ersichtlich zu machen, wurden folgende Kombinationen der beiden Parameter gewählt (Tabelle 5):

- Luftspalt: 13 cm; Borefluid: Wasser/Nmp 50/50 %wt. (Abbildung 52)
- Luftspalt: 26 cm; Borefluid: Wasser/Nmp 50/50 %wt. (Abbildung 53)
- Luftspalt: 26 cm; Borefluid: Wasser 100 %wt. (Abbildung 54)
- Luftspalt: 13 cm; Borefluid: Wasser 100 %wt. (Abbildung 55)

<u>Betriebsparameter für Versuch C:</u>

Tabelle 5: *Betriebsparameter für Versuch C*

Symbol	Variable Betriebsparameter	Werte
c_B	Nichtlösungsmittelkonzentration im Borefluid	• Versuch C.1: 50/50 %wt • Versuch C.2: 50/50 %wt • Versuch C.3: 100 %wt • Versuch C.4: 100 % wt
l	Länge des Luftspalts	• Versuch C.1: 13 cm • Versuch C.2: 26 cm • Versuch C.3: 26 cm • Versuch C.4: 13 cm
v	Aufwickelgeschwindigkeit	• Versuch C.1: 51 mm/s • Versuch C.2: 59 mm/s • Versuch C.3: 61 mm/s • Versuch C.4: 59 mm/s
Symbol	**Konstante Betriebsparameter**	**Werte**
Q_P	Durchflussrate der Polymerlösung	0,059 mL/min
Q_B	Durchflussrate des Borefluids	0,059 mL/min
c_P	Polymerkonzentration in der Polymerlösung	31 wt. %
T_K	Temperatur des Koagulationsbades	22 °C

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

T_P	Temperatur der Polymerlösung	65 °C
T_S	Temperatur der Spinndüse	65 °C
T_B	Temperatur des Borefluids	55 °C

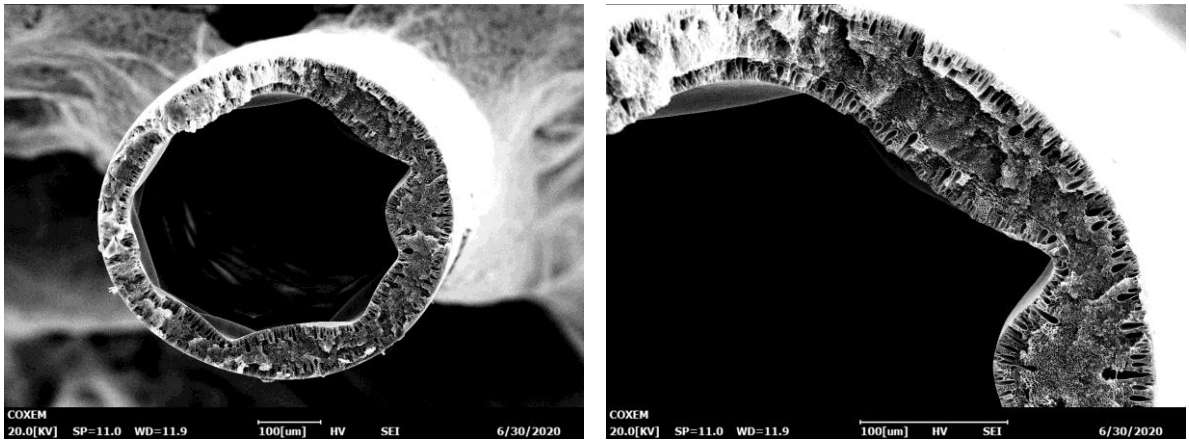


Abbildung 52: *REM-Aufnahme von Versuch C.1 – Luftspalt = 13 cm; Wasser/Nmp 50/50 wt%*

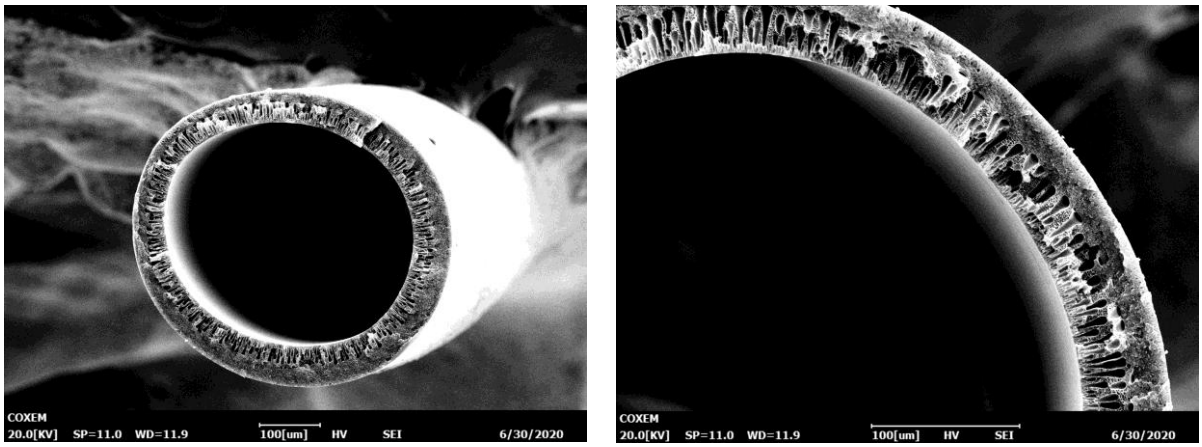


Abbildung 53: *REM-Aufnahme von Versuch C.2 – Luftspalt = 26 cm; Wasser/Nmp 50/50 wt%*

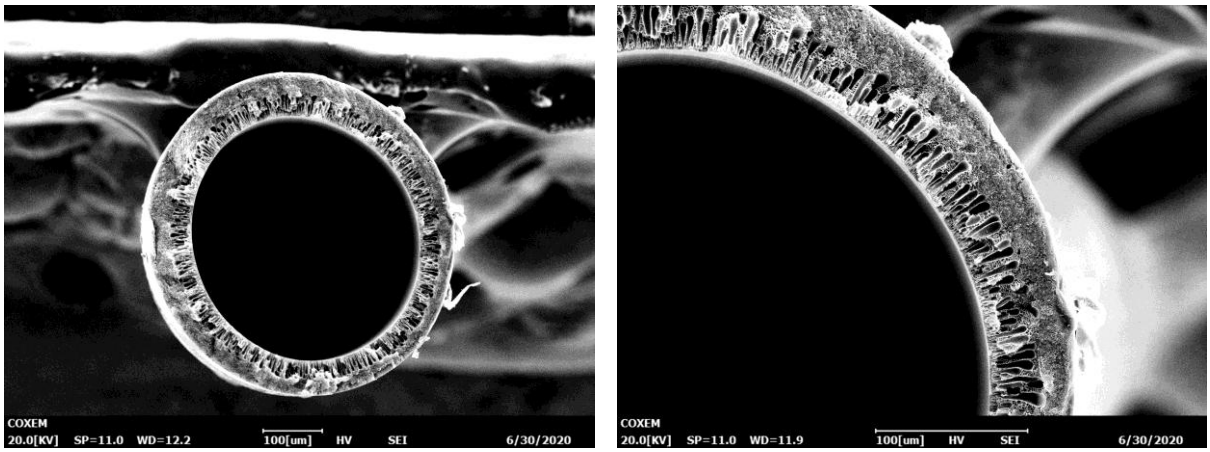


Abbildung 54: *REM-Aufnahme von Versuch C.3 – Luftspalt=26 cm; Wasser 100 %wt*

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

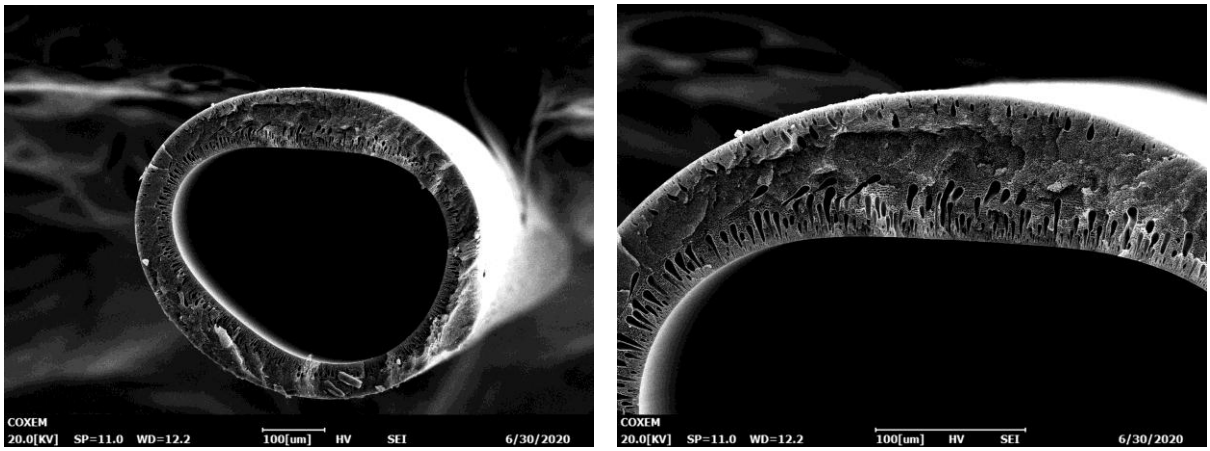


Abbildung 55: *REM-Aufnahme von Versuch C.4 – Luftspalt=13 cm; Wasser 100 %wt*

Der Versuch C lässt sich eindeutig erkennen, dass eine Erhöhung des Luftspalts zu einer verbesserten Ausprägung des Faserhohlraumes führt, wohingegen die Zugabe von Lösungsmittel NMP im Borefluid (Lösungsmittel + Nichtlösungsmittel) eine wellenartige Struktur ausbildet. Die Erhöhung des Luftspalts hat sich somit als entscheidende Variante zur vollen Ausprägung des Faserhohlraumes erwiesen.

Um den Einfluss der Temperatur der Polymerlösung auf die Porengröße feststellen zu können, wird diese im Versuch D variiert (Abbildung 56-59) (Tabelle 6).

<u>Betriebsparameter für Versuch D:</u>

Tabelle 6: *Betriebsparameter für Versuch D*

Symbol	Variable Betriebsparameter	Werte
T_P	Temperatur der Polymerlösung	• Versuch D.1: 30 °C • Versuch D.2: 40 °C • Versuch D.3: 50 °C • Versuch D.4: 60 °C
v	Aufwickelgeschwindigkeit	• Versuch D.1: 56 mm/s • Versuch D.2: 58 mm/s • Versuch D.3: 63 mm/s • Versuch D.4: 75 mm/s
Symbol	**Konstante Betriebsparameter**	**Werte**
Q_P	Durchflussrate der Polymerlösung	0,059 mL/min
Q_B	Durchflussrate des Borefluids	0,059 mL/min
c_P	Polymerkonzentration in der Polymerlösung	25 wt. %
c_B	Nichtlösungsmittelkonzentration im Borefluid	100 wt. %
T_K	Temperatur des Koagulationsbades	22 °C
T_B	Temperatur des Borefluids	50 °C
l	Länge des Luftspalts	26 cm

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

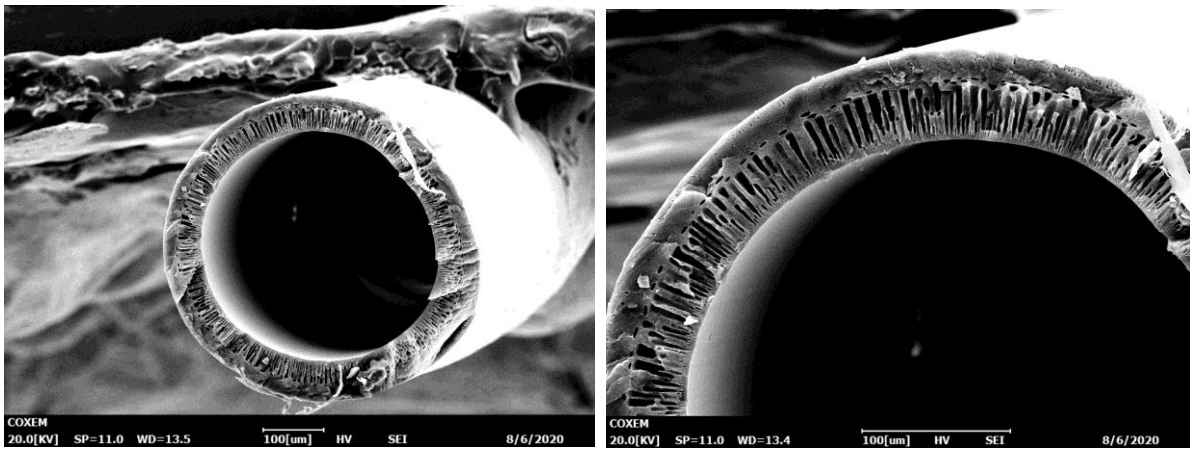


Abbildung 56: *REM-Aufnahme von Versuch D.1 – Temperatur der Polymerlösung: 30 °C*

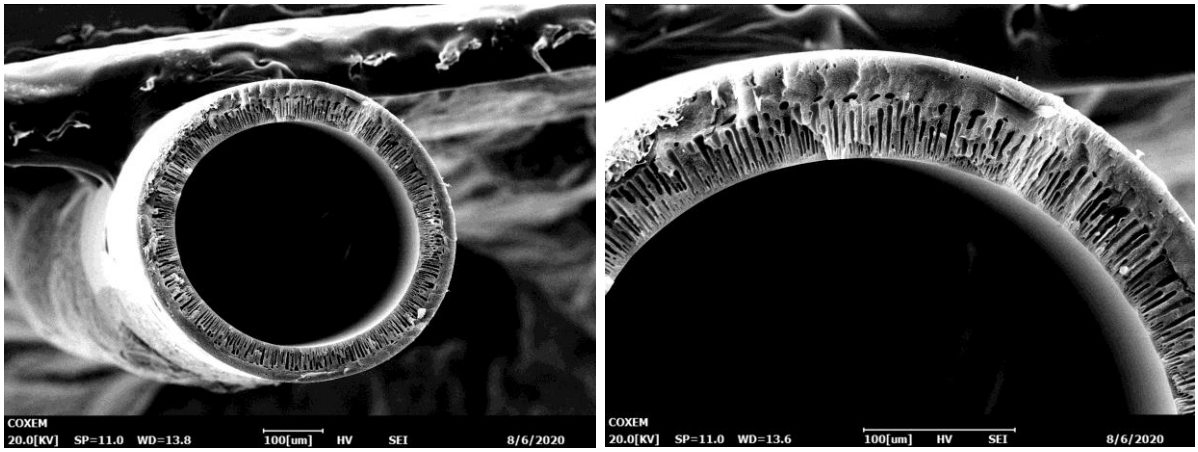


Abbildung 57: *REM-Aufnahme von Versuch D.2 – Temperatur der Polymerlösung: 40 °C*

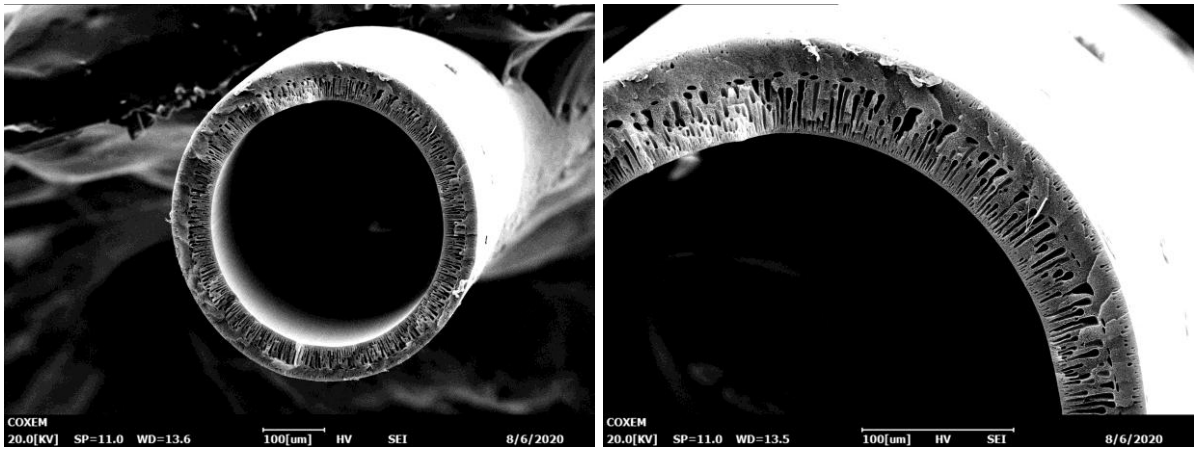


Abbildung 58: *REM-Aufnahme von Versuch D.3 – Temperatur der Polymerlösung: 50 °C*

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

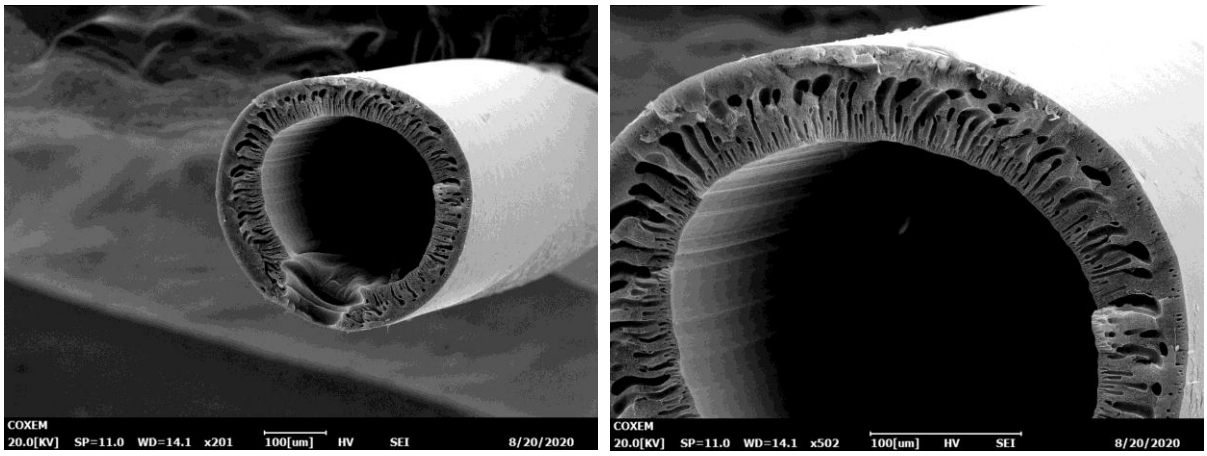


Abbildung 59: *REM-Aufnahme von Versuch D.4 – Temperatur der Polymerlösung: 60 °C*

Der Versuch D zeigt, dass mit zunehmender Temperatur der Polymerlösung (insbesondere bei 60 °C) die Porengröße zunimmt.

6.2.4 Optimierungsmaßnahmen

Für die nächste Entwicklungsversion sind folgende Optimierungsmaßnahmen durchzuführen:

- Verwendung von Messing für Gehäuse und Düsenzapfen, um eine Temperatur bedingte Aufweitung der Fügestelle zu vermeiden.
- Hinzunahme von Vermessungs- und Justierungstechniken in der Spinndüsenfertigung, um eine schnellere und einfachere konzentrische Positionierung der Hohlnadel zu erzielen.
- Wahl einer Alternative zur Verklebung der Hohlnadel im Düsenzapfen, da eine Unverträglichkeit des verwendeten Klebers vom Typ Loctite 638 (Henkel AG, Deutschland) gegenüber dem in der Polymerlösung befindlichen Lösungsmittel NMP auftrat, die zu einer Lockerung der Verbindung führte.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

6.3 Spinndüse – Typ 3

Dieses Kapitel veranschaulicht den Aufbau, die Fertigung sowie Versuchsdurchführung der Spinndüse vom Typ 3.

6.3.1 Aufbau der Spinndüse

Das Gehäuse der Spinndüse wird in zwei Komponenten, einen Wärmemantel und einen Düsensitz unterteilt (Abbildung 60). Der Wärmemantel ermöglicht mittels Einspeisen von Heizwasser die Spinndüsen-Temperierung analog zu der in Typ-1 und Typ-2 verwendeten Systematik. Der Düsensitz beinhaltet:

- einen Anschluss für die Zufuhr der Polymerlösung
- eine Bohrung für den Düsenaustritt
- eine Verbindungsstelle zum Fügen des Düsenzapfens
- einen Anschluss für ein Thermoelement

Mittels der Gehäuse-Assemblierung lassen sich folgende Vorteile erzielen:

- Durch den adaptierbaren Wärmemantel entfällt dessen Fertigung für weitere Modelle, was zu einer einfacheren und schnelleren Fertigung führt.
- Material- und Kosteneinsparungen aufgrund der einmaligen Fertigung des Wärmemantels.
- Vereinfachte Reinigung der Füllkammer nach dem Betrieb, aufgrund der nun besseren Zugänglichkeit.
- Eine für den Reinigungsprozess notwendige Demontage der Heizwasser-Anschlüsse sowie der Verschlussschraube entfällt, da nun nur der Düsensitz und nicht der ganze Düsenkörper in das Lösungsmittel NMP eingelegt werden muss. Dies begünstigt die Schonung der Gewindebereiche.

Um die im vorherigen Kapitel auftretende Problematik der Zentrierung aufgrund von Fertigungsungenauigkeiten sowie den unterschiedlichen Materialausdehnungen, welche im temperierten Zustand der Spinndüse zwischen Gehäuse und Düsenzapfen auftreten, zu beheben, werden folgende Maßnahmen getroffen:

- Zur Erzielung einer verbesserten konzentrischen Nadelposition im Düsenausgang sind folgenden Bearbeitungsschritte sowie Justierungsmaßnahmen notwendig: (1) Rundlaufmessung des Spannfutters sowie dessen Justierung bei vorhandener Rundlaufungenauigkeit; (2) Ausdrehen des Spannfutters, um eine durch wechselseitige Bearbeitung des Werkstückes resultierende Exzentrizität zu minimieren; (3) Verwendung eines präzisen Bohrspannfutters für den Reitstock, um eine beim Bohren des Düsenloches resultierende Exzentrizität zu reduzieren.
- Konstruktion einer kegelförmigen Kontaktfläche zwischen Düsenzapfen und Düsensitz soll einerseits die konzentrische Position der Hohlnadel beim Zusammenführen der beiden Komponenten verbessern und andererseits als Dichtung fungieren. (Abbildung 60).

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

- Verwendung gleicher Werkstoffmaterialien für den Düsensitz und Düsenzapfen (Messing/Messing), um unterschiedliche Wärmeausdehnungen und eine daraus resultierende Aufweitung des Fügesitzes zu unterbinden.

Ebenso ist eine Verlängerung des Düsenzapfens im Bereich des Borefluid-Anschlusses vorzusehen, um durch eine verbesserte Zugänglichkeit die Montage zu vereinfachen (Abbildung 60).

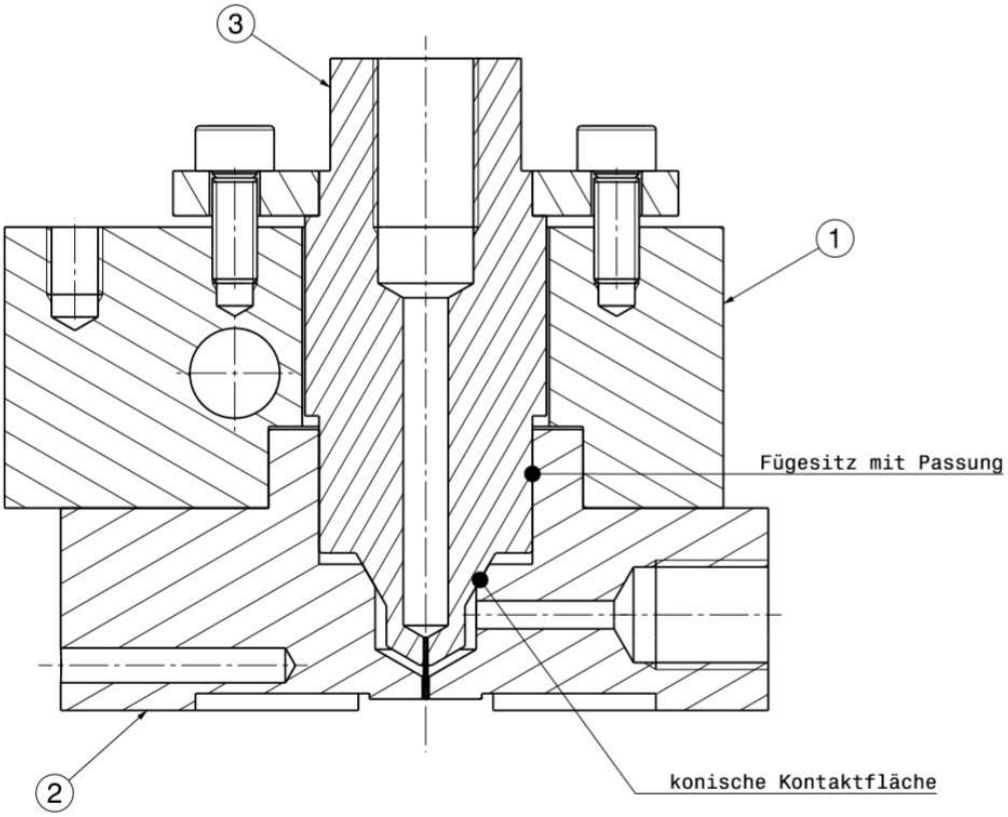


Abbildung 60: *Spinndüse Typ 3 mit geteiltem Gehäuse; (1) Wärmemantel, (2) Düsensitz mit Polymer-Zufuhr, (3) Düsenzapfen mit verlängertem Anschlussbereich zu besseren Montage des Borefluid-Anschlusses*

Die Fixierung des Wärmemantels mit dem Düsensitz erfolgt durch zwei M5 Innen-Sechskantschrauben. Darüber hinaus wird die Kontaktfläche der beiden Komponenten vor dem Zusammenbau mittels einer Wärmepaste bestrichen, um einen ungestörten Wärmeübergang vom Wärmemantel auf den Düsensitz zu ermöglichen. Die Fügung des Düsenzapfens mit dem Düsensitz erfolgt weiterhin mittels Übergangspassung analog zum Typ-1 und Typ-2, jedoch wird hier durch eine zusätzliche konische Kontaktfläche eine verbesserte Zentrierung der Hohlnadel erreicht. Desweiteren fungiert die konische Kontaktfläche als metallische Dichtung. Damit entfällt weiters eine Verträglichkeitsüberprüfung der Dichtung bei Verwendung diverser Lösungsmittel.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Zur Wahl einer alternativen Verbindung von Hohlnadel und Düsenzapfen fanden folgende Versuche statt:

- Verlöten der Nadel mit dem Düsenzapfen mittels Weichlöt-Verfahren: Die Nadel wurde im Düsenzapfen eingesetzt und das Lot gleichmäßig um den Nadelansatz aufgetragen. Um die Verträglichkeit mit dem Lösungsmittel zu testen, wurde der Düsenzapfen mit eingelöteter Nadel 24 Stunden in NMP eingelegt. Nach Beendigung des Versuches war jedoch eine Lösung der Verbindung zu bemerken (Abbildung 61).

Abbildung 61: *Lötversuch*

- Verlöten der Nadel mittels Hartlöt-Verfahren: Die für das Verfahren benötigte hohe Verarbeitungstemperatur (ca. 500 °C) führt zu einer Beschädigung der Nadel, womit dieser Versuch zu keinem brauchbaren Ergebnis führte.
- Befestigung der Nadel mittels Madenschrauben: Die Nadel wurde im Düsenzapfen eingeführt und beidseitig mit jeweils einer Madenschraube fixiert. Die Fixierung der Nadel erwies sich als stabil. Durch Entfall des Klebers traten jedoch Undichtheiten im Bereich der Fügung von Nadel und Düsenzapfen auf. Dichtheit im Fügebereich ist jedoch von hoher Wichtigkeit, denn das Ausströmen von Borefluid in die Füllkammer führt aufgrund des Kontakts mit der Polymerlösung zu einer Phasenseparation. Die Folge wäre ein Verschließen der Düsenöffnung sowie ein Abbruch des Spinnversuches. Desweiteren konnte keine geeignete Methode zum Abdichten des Fügesitzes gefunden werden (Abbildung 62).

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

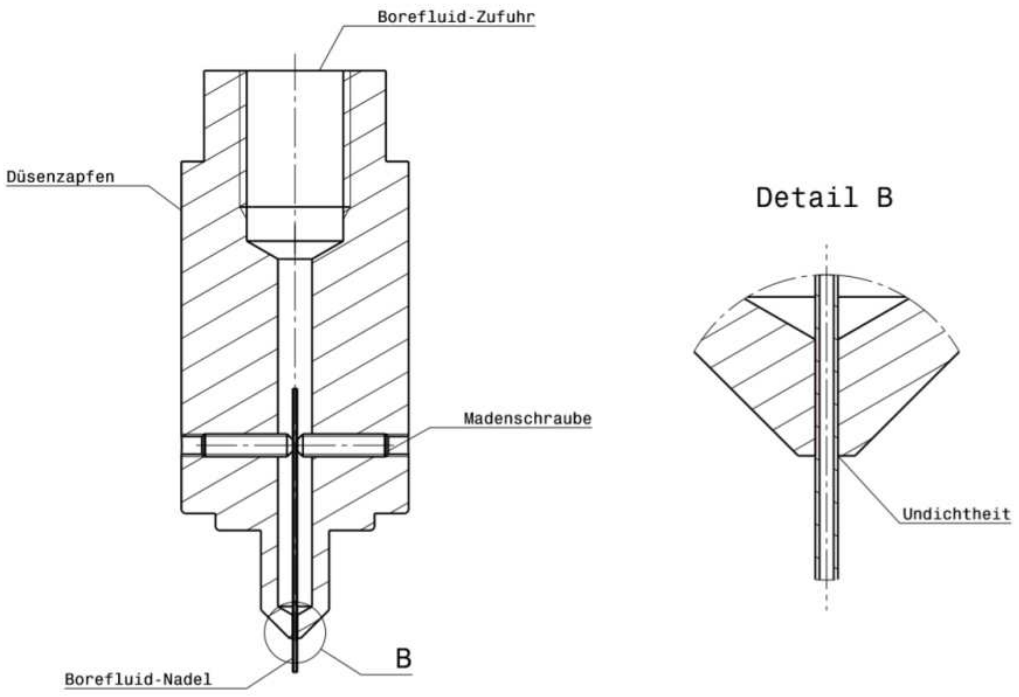


Abbildung 62: *Eingeführte Nadel mit beidseitiger Befestigung mittels Madenschrauben, Austreten von Borefluid im Bereich der Fügestelle*

- Fügen mittels Wärme: Der Fügestiz wurde mit einem 0,39 mm-Bohrer vorgebohrt. Danach erfolgte die Aufweitung der Bohrung über eine Miniaturreibahle bis zum Erreichen eines leichten Presssitzes. Anschließend wurde der Düsenzapfen mittels Gasflamme erhitzt. Trotz längerem Erhitzen war keine Fügung zu erzielen.
- Fügen durch Einpressen der Nadel: Wiederum wurde die Fügestelle durch Verwendung eines 0,39 mm-Bohrers vorgebohrt und mittels einer Miniaturreibahle aufgeweitet, bis das Einführen der Nadel unter Druck möglich war. Ein zu geringer Presssitz führt jedoch zu einer einfachen Aufweitung des Loches, womit eine dauerhafte Fixierung der Nadel verloren ging. Eine zu starke Pressverbindung hingegen führt zu einer Verformung der Nadel, wodurch dieser Versuch zu keinem positiven Ergebnis führte.
- Herstellung einer Klebeverbindung mittels eines 2K-Epoxidharz Klebers: Die Verbindung erwies keine ausreichende Resistenz gegenüber dem Lösungsmittel NMP.

Eine weitere Überlegung war die Verbindung der Hohlnadel mit dem Düsenzapfen mittels eines verschraubbarem Adapters herzustellen (Abbildung 63). Diese Adapter finden beispielsweise in der Labor- und Medizintechnik Anwendung, um Kapillaren mit einer Injektionsvorrichtung oder Kapillaren unterschiedlicher Größen verbinden zu können. Zu befürchten ist jedoch die fehlende Fertigungsgenauigkeit dieser Komponenten wodurch mit einer erschwerten Zentrierung der Hohlnadel zu rechnen ist. Generell ist ein Düsenaufbau bestehend aus weniger ineinandergefügten Kompo-

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek WIEN Your knowledge hub

nenten zu priorisieren, da mit zunehmender Bauteilkomplexität auch die Schwierigkeit der Zen-trierung steigt.

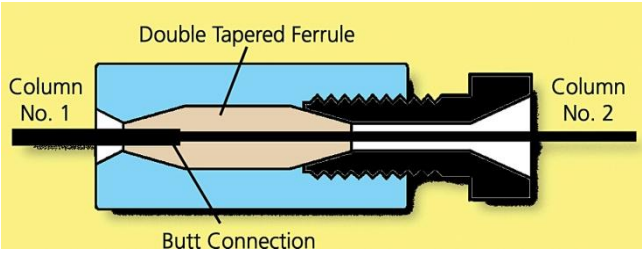


Abbildung 63: *Kanülen-Adapter der Firma Supelco*

Da bis jetzt keine funktionierende Alternative zum Kleben gefunden werden konnte, findet weiterhin eine Verklebung der Hohlnadel mit dem Düsenzapfen statt. Dabei wurde jedoch eine Kombination aus leichter Pressverbindung (sodass ein Fügen der Hohlnadel per Hand möglich ist) und Klebstoff gewählt, um aufgrund des minimierten Fügespalts ein Vordringen des Lösungsmittels NMP zu erschweren. Um die Resistenz der Klebe-Pressverbindung gegenüber dem Lösungsmittel NMP abschätzen zu können, wurde der Düsenzapfen mit eingeklebter Hohlnadel über einen Zeitraum von einer Woche bei Raumtemperatur in das Lösungsmittel NMP eingelegt. Ein Lösen der Fügestelle nach Beendung des Versuches konnte nicht bemerkt werden, womit die Kombination aus leichtem Presssitz und Klebstoff gegenüber der reinen Klebeverbindung zu einer Festigkeitserhöhung führte. Welchen Einfluss jedoch das in der Polymerlösung befindliche Lösungsmittel NMP im Temperaturbereich des Spinndüsenbetriebes (45 – 80 °C) auf die Haltbarkeit der Verbindung hat, kann nur mittels Durchführung weiterer Spinndüsentests eruiert werden.

6.3.2 Fertigung und Assemblierung

Die Fertigung wurde in der Gemeinschaftswerkstätte der Technischen Chemie an der Technischen Universität Wien durchgeführt (Abbildung 64, 65). Dabei kamen die in Kapitel 6.3.1 erwähnten Vermessungs- und Justierungsmaßnahmen zum Einsatz, damit eine möglichst genaue Zentrierung der Hohlnadel im Düsenausgang erreicht werden kann. Darüber hinaus fand eine Assemblierung des Düsengehäuses in zwei Komponenten (Wärmeeinheit und Düsensitz) statt. Die Präzisionsteile wie Düsenzapfen und Düsensitz wurden nun aus Messing gefertigt, um eine durch Temperatur induzierte Aufweitung des Fügesitzes zu unterbinden. Für den Wärmemantel kam weiterhin Aluminium zum Einsatz. Um eine Störung des Wärmeüberganges zwischen Wärmemantel und Düsensitz zu verhindern, kann die Verwendung einer Wärmeleitfolie (alternativ Wärmeleitpaste) in der Kontaktfläche der beiden verschraubten Komponenten Abhilfe schaffen. Die Fügung der Hohlnadel mit dem Düsenzapfen erfolgt wie bereit in Kapitel 6.3.1 erwähnt mittels einer Klebe-Pressverbindung. Somit wird das Vordringen des Lösungsmittels NMP im Fügespalt erschwert, wodurch eine erhöhte Festigkeit der Verbindung resultiert.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

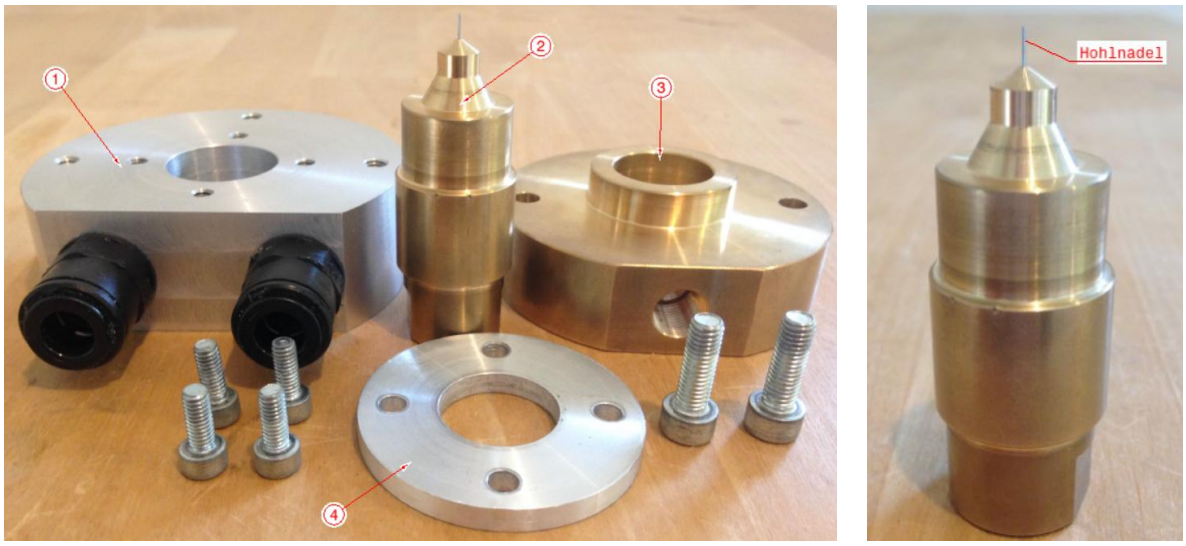


Abbildung 64: *Links - Einzelteile der Spinndüse vom Typ-3 – (1) Wärmemantel, (2) Düsenzapfen, (3) Düsensitz und (4) Befestigungsdeckel); Rechts – Düsenzapfen mit integrierter Hohlnadel*

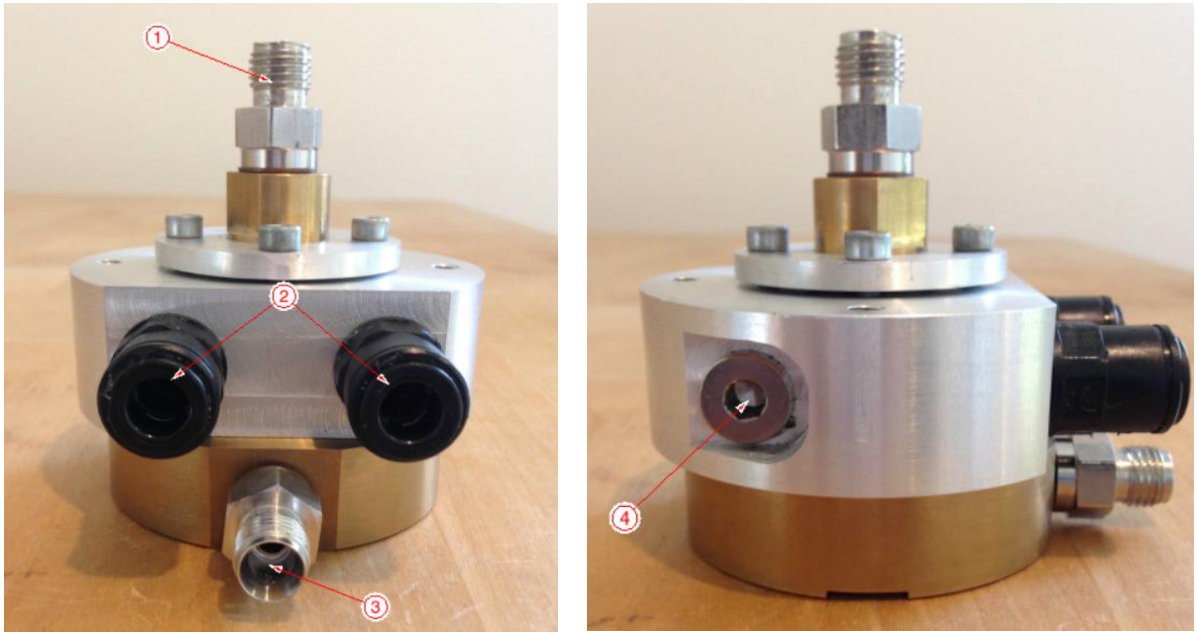


Abbildung 65: *Spinndüse Typ-3 im zusammengebauten Zustand mit Anschlüssen – (1) Anschluss für die Borefluid-Zufuhr, (2) Anschlüsse für die Heizwasser Zu- und Abfuhr, (3) Anschluss für die Zufuhr der Polymerlösung, (4) Verschlussschraube*

6.3.3 Versuchsdurchführung

Die konzentrische Positionierung der Hohlnadel konnte aufgrund der erhöhten Fertigungsgenauigkeit leichter erzielt werden. Der Vorteil lag somit im schnelleren Zusammenbau der Spinndüse (Abbildung 66). Darüber hinaus erfolgte ein ungestörter Wärmeübergang vom Wärmemantel auf den Düsensitz und die konische Kontaktfläche zwischen Düsenzapfen und Düsensitz erfüllte ihren Zweck als Dichtung. Auch

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

war nach der Versuchsdurchführung (Abbildung 67, 68), aufgrund der Assemblierung des Gehäuses, eine schnellere und effizientere Reinigung der Füllkammer, der Düsenöffnung sowie der Polymer-Zufuhr durchzuführen.

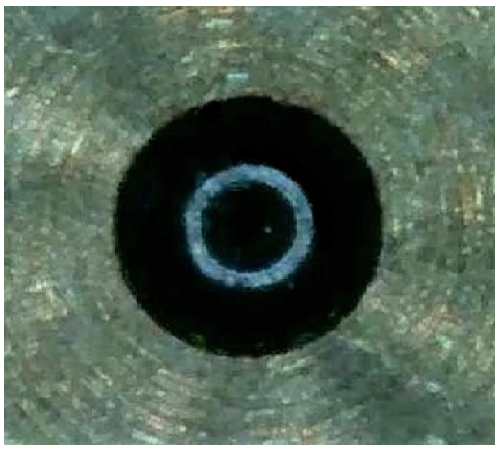


Abbildung 66: *Konzentrische Position der Hohlnadel im Düsenaustritt*

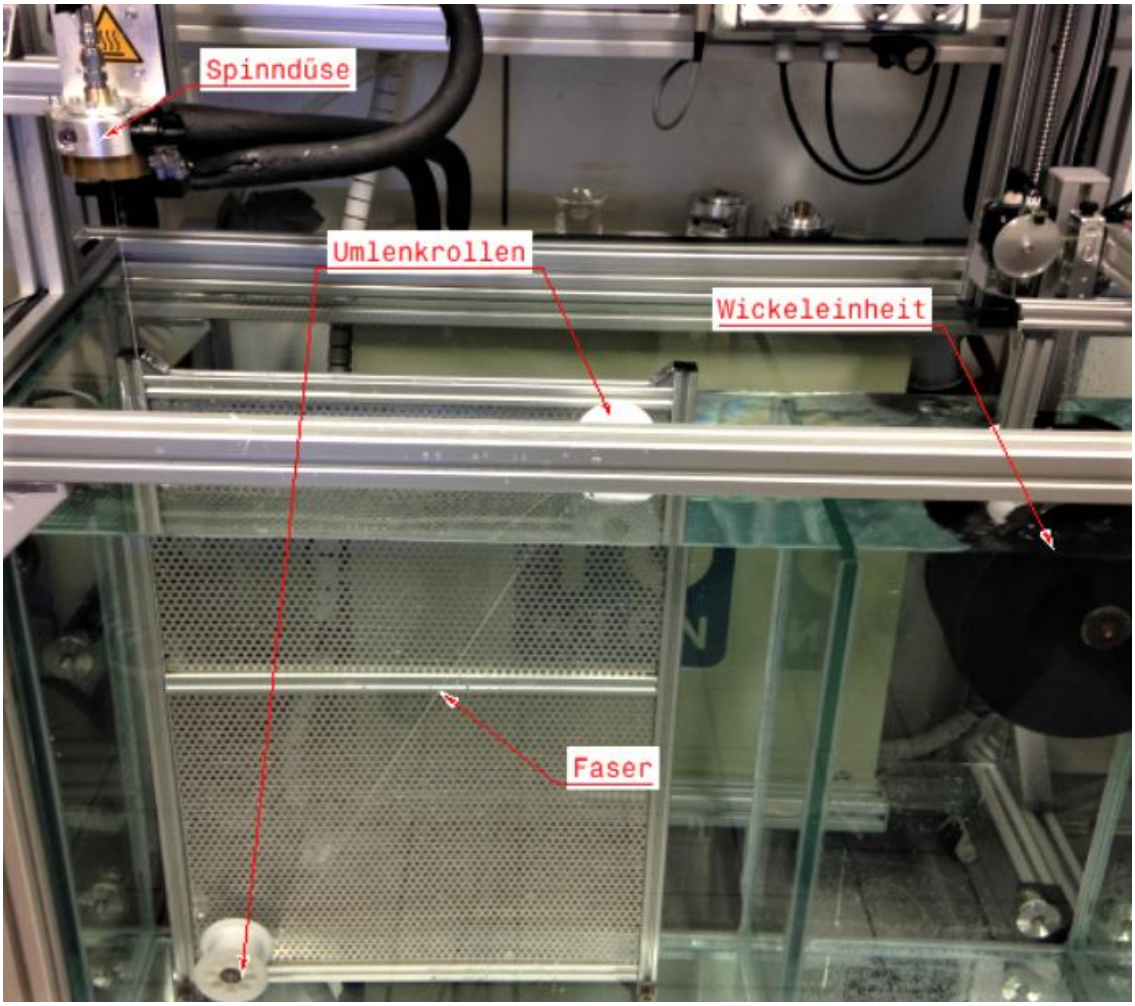
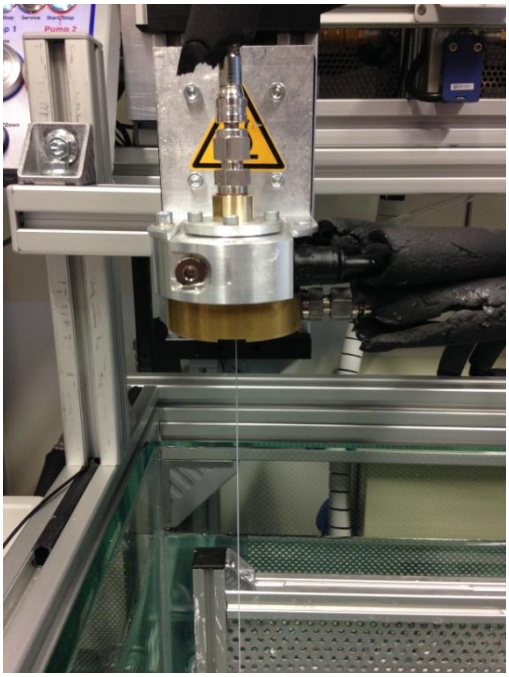


Abbildung 67: *Versuchsdurchführung mit Spinndüse, Umlenkrollen und Wickeleinheit*

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN



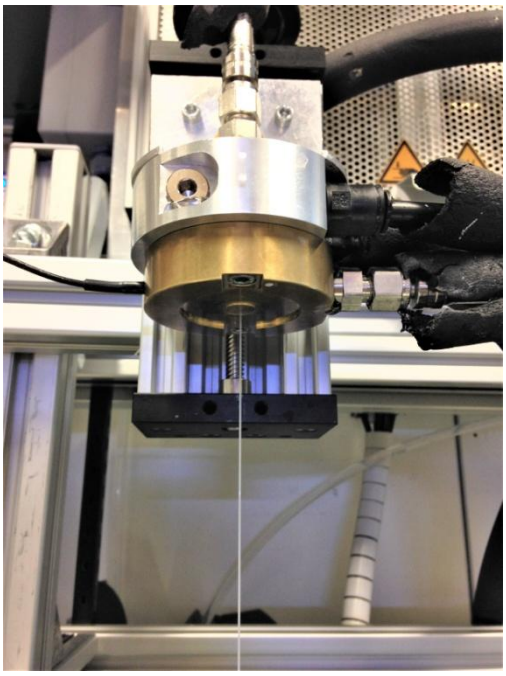


Abbildung 68: *Links – Spinndüse im Betrieb; Rechts – Extrudierte Faser beim Verlassen der Düsenöffnung*

Mit Typ 3 wurden zwei Testversuche (Versuch A und B) durchgeführt. Für Versuch A wurde ein 23 w% PES/NMP-Gemisch verwendet und durch Variation des Luftspalts die Auswirkungen auf die Porenstruktur untersucht (Abbildung 69 – 71). Versuch B fand mit einem 25 w% PLA/NMP Gemisch statt, um durch Variation des zugeführten Polymers die Auswirkung auf die Membranstruktur zu untersuchen (Abbildung 72).

Für Versuch A wurden die in Tabelle 7 angeführten Prozessparameter herangezogen:

Tabelle 7: Betriebsparameter für Versuch A

Symbol	**Variable Betriebsparameter**	**Werte**
l	Länge des Luftspalts	• A.1 : 26 cm • A.2 : 13 cm • A.3 : 6,5 cm
Symbol	**Konstante Betriebsparameter**	**Werte**
Q_P	Durchflussrate der Polymerlösung	0,059 mL/min
Q_B	Durchflussrate des Borefluids	0,059 mL/min
c_P	Polymerkonzentration in der Polymerlösung	23 wt. %
c_B	Nichtlösungsmittelkonzentration im Borefluid	100 wt. %
T_P	Temperatur der Polymerlösung	40 °C
T_B	Temperatur des Borefluids	50 °C
T_K	Temperatur des Koagulationsbades	22 °C
v	Aufwickelgeschwindigkeit	73 mm/s

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

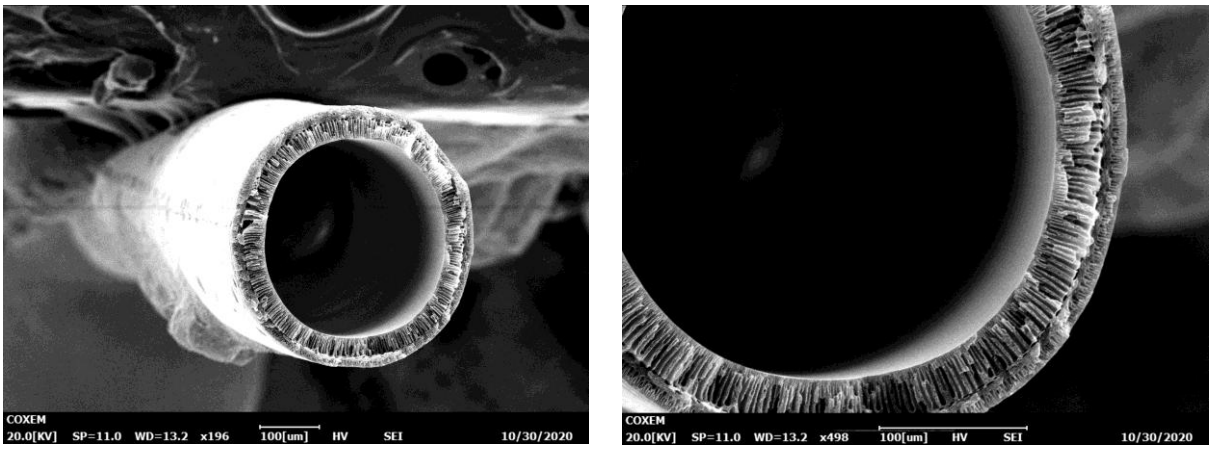


Abbildung 69: *REM-Aufnahme von Versuch A.1 – Länge des Luftspalts: 26 cm*

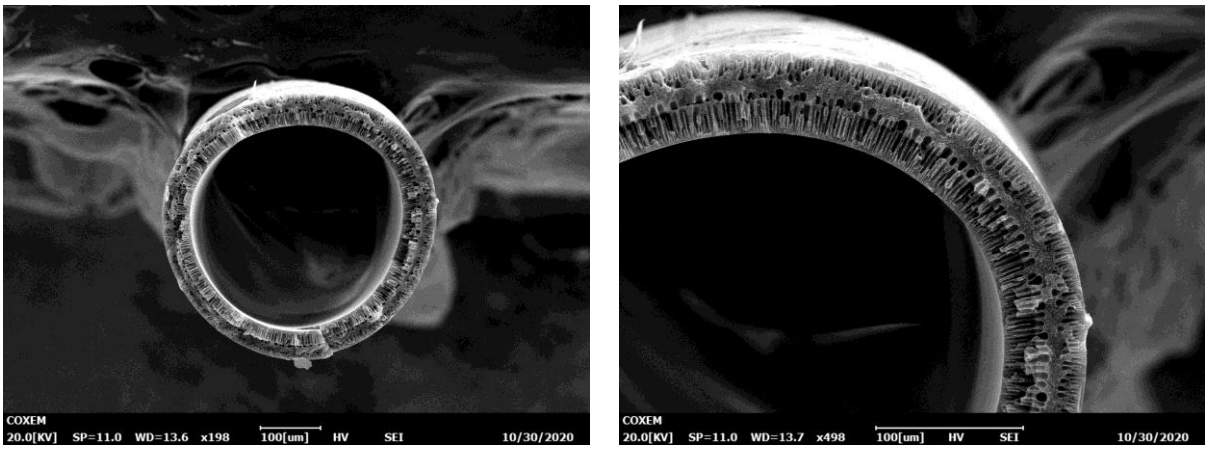


Abbildung 70: *REM-Aufnahme von Versuch A.2 – Länge des Luftspalts: 13 cm*

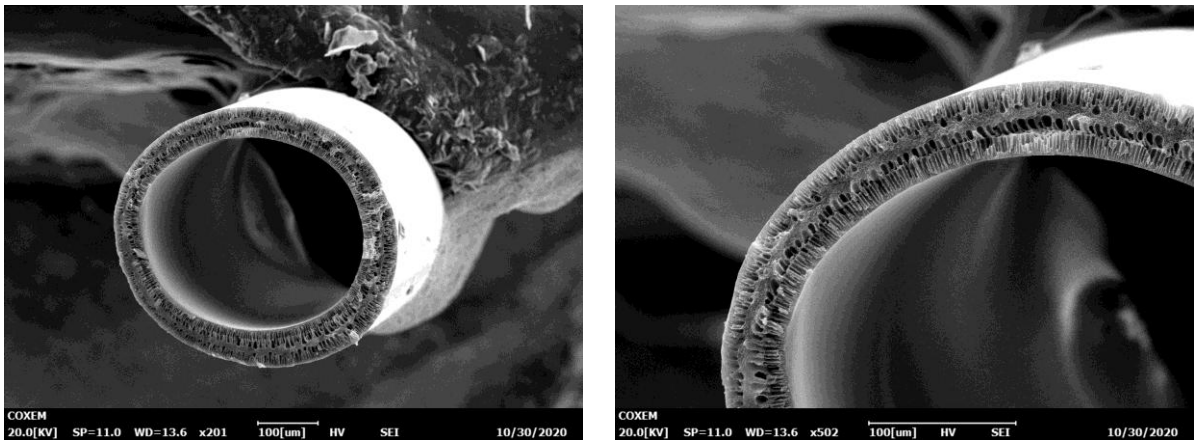


Abbildung 71: *REM-Aufnahme von Versuch A.3 – Länge des Luftspalts: 6,5 cm*

Versuch A zeigte, dass mit den in Tabelle 7 genannten Prozessparametern und einer Abnahme des Luftspalts, eine Zunahme von Makroporen in der Membranschicht resultiert.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

Für Versuch B wurden die in Tabelle 8 angeführten Prozessparameter herangezogen:

Tabelle 8: *Betriebsparameter für Versuch B*

Symbol	Konstante Betriebsparameter	Werte
Q_P	Durchflussrate der Polymerlösung	$0{,}059\ \mathrm{mL/min}$
Q_B	Durchflussrate des Borefluids	$0{,}059\ \mathrm{mL/min}$
c_P	Polymerkonzentration in der Polymerlösung	$25\ \mathrm{wt.\%}$
c_B	Nichtlösungsmittelkonzentration im Borefluid	$100\ \mathrm{wt.\%}$
T_P	Temperatur der Polymerlösung	$80\ °C$
T_B	Temperatur des Borefluids	$50\ °C$
T_K	Temperatur des Koagulationsbades	$22\ °C$
l	Länge des Luftspalts	$13\ \mathrm{cm}$
v	Aufwickelgeschwindigkeit	$86\ \mathrm{mm/s}$

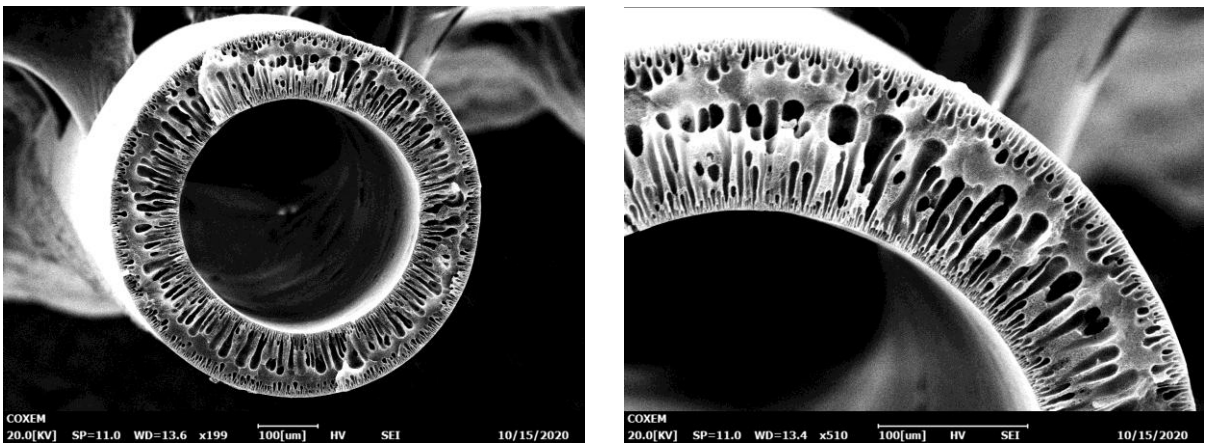


Abbildung 72: *REM-Aufnahme Versuchs B – Temperatur der Polymerlösung: 80 °C*

Mit der vorhin definierten Zusammensetzung der Polymerlösung sowie den herangezogenen Prozessparametern aus Tabelle 8, ließ sich eine Hohlfasermembran mit mehrheitlich ausgebildeten Makroporen in der Membranschicht herstellen.

6.3.4 Optimierungsmaßnahmen

Für weitere Modelle sollten folgende Optimierungsmaßnahmen berücksichtigt werden:

- Verlängerung des Fügesitzes im Bereich der Passung zwischen Düsenzapfen und Düsensitz für eine stabilere Führung.
- Wahl einer Alternative zur Klebe-Pressverbindung der Hohlnadel im Düsenzapfen, die folgende Anforderungen erfüllt: Dichtheit und Resistenz gegenüber dem Lösungsmittel NMP.
- Trotz der präzisen Fertigung kann eine minimale Krümmung der Hohlnadel zu einer exzentrischen Nadelposition im Düsenaustritt führen, weshalb auf eine schonende Fügung der Hohlnadel im Düsenzapfen zu achten ist. Um einer Nadelkrümmung generell entgegenzuwirken, wäre für diese Konstruktion vor-

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

teilhaft, den Durchmesser der Hohlnadel zu erhöhen $(d > 0{,}4\ \mathrm{mm})$ oder die aus dem Düsenzapfen herausragende Länge der Hohlnadel zu reduzieren. Die dadurch erhöhte Stabilität würde einer Krümmung entgegenwirken und somit zu einer verbesserten Konzentrizität im Düsenaustritt führen.

- Für eine reduzierte Wärmeausdehnung im Bereich der Fügestelle von Düsenzapfen und Düsensitz sowie einer verbesserten Verschleißbeständigkeit gegenüber den Einwirkungen wäre eine Fertigung der beiden Präzisionsteile (Düsensitz und Düsenzapfen) aus Edelstahl sinnvoll.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

7. Diskussion der Ergebnisse

Dieses Kapitel soll veranschaulichen, welchen Einfluss thermische, chemische und mechanische Einwirkungen sowie fertigungstechnische Lösungen auf den Spinndüsenbetrieb hatten und welche Erkenntnisse, die nach jedem Spinndüsenversuch abzuleiten waren, zu einer sukzessiven Verbesserung des Spinndüsenaufbaus führten. Dabei war die Konstruktion der Spinndüse mit folgenden Herausforderungen verbunden:

- Dichtheit aller Anschlüsse und Verbindungen bei Druckanstieg.
- Verträglichkeit der Dichtungsmaterialien gegenüber dem in der Polymerlösung befindlichen Lösungsmittel NMP.
- Berücksichtigung von unterschiedlichen Materialausdehnungen im temperierten Zustand der Spinndüse sowie deren Einfluss auf die konzentrische Hohlnadel-Position im Düsenaustritt.
- Planung und Umsetzung der Fertigung, um fertigungsbedingte Ungenauigkeiten und eine daraus resultierende exzentrische Position der Hohlnadel im Düsenaustritt zu eliminieren.
- Einfache Montage der Anschlüsse.
- Gute Reinigungs- und Wartungsmöglichkeit.
- Schaffen einer dichten Verbindung von Hohlnadel und Düsenzapfen mit Resistenz gegenüber dem Lösungsmittel NMP.
- Unkomplizierter Aufbau der Spinndüse zur vereinfachten Fertigung weiterer Modelle.
- Auswahl geeigneter Materialien der Spinndüsenkomponenten (Gehäuse bzw. Düsensitz und Düsenzapfen) mit folgenden Eigenschaften: Verschleißbeständigkeit, Chemikalienbeständigkeit, gute Wärmeleitfähigkeit und Möglichkeit der werkzeugschonenden Bearbeitung.

Im Folgenden werden die Auswirkungen der einzelnen Einflüsse (Fertigung, Druck, Temperatur, chemische Reaktionen) auf die Spinndüsenkonstruktion detailliert beschrieben sowie die Erkenntnisse die sich daraus ableiten ließen.

<u>Fertigungstechnische Einflüsse:</u>

Die mittels Typ-1 hergestellte Hohlfaser wies Einkerbungen an der Faseroberfläche auf. Dies war auf eine nicht gründliche Entfernung des vom Bohrprozess entstandenen Grates zurückzuführen. Die Nachbearbeitung des Düsenloches bei Typ-2 durch Einsatz einer Miniaturreibahle führte somit zu einer Beseitigung des Grates im Düsenaustritt. Auch konnten weitere vom Bohrprozess resultierende Einkerbungen im Düsenaustritt entfernt werden. Dieser zusätzliche Bearbeitungsschritt führte zu einer signifikanten Verbesserung der Faseroberfläche. Darüber hinaus zeigte sich durch anfängliche Verwendung von Aluminium für das Gehäuse und den Düsenzapfen bei Typ-1 ein Festfressen beim Fügen der beiden Komponenten. Somit kam in weiterer Folge für den Düsenzapfen Messing zum Einsatz, wodurch sich ein einwandfreies Fügen erzielen ließ.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Thermische Einflüsse:

Versuche mit Typ-2 zeigten, dass aufgrund der nun unterschiedlichen Materialien zwischen Gehäuse (Aluminium) und Düsenzapfen (Messing) eine im Spinndüsenbetrieb temperaturbedingte Aufweitung des Fügesitzes (laut Berechnung: $\Delta d = 6\ \mu\mathrm{m}$ bei 80 °C) auftrat. Dies war auf ein unterschiedliches Ausdehnungsverhalten der Materialien zurückzuführen. Eine daraus resultierende Lockerung des Fügesitzes führte zu einer Beeinflussung der konzentrischen Nadelposition im Düsenaustritt. In weiterer Folge wies die produzierte Hohlfaser eine ungleichmäßige Wandstärkenverteilung auf. Der Versuch veranschaulichte somit die Wichtigkeit einer gleichen Materialpaarung der beiden Komponenten.

Mechanische Einflüsse:

Der Versuch mit Typ-1 zeigte, dass ein aufgrund von Abrieb und Verunreinigungen resultierendes Verschließen der Hohlnadel zu einem plötzlichen Druckanstieg (bis zu 40 bar) in der Zuleitung des Borefluid-Stroms führt. Undichtheit im Bereich des Borefluid-Anschlusses war die Folge. Somit wurde der Düsenzapfen des zweiten Spinndüsen-Typs im Anschlussbereich mit zwei planen und gegenüberliegenden Flächen versehen. Diese dienen als Ansatz für einen Gabelschlüssel, womit ein für die Dichtheit notwendiges Anzugsmoment besser aufgebracht werden kann. Darüber hinaus konnte die Verwendung von vier Deckelschrauben bei Typ-2 (im Vergleich zu drei Deckelschrauben bei Typ-1) einen gleichmäßigeren Anpressdruck am Dichtring, der zwischen Düsenzapfen und Gehäuse positioniert ist, sicherstellen. Damit ließ sich die Abdichtung im Betrieb erleichtern.

Chemische Einflüsse:

Nach einigen Versuchsdurchführungen mit Typ-2 war ein Lösen der Verbindung von Hohlnadel und Düsenzapfen, aufgrund einer nicht vorhandenen Resistenz des Klebers (Loctite 638, Henkel) gegenüber dem in der Polymerlösung vorhandenen Lösungsmittel NMP, zu beobachten. Somit musste für weitere Versuchsdurchführungen eine erneute Verklebung und Zentrierung der Hohlnadel vorgenommen werden. Durch Fügen der Hohlnadel mittels Klebe-Pressverbindung konnte aufgrund des minimierten Fügespalts das Vordringen des Lösungsmittels reduziert werden. Somit ließ sich die Festigkeit dieser Verbindung erhöhen und ein Lösen der Hohlnadel während des Betriebs unterbinden.

Nach Typ-1 und Typ-2 folgte die nächste Entwicklungsstufe der Spinndüse: Typ-3. Dabei wurde das Gehäuse in einen Düsensitz und Wärmemantel unterteilt. Durch die Unterteilung ergaben sich Fertigungstechnische Vorteile und eine, aufgrund der besseren Füllkammer-Zugänglichkeit, erleichterte Reinigung nach dem Betrieb. Um eine temperaturbedingte Aufweitung der Fügung von Düsenzapfen und Düsensitz im Betrieb zu verhindern, kam für beide Komponenten der gleiche Werkstoff (Messing) zum Einsatz. Darüber hinaus war keine Störung des Wärmeüberganges vom Wär-

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

memantel auf den Düsensitz zu erkennen. Die in Kapitel 6.3.1 getätigten Maßnahmen zur Erhöhung der Fertigungsgenauigkeit erleichtern nun die konzentrische Positionierung der Hohlnadel im Düsenaustritt, womit ein schnellerer Zusammenbau der Spinndüse erfolgt. Für die Fixierung der Hohlnadel im Düsenzapfen wurde weiterhin eine Klebe-Pressverbindung gewählt, um die Beständigkeit dieser Verbindung gegenüber dem Lösungsmittel NMP zu erhöhen. Die Versuchsdurchführung mit Typ-3 zeigte somit vier wesentliche Vorteile gegenüber den vorherigen Spinndüsen-Typen:

- Kein Lösen der Verbindung von Hohlnadel und Düsenzapfen während des Betriebs.
- Keine Aufweitung der Fügestelle von Düsensitz und Düsenzapfen im temperierten Zustand der Spinndüse.
- Schnelleres Zentrieren der Hohlnadel im Düsenausgang.
- Erleichterte Reinigung nach dem Betrieb.

Im Zuge der Diplomarbeit konnte in mehreren Versuchsdurfführungen die grundlegende Funktionalität des Spinndüsenaufbaus gezeigt werden. Die Herstellung einer Hohlfasermembran nach der in der Aufgabenstellung geforderten Dimension (Außendurchesser: 600 µm, Innendurchmesser: 400 µm) gelang. Ebenso ließ sich mittels der integrierten Spinndüsenbeheizung die Viskosität der zugeführten Polymerlösung regulieren, womit die Beeinflussung der Membranstruktur möglich war. Dichtheit aller Zuleitungen und Anschlüsse konnte mittels konstruktiver Änderungen erlangen werden. Die durchdachte Konstruktion des dritten Spinndüsen-Typs ermöglicht das unkomplizierte Reinigen nach dem Betrieb sowie eine erleichterte Fertigung (durch Entfall der Fertigung des Wärmemantels) weiterer Spinndüsen. Überdies weisen die verwendeten Materialien für den Spinndüsenaufbau (Messing und Aluminium) sowie der verwendeten Dichtungen (Kupfer und Teflon) Beständigkeit gegenüber den zugeführten Medien (Polymer- und Borefluidstrom) auf.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

8. Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel der Diplomarbeit lag in der Konstruktion und Fertigung einer Spinndüse zur Erzeugung von Hohlfasermembranen. Auf Grundlage verschiedener Literaturrecherchen ließ sich der Düsenaufbau ableiten. Die Spinndüse sich aus einem Düsengehäuse mit Düsenöffnungsbohrung sowie einem Düsenzapfen mit integrierter Hohlnadel, welche als Injektor fungiert, zusammen. Durch Fügen beider Komponenten wird die Hohlnadel konzentrisch in der Düsenöffnungsbohrung des Gehäuses platziert. Über einen Anschluss im Gehäuse strömt eine Polymerlösung in den der Hohlnadel umgebenden Polymer-Kanal ein. Weiters gelangt ein Borefluid über einen Anschluss im Düsenzapfen in die Hohlnadel, welche das Borefluid konzentrisch in den aus der Düsenöffnung strömenden Polymerstrahl einspeist. Durch Austausch des in der Polymerlösung befindlichen Lösungsmittels mit dem Nichtlösungsmittel im Borefluid wird eine Phasenseparation induziert (NIPS-Verfahren), welche zur Ausbildung des Faserhohlraumes während der Extrusion führt. Anschließendes Eintauchen der Faser in ein Fällbad, welches ebenfalls das Nichtlösungsmittel enthält, dient zur vollständigen Ausbildung der Membranstruktur. Da die Viskosität der Polymerlösung einen entscheidenden Einfluss auf die Membranstruktur hat und diese über die Temperatur regulierbar ist, musste darüber hinaus das Düsengehäuse mit einer Beheizung ausgestattet werden.

In der vorliegenden Diplomarbeit wurden drei verschiedene Spinndüsen-Typen (Typ-1, 2 und 3) konstruiert, gefertigt und getestet. Für den ersten Spinndüsen-Typ (Typ-1) wurde anfänglich für das Gehäuse und den Düsenzapfen Aluminium als Werkstoff verwendet. Nach mehrmaligem Zusammenführen der Komponenten trat aufgrund der Passung im Bereich der Fügestelle ein Festfressen auf, weshalb für weitere Versuche der Düsenzapfen aus Messing gefertigt wurde. Der erste Testversuch fand ohne Umlenkrollen und Wickeleinheit statt, um lediglich die Funktionalität der Spinndüse zu testen. Der Luftspalt, welcher aus der vertikalen Distanz zwischen Düsenöffnung und Fällbad-Oberfläche resultiert, betrug 6 cm und die Temperatur der zugeführten Polymerlösung (31 w% PES/NMP-Gemisch) 65 °C. Die Oberfläche der extrudierten Fasern wies Einkerbungen und Kratzer auf. Dies war auf eine raue Innenoberfläche der Düsenbohrung, bedingt durch den Bohrprozess, zurückzuführen. Der Borefluid-Anschluss im Düsenzapfen konnte aufgrund eines fehlenden Gabelschlüsselansatzes nur unzureichend befestigt werden, was zu Undichtheiten im Betrieb führte. Trotz der vorherrschenden Komplikationen gelang die Extrusion der ersten Hohlfaser. Um die auftretenden Probleme zu beseitigen, wurde ein zweiter Spinndüsen-Typ (Typ-2) generiert. Dabei kam wieder Aluminium für das Düsengehäuse und Messing für den Düsenzapfen zum Einsatz. Ein besonderes Augenmerk erhielt die Düsenbohrung im Gehäuse. Um eine möglichst glatte Innenoberfläche der Bohrung zu schaffen, fand eine Nachbearbeitung mittels einer Miniaturreibahle statt. Um eine verbesserte Montage des Borefluid-Anschlusses vornehmen zu können, wurde im Anschlussbereich des Düsenzapfens ein Gabelschlüsselansatz berücksichtigt. Typ-2 wurde mit einem variablen Luftspalt (6 – 13 cm) über dem Fällbad bei einer Temperatur der Polymerlösung von 65 °C eines 31 w% PES/NMP-

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Gemisches inklusive Umlenkrollen und Wickeleinheit getestet. Die extrudierten Fasern wiesen eine verbesserte Oberfläche gegenüber dem Versuch mit Typ-1 auf. Dies war einerseits auf die nun einkerbungsfreie Innenoberfläche der Düsenöffnung und andererseits durch die vom Wickelsystem hervorgerufene Ausrichtung der Fasern zurückzuführen. Mikroskopische Aufnahmen des Faserquerschnittes zeigten jedoch einen deformierten Hohlraum. Literaturrecherchen ergaben, dass diese Deformation durch Erhöhung des Luftspalts zu beseitigen sei. Somit fand, bei einer weiteren Versuchsdurchführung mit Typ-2, eine Erhöhung des Luftspalts von 13 auf 26 cm statt. Erneute mikroskopische Aufnahmen zeigten zum ersten Mal eine voll ausgeprägte Hohlfasermembran mit gleichmäßiger Wandstärkenverteilung, wodurch der Hinweis seine Richtigkeit erwies. Weitere Versuche mit Typ-2 ergaben jedoch nach längerem Betrieb eine Lockerung des Fügesitzes zwischen Gehäuse und Düsenzapfen. Dies war auf eine temperaturbedingte Ausdehnungsdifferenz der Komponenten (aufgrund der ungleichen Werkstoffpaarung) zurückzuführen. Somit konnte die konzentrisch justierte Position der Hohlnadel für weitere Versuchsdurchführungen nicht mehr gehalten werden. Eine Hohlfaser mit einer ungleichmäßig verteilten Wandstärke war die Folge. Daraus ließ sich ableiten, dass für eine präzise Verbindung auch die Herstellung des Gehäuses aus Messing von Notwendigkeit ist. Ebenso war nach mehreren Spinndüsentests mit Typ-2 eine Lockerung der verklebten Hohlnadel im Düsenzapfen zu erkennen. Dies resultierte aus einer Unverträglichkeit des Klebers (Loctite 638, Henkel) gegenüber dem in der Polymerlösung befindlichen Lösungsmittel NMP. Zur Behebung der Komplikationen wurde ein dritter Spinndüsen-Typ (Typ-3) generiert. Um eine einfachere und schnellere Fertigung für zukünftige Modelle zu ermöglichen, wurde beim Typ-3 das Gehäuse in einen Wärmemantel und Düsensitz unterteilt. Die Fertigung des adaptierbaren Wärmemantels entfällt somit für weitere Modelle, woraus Zeit- und Materialeinsparungen resultieren. Düsensitz und Düsenzapfen wurden aus Messing gefertigt, um die vorhin genannten Gründe der Fügesitz-Aufweitung zu unterbinden. Zur stabileren Verbindung der Hohlnadel im Düsenzapfen wurde eine Kombination aus leichtem Presssitz, sodass die Hohlnadel per Hand noch zu fügen war, und Klebstoff (Loctite 638, Henkel) gewählt. Der durch den Presssitz reduzierte Fügespalt minimiert nun das Vordringen des Lösungsmittels NMP. Um die Resistenz der Verbindung gegenüber dem Lösungsmittel NMP abschätzen zu können, wurde der Düsenzapfen mit verbundener Hohlnadel in ein Behältnis mit dem Lösungsmittel NMP (über einen Zeitraum von einer Woche) bei Raumtemperatur eingelegt. Eine Lösung der Verbindung nach dem Versuchsablauf war nicht zu erkennen. Welchen Einfluss jedoch der für den Spinndüsenbetrieb verwendete Temperaturbereich (bis zu 80 °C) auf die Festigkeit der Verbindung hat, konnte im Zuge der Diplomarbeit nicht beantwortet werden. Dafür sind mehrere Spinndüsenversuche von Notwendigkeit, um eine klare Aussage tätigen zu können. Der Spinndüsentest mit Typ-3 fand mit einem 23 w% PES/NMP-Gemisch und variierenden Luftspalt von 6,5 – 26 cm über der Fällbad-Oberfläche statt, um den Einfluss des Luftspalts auf die Porenstruktur zu untersuchen. Weiters wurde der Spinndüsenversuch mit einer konstanten Temperatur der Polymerlösung von 40 °C durchgeführt. Während des Betriebes war keine Lockerung des Fügesitzes zu erkennen, wodurch

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

die Hohlnadel ihre konzentrische Position behielt. Die extrudierten Fasern wiesen eine glatte Oberfläche sowie einen voll ausgeprägten Faserhohlraum mit gleichmäßiger Wandstärkenverteilung auf. Somit konnte im Zuge dieser Arbeit der Beweis zur Herstellung einer Spinndüse für die Erzeugung von Hohlfasermembranen erbracht werden, welche mit einer Dimension von 600 µm Außendurchmesser und 400 µm Innendurchmesser einem üblichen Größenbereich (225 – 800 µm) von Hohlfasermembranen entsprechen [15], [27].

Für eine Weiterentwicklung der Spinndüse ist eine alternative Verbindung der Hohlnadel im Düsenzapfen notwendig, die folgende Voraussetzungen erfüllt: Dichtheit und Beständigkeit gegenüber dem Lösungsmittel NMP. Auch wäre durch eine erweiterte Konstruktion, die adaptierbare Hohlnadel-Aufsätze und Düsenöffnungen beinhaltet, die Variation des Faserdurchmessers mit einem Spinndüsenmodell anzudenken. Der Vorteil liegt bei Veränderung des Hohlnadel- oder Düsendurchmessers im Entfall der Fertigung neuer Spinndüsenkomponenten. Jedoch sei hier zu vermerken, dass dies einen sehr hohen Aufwand bezüglich Dichtheit, Fertigung und Zentrierung der Hohlnadel darstellen würde. Darüber hinaus könnte eine veränderte Form der Düsenöffnung die Herstellung unterschiedlicher Faserformen ermöglichen, beispielsweise durch Verwendung einer stern- oder sinusförmigen Öffnung, um bei gleichbleibender Dimension die Membranoberfläche zu erhöhen. Für eine verbesserte Verschleißbeständigkeit der Spinndüse gegenüber ihren Einwirkungen wäre eine Fertigung der beiden Düsenkomponenten (Düsenzapfen und Düsensitz) aus Edelstahl sinnvoll.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

9. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung des Trennverhaltens von Membranverfahren [1] 1
Abbildung 2: Trennverfahren – Porenmodell und Lösungsdiffusions-Modell [2] 2
Abbildung 3: Klassifizierung von Membranen nach Herkunft und Werkstoffen [1] 2
Abbildung 4: Prinzipieller Aufbau eines Membranmoduls [1] 3
Abbildung 5: Herstellung von Flachmembranen mittels NIPS-Verfahren [7] 5
Abbildung 6: Aufbau einer Nassspinnanlage zur Herstellung von Hohlfasermembranen mittels NIPS [2] 5
Abbildung 7: Gehäuse mit eingesetztem Düsenzapfen, Borefluid- und Polymerzufuhr sowie Heizwasserekanal zum Temperieren des Düsenkörpers 7
Abbildung 8: Detail A: Polymer- und Borefluidstrom beim Verlassen der Düsenöffnung mit zentrisch platzierter Hohlnadel (Quelle: In Anlehnung an [9]) 8
Abbildung 9: untere Ansicht der Düsenöffnung mit zentrisch platzierter Hohlnadel 8
Abbildung 10: Prinzipskizze des gesamten Herstellungsprozesses einer Hohlfasermembran nach dem NIPS-Verfahren 9
Abbildung 11: Viskosität in Abhängigkeit der Scherrate eines 20 w% PES/NMP-Gemisches bei unterschiedlichen Temperaturen 10
Abbildung 12: Berechnung der rot markierten Bereiche: (1) Berechnung des Druckverlustes und der Scherspannungen im Düsenaustritt, (2) Festigkeitsnachweis der Fügestelle von Hohlnadel und Düsenzapfen, (3) Festigkeitsnachweis des Düsenzapfens, (4) Festigkeitsnachweis der Füllkammer 12
Abbildung 13: (5) Bestimmung des notwendigen Schraubendurchmessers 12
Abbildung 14: Querschnittsfläche eines Kreisrings zur Herleitung des hydraulischen Durchmessers 15
Abbildung 15:Prinzipskizze der Geschwindigkeits- und Scherspannungsprofile im Düsenaustritt mit R=0,125mm, Ri=0,2mm und Ra=0,3mm; (1) Geschwindigkeitsprofil des Stroms der Polymerlösung, (2) Scherspannungsprofil des Stroms der Polymerlösung, (3) Geschwindigkeitsprofil des Borefluid-Stroms, (4) Scherspannungsprofil des Borefluid-Stroms (Quelle: In Anlehnung an [17], [19]) 16
Abbildung 16: Druckverlust $\Delta p12$ *im Polymer-Kanal, Scherspannung* τP *sowie resultierende Scherkraft* $F\tau$ *auf der Nadeloberfläche* 22
Abbildung 17: Druckverlust $\Delta p12$ *und Scherspannung* τB *im Borefluid-Kanal* 25
Abbildung 18: Fügestelle von Hohlnadel und Düsenzapfen (rot), Kraft der Klebeverbindung Fk *und Scherspannungskraft* $F\tau$ *an der Nadel* 27
Abbildung 19: Festigkeitsanalyse des Düsenzapfenbereiches in der Füllkammer mit einwirkendem Druck von p=93 bar 28
Abbildung 20: Links – Rot markierter Bereich des Düsenzapfens für FEM-Analyse, Rechts – Rotationssymmetrisches Modell mit Vernetzung 28
Abbildung 21: Links – Modell mit beaufschlagtem Druck von 93 bar; Rechts - Spannungsverteilung im Bauteilquerschnitt mit Maximum in der Bohrkerbe 29
Abbildung 22: Spannungsspitze von 51,605 MPa in der Bohrkerbe 29

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Abbildung 23: Festigkeitsanalyse der Füllkammer mit beaufschlagtem Druck von p=93 bar 30
Abbildung 24: Links – Rot markierter Bereich des Düsengehäuses für FEM-Analyse, Rechts – rotationssymmetrisches Modell mit Vernetzung 31
Abbildung 25: Links – Modell mit baufschlagtem Druck von 93 bar; Rechts - Spannungsverteilung im Bauteilquerschnitt mit Maximum in der Bohrkerbe 31
Abbildung 26: Spannungsspitze in der Bohrkerbe 32
Abbildung 27: Druckkräfte am Düsenzapfen im Bereich der Füllkammer 33
Abbildung 28: Resultierende Axialkraft Fa *infolge der Druckeinwirkung auf den Düsenzapfen im Bereich der Füllkammer sowie Schraubenkraft* Fs 33
Abbildung 29: Düse mit Gehäuse und Düsenzapfen 37
Abbildung 30: Aufbau des Gehäuses – (1) Zufuhr der Polymerlösung; (2) 0,6 mm Düsenbohrung; (3) Thermoelement-Bohrung; (4) Heizwasser-Kanal; (5) Fügesitz des Düsenzapfens; (6) Heizwasser-Anschlüsse; (7) Füllkammer; (8) Verschlussssschraube; (9,10) Gewindelöcher 38
Abbildung 31: Innenteil mit Schnittansicht A-A: (1) Borefluid-Zufuhr, (2) Bohrung zur Fixierung Hohlnadel, (3) Hohlnadel, (4) Nut für Dichtring 39
Abbildung 32: Zusammengebaute Düse im Querschnitt: (1) Gehäuse, (2) Heizwasserkanal, (3) M3 Innensechskantschraube, (4) Borefluid-Anschluss, (5) Dichtring, (6) Befestigungsdeckel, (7) Düsenzapfen, (8) Heizwasseranschluss, (9) Anschluss für die Polymerlösung, (10) Dichtring, (11) Düsenöffnung, (12) Anschluss für ein Thermoelement, (13) Teflon-Dichtring 40
Abbildung 33: Links – Einzelteile der Spinndüse vom Typ-1: (1) Befestigungsdeckel, (2) Gehäuse und (3) Düsenzapfen, Rechts – Düsenzapfen mit integrierter Hohlnadel 41
Abbildung 34: Spinndüse Typ-1 im zusammengebauten Zustand mit Anschlüssen – (1) Anschluss für die Borefluid-Zufuhr, (2) Anschlüsse für die Heizwasser Zu- und Abfuhr, (3) Anschluss für die Zufuhr der Polymerlösung, (4) Verschlussschraube .. 41
Abbildung 35: Spinndüse im Betrieb, Produktion der ersten Faser ohne Wickeleinheit 43
Abbildung 36: REM-Aufnahme der ersten Hohlfaser 43
Abbildung 37: Gehäuse mit Schnitt A-A: links -Vorderansicht der Düse mit eben gefertigtem Anschlussbereich; rechts - Querschnitt der Düse mit einer 3 mm Bohrung für die Zufuhr der Polymerlösung 45
Abbildung 38: Düsenzapfen mit seitlich gefrästen Stirnflächen für den Gabelschlüsselansatz zur verbesserten Montage des Borefluid-Anschlusses 45
Abbildung 39: Draufsicht des Düsengehäuses, innerer Lochkreis: 4 Gewindelöcher zur Fixierung des Düsenzapfens im Gehäuse, äußerer Lochkreis: 4 Gewindelöcher zur Fixierung der Düse am Rahmen der Produktionsanlage 46
Abbildung 40: Schnitt B-B: Düse mit Abziehdeckel sowie vier Druckschrauben 46
Abbildung 41: Links – Einzelteile der Spinndüse vom Typ-2: (1) Gehäuse, (2) Düsenzapfen und (3) Befestigungsdeckel; Rechts – Düsenzapfen mit integrierter Hohlnadel 47

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

Abbildung 42: Spinndüse Typ-2 im zusammengebauten Zustand mit Anschlüssen – (1) Anschluss für die Borefluid-Zufuhr, (2) Anschlüsse für die Heizwasser Zu- und Abfuhr, (3) Anschluss für die Zufuhr der Polymerlösung, (4) Verschlussschraube... 47
Abbildung 43: Links – Spinndüse im Betrieb, Rechts – Extrudierte Faser beim Verlassen der Düsenöffnung 48
Abbildung 44: Gesamte Anlage des Spinnprozesses mit Umlenkrollen und Wickeleinheit 49
Abbildung 45: Mikroskopische Aufnahme der Nadel-Zentrierung..... 49
Abbildung 46: REM-Aufnahme von Versuch A.1, Durchflussrate des Borefluids = 0,059 ml/min 51
Abbildung 47: REM-Aufnahme von Versuch A.2, Durchflussrate des Borefluids = 0,118 ml/min 51
Abbildung 48: REM-Aufnahme von Versuch B.1, Durchflussrate Polymer = 0,059 ml/min, Durchflussrate Borefluid = 0,059 ml/min 52
Abbildung 49: REM-Aufnahme von Versuch B.2, Durchflussrate Polymer = 0,059 ml/min, Durchflussrate Borefluid = 0,07 ml/min 52
Abbildung 50: REM-Aufnahme von Versuch B.3, Durchflussrate Polymer = 0,07 ml/min, Durchflussrate Borefluid = 0,07 ml/min 52
Abbildung 51: „Die Swell“ Phänomen beim Extrudieren der Faser [30]..... 53
Abbildung 52: REM-Aufnahme von Versuch C.1 – Luftspalt = 13 cm; Wasser/Nmp 50/50 wt%..... 54
Abbildung 53: REM-Aufnahme von Versuch C.2 – Luftspalt = 26 cm; Wasser/Nmp 50/50 wt%..... 54
Abbildung 54: REM-Aufnahme von Versuch C.3 – Luftspalt=26 cm; Wasser 100 %wt 54
Abbildung 55: REM-Aufnahme von Versuch C.4 – Luftspalt=13 cm; Wasser 100 %wt 55
Abbildung 56: REM-Aufnahme von Versuch D.1 – Temperatur der Polymerlösung: 30 °C 56
Abbildung 57: REM-Aufnahme von Versuch D.2 – Temperatur der Polymerlösung: 40 °C 56
Abbildung 58: REM-Aufnahme von Versuch D.3 – Temperatur der Polymerlösung: 50 °C 56
Abbildung 59: REM-Aufnahme von Versuch D.4 – Temperatur der Polymerlösung: 60 °C 57
Abbildung 60: Spinndüse Typ 3 mit geteiltem Gehäuse; (1) Wärmemantel, (2) Düsensitz mit Polymer-Zufuhr, (3) Düsenzapfen mit verlängertem Anschlussbereich zu besseren Montage des Borefluid-Anschlusses 59
Abbildung 61: Lötversuch 60
Abbildung 62: Eingeführte Nadel mit beidseitiger Befestigung mittels Madenschrauben, Austreten von Borefluid im Bereich der Fügestelle 61
Abbildung 63: Kanülen-Adapter der Firma Supelco..... 62

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

Abbildung 64: Links - Einzelteile der Spinndüse vom Typ-3 – (1) Wärmemantel, (2) Düsenzapfen, (3) Düsensitz und (4) Befestigungsdeckel); Rechts – Düsenzapfen mit integrierter Hohlnadel 63
Abbildung 65: Spinndüse Typ-3 im zusammengebauten Zustand mit Anschlüssen – (1) Anschluss für die Borefluid-Zufuhr, (2) Anschlüsse für die Heizwasser Zu- und Abfuhr, (3) Anschluss für die Zufuhr der Polymerlösung, (4) Verschlussschraube... 63
Abbildung 66: Konzentrische Position der Hohlnadel im Düsenaustritt 64
Abbildung 67: Versuchsdurchführung mit Spinndüse, Umlenkrollen und Wickeleinheit 64
Abbildung 68: Links – Spinndüse im Betrieb; Rechts – Extrudierte Faser beim Verlassen der Düsenöffnung 65
Abbildung 69: REM-Aufnahme von Versuch A.1 – Länge des Luftspalts: 26 cm 66
Abbildung 70: REM-Aufnahme von Versuch A.2 – Länge des Luftspalts: 13 cm 66
Abbildung 71: REM-Aufnahme von Versuch A.3 – Länge des Luftspalts: 6,5 cm 66
Abbildung 72: REM-Aufnahme Versuchs B – Temperatur der Polymerlösung: 80 °C 67
Abbildung 73: Düsenkomponenten Typ-3 mit Nummerierung 83
Abbildung 74: Komponenten des Abziehers..... 84

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek WIEN Your knowledge hub

10. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zusammenstellung von heute genutzten Membranprozessen [1], [2]..... 4
Tabelle 2: Betriebsparameter des ersten Testversuchs 42
Tabelle 3: Betriebsparameter für Versuch A..... 50
Tabelle 4: Betriebsparameter für Versuch B..... 51
Tabelle 5: Betriebsparameter für Versuch C..... 53
Tabelle 6: Betriebsparameter für Versuch D..... 55
Tabelle 7: Betriebsparameter für Versuch A..... 65
Tabelle 8: Betriebsparameter für Versuch B..... 67
Tabelle 9: Auflistung und Beschreibung der Düsenkomponenten vom Typ 3 82

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

11. Literaturverzeichnis

[1] T. Melin und R. Rautenbach, *Membranverfahren: Grundlagen der Modul- und Anlagenauslegung*, 3. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer, 2007.

[2] D. Paul, „Polymermembranen für die Stofftrennung“, Chemie in unserer Zeit, Nr. 4, 32. Jahrg. 1998, S. 197–205.

[3] E. Walitza, N. Stroh, und H. Brunner, „Synthetische Membranen: Stofftransport, Herstellung, Verwendung“, CLB Chemie in Labor und Biotechnik, 53. Jahrgang, Heft 6 (2002), S. 208–216.

[4] K. H. Rosenwinkel, J. Wagner, und J. Nagy, „Membranverfahren in der industriellen Abwasserbehandlung“, Chemie Ingenieur Technik (72) 5 (2000), S. 433–440.

[5] H. Strathmann, *Trennungen von molekularen Mischungen mit Hilfe synthetischer Membranen*. Darmstadt: Dr. Dietrich Steinkopff Verlag, 1979.

[6] K. Hoffmann, *Selbstorganisierte ultradünne Filme und Membranen aus Polyelektrolyten, Makrozyklen und Polyelektrolyt-Mischungen für die selektive Stofftrennung und kontrollierte Wirkstofffreisetzung.* Göttingen: Cuvillier Verlag, 2010.

[7] E. Drioli und L. Giorno, *Membrane operations: Innovative separations and transformations*. Weinheim: Wiley-VCH Verl, 2009.

[8] E. Drioli und L. Giorno, *Encyclopedia of membranes*. Berlin Heidelberg: Springer, 2012.

[9] A. V. Bildyukevich, T. V. Plisko, und V. V. Usosky, „The formation of polysulfone hollow fiber membranes by the free fall spinning method“, Petroleum Chemistry, Vol. 56, No. 5 (2016), S. 379–400.

[10] N. Peng, T.-S. Chung, und J.-Y. Lai, „The rheology of Torlon® solutions and its role in the formation of ultra-thin defect-free Torlon® hollow fiber membranes for gas separation“. Journal of Membrane Science 326 (2009), S. 608-617.

[11] M. Rütten, *Verallgemeinerte newtonsche Fluide: Thermische und viskose Strömungseigenschaften*. Deutschland: Springer Vieweg, 2019.

[12] C. Cao, T.-S. Chung, S. B. Chen, und Z. Dong, „The study of elongation and shear rates in spinning process and its effect on gas separation performance of Poly(ether sulfone) (PES) hollow fiber membranes“, Chemical Engineering Science 59 (2004), S. 1053–1062.

[13] H. Ye, Z. F. Cui, M. J. Ellis, H. Macedo, und A. Mantalaris, „Hollow fiber membrane bioreactor technology for tissue engineering and stem cell therapy“, UK, 2010.

[14] C. C. Tai, S. P. Perrera, und B. D. Crittenden, „Development of absorbent hollow fibres“, In 7th World Congress of Chemical Engineering, Glasgow, UK 2005.

[15] J. Olijslager, J. H. M. Albers, J. C. Rieke, und P. J. Greidanus, „Biodegradable hollow fibres for the controlled release of hormones“. Journal of Controlled Release, 6 (1987), S. 225-247.

[16] H. C. Kuhlmann, *Strömungsmechanik: eine kompakte Einführung für Physiker und Ingenieure*, 2. Aufl. Hallbergmoos, Deutschland: Pearson, 2014.

[17] M. Kraume, *Transportvorgänge in der Verfahrenstechnik*. Deutschland: Springer Vieweg, 2020.

[18] J. Spurk und N. Aksel, *Strömungslehre: Einführung in die Theorie der Strömungen*, 9. Aufl. Deutschland: Springer Vieweg, 2019.

[19] G. Schramm, *Einführung in die Rheologie und Rheometrie*. Karlsruhe, 1995.

[20] H. Sigloch, *Technische Fluidmechanik*. Berlin Heidelberg: Springer, 2009.

[21] Burde & CO GmbH, „Wärmeausdehnung von Metallen und Legierungen“. https://www.burdeco.com/wp-content/uploads/2015/10/waermeausdehnung.pdf.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

[22] A. Frischherz, *Tabellenbuch für Metalltechnik theoretische Grundlagen, technisches Zeichnen, Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung, Maschinenelemente, Fertigungstechnik*. Wien: Dachs-Verl., 2002.
[23] „DIN EN 755-2: Aluminium und Aluminiumlegierungen – Stranggepresste Stangen, Rohre und Profile – Teil 2: Mechanische Eigenschaften“. 2016.
[24] T. Keller und J. H. Stahl, „Hohlfaser-Spinndüse“, WO 03/076701 A1, Sep. 18, 2003.
[25] P. S. M. Puri, „Spinneret for making hollow fibers having different wall thicknesses“, EP0277619A2, Aug. 10, 1988.
[26] B. Krautwurst und H.-J. Schaupp, „Vorrichtung zum Spinnen von Hohlfasern und Verfahren zum Spinnen von Hohlfasern“, DE102014014790A1, Apr. 14, 2016.
[27] A. Tawari, B. Brika, S. Bradshaw, und E. Jacobs, „Development of a cellulose acetate hollow-fine-fibre membrane“, Acta Chemica Malaysia (ACMY)2(2) (2018), S. 29–44.
[28] A. A. Alobaidy, B. Y. Sherhan, A. D. Barood, und Q. F. Alsalhy, „Effect of bore fluid flow rate on formation and properties of hollow fibers“, Appl Water Sci, vol. 7 (2017), S. 4387–4398.
[29] C. C. Pereira, R. Nobrega, und C. P. Borges, „Spinning process variables and poymer solution effects in the die swell phenomenon during hollow fibre membranes formation“, Bd. Brazilian Journal of Chemical Engineering vol.17 N.4-7 São Paulo Dec. 2000.
[30] B. N. Turner, R. Strong, und S. A. Gold, „A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling“, Rapid Prototyping Journal 20/3 (2014), S. 192–204.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

12. Anhang

12.1 Zusammenbau und Reinigung der Spinndüse vom Typ-3

12.1.1 Zusammenbau

Die folgende Anleitung schafft eine Übersicht bezüglich der Düsenkomponenten und dient als Anweisung für den korrekten Zusammenbau (Tabelle 9, Abbildung 73). Vor dem Zusammenbau ist darauf zu achten, dass insbesondere die Hohlnadel im Düsenzapfen (Nr.4) sowie die Polymer-Zuleitung und Düsenöffnung im Düsensitz (Nr.1) frei von Verunreinigungen sind. Mit Druckluft können Rückstände ausgeblasen werden. Sollte die Hohlnadel noch immer verunreinigt sein, wird mithilfe einer 0,2 mm-Drahtlitze, die in die Nadel eingeführt wird, die Rückstandsfreiheit hergestellt. Nun wird der Düsensitz (Nr.1) mit dem Wärmemantel (Nr.2) zusammengeführt und mit zwei M5 Innen-Sechskantschrauben (Nr.3) verbunden. Das Beschichten der Kontaktfläche mittels Wärmepaste oder Wärmeleitfolie vor dem Zusammenbau führt zu einer verbesserten Wärmeübertragung. Der Düsenzapfen (Nr.4) kann darauffolgend in den Düsensitz (Nr.1) eingesetzt und über einen Befestigungsdeckel (Nr.5) mit vier M4 Innen-Sechskantschrauben (Nr.6) im Wärmemantel (Nr.2) verschraubt werden, um eine dichte und sichere Verbindung des Düsenzapfens im Düsensitz zu gewährleisten. Anschließend wird der Borefluid-Anschluss (Nr.8) samt Kupferdichtring (Nr.7) mit dem Düsenzapfen (Nr.4) verschraubt. Ebenso erfolgt der Anschluss für die Zufuhr der Polymerlösung (Nr.10) mit Kupferdichtring (Nr.9) im dafür vorgesehenen Anschlussbereich des Düsensitzes. Nun folgt die Verschraubung der Heizwasser-Anschlüsse inklusive integriertem Dichtring (Nr. 11) mit dem Wärmemantel (Nr.2). Schlussendlich wird die seitliche Bohrung zur Verbindung des Warmwasser Zu- und Abflusses mit einer Verschlussschraube (Nr. 13) und Dichtring (Nr. 12) verschlossen.

***Tabelle 9**: Auflistung und Beschreibung der Düsenkomponenten vom Typ 3*

Nummer	Bezeichnung
1	Düsensitz mit Zufuhr für die Polymerlösung
2	Wärmemantel
3	Zwei Stück M5x16 Innen-Sechskantschrauben
4	Düsenzapfen
5	Befestigungsdeckel
6	Vier Stück M4x10 Innen-Sechskantschrauben
7	Kupferdichtring
8	Gerade Einschraubverschraubung mit 1/8 Zoll Gewindedurchmesser und 1/4 Zoll Rohranschluss
9	Kupferdichtring
10	Gerade Einschraubverschraubung mit 1/8 Zoll Gewindedurchmesser und 1/4 Zoll Rohranschluss
11	Zwei Stück Steckverbindungen mit 1/8 Zoll Gewindeanschluss und 8 mm Schlauchanschluss
12	Dichtring
13	Verschlussschraube

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

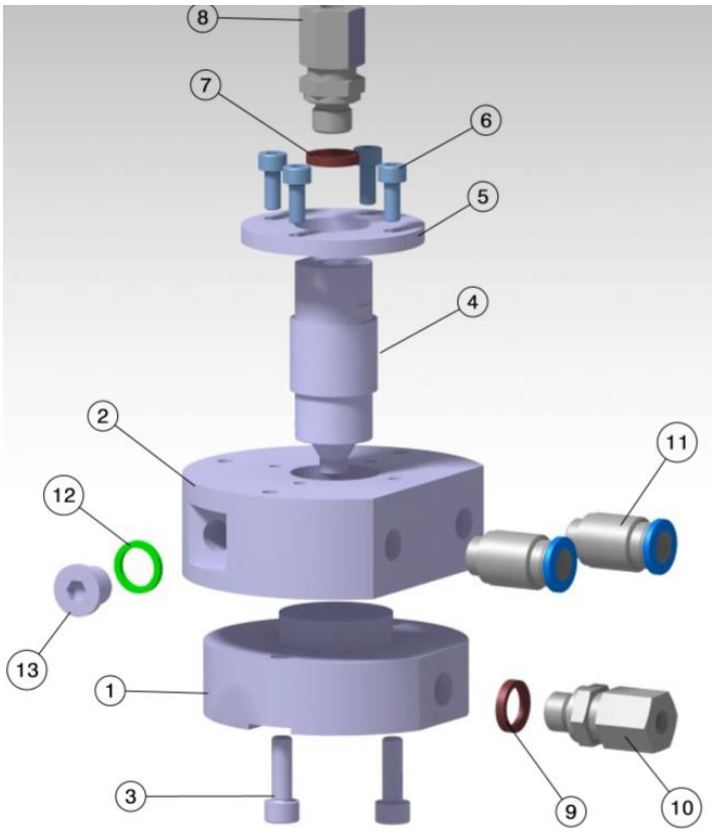


Abbildung 73: *Düsenkomponenten Typ-3 mit Nummerierung*

12.1.2 Reinigung

Zuerst erfolgt die Demontage der Anschlüsse für die Borefluid- und Polymerzufuhr, welche samt Kupferdichtringe in ein mit dem Lösungsmittel NMP gefüllten Behältnis zur Reinigung eingelegt werden. Die Reinigung mit Wasser ist zu unterlassen, da dieses als Nichtlösungsmittel fungiert und bei Kontakt mit den Rückständen der Polymerlösung eine Phasenseparation herbeigeführt wird. Das dadurch koagulierte Polymer müsste mühsam von den Anschlüssen entfernt werden, weshalb für die Reinigung nur das Lösungsmittel NMP zur Anwendung kommt. Anschließend ist eine Lösung der Verbindung von Düsenzapfen und Düsensitz vorzunehmen. Sollte die Verbindung per Hand schwer zu trennen sein, kann ein Abzieher Unterstützung leisten (Abbildung 74). Dabei wird der Befestigungsdeckel entfernt und eine Abziehplatte aufgelegt, welche als Abzieher fungiert. Nach erfolgter Trennung wird der Düsenzapfen mit einem in NMP getränkten Tuch im Bereich der Hohlnadel gereinigt, um Rückstände der Polymerlösung vom Produktionsvorgang zu entfernen. Der Düsensitz ist analog zu den Anschlüssen für die Borefluid- und Polymerzufuhr in ein mit NMP gefüllten Behältnis einzulegen, bis jegliche Rückstände der Polymerlösung entfernt sind. Da der Wärmemantel nicht im Kontakt mit der Polymerlösung stand, kann dieser samt Anschlüsse mit einem feuchten Tuch abgewischt und beiseitegelegt werden. Nachdem alle Teile frei von Verunreinigungen und getrocknet sind, erfolgt der neuerliche Zusammenbau (siehe Kapitel 12.1.1).

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

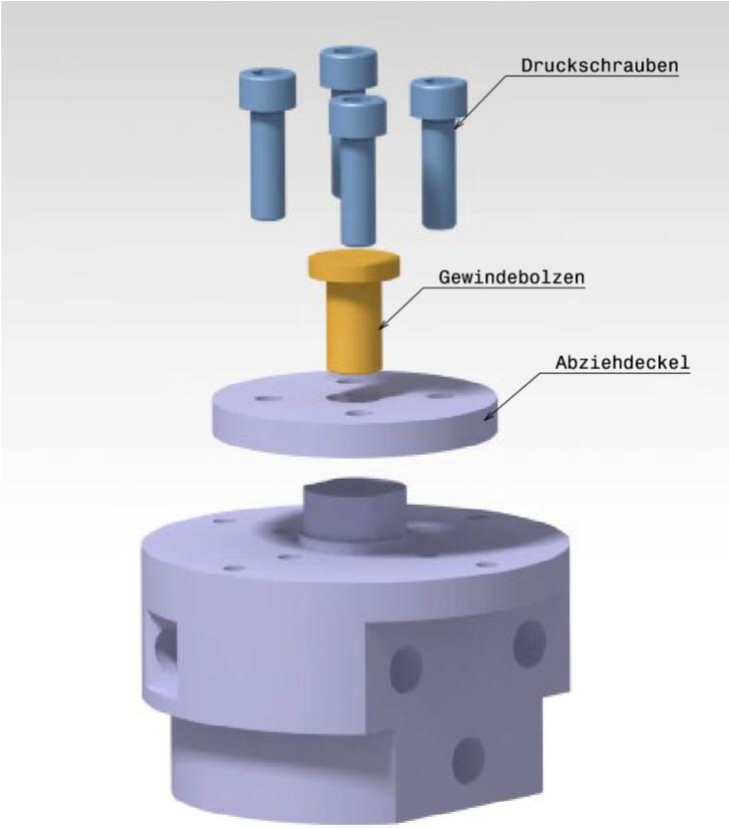


***Abbildung 74**: Komponenten des Abziehers*

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

12.2 VDI 2230 – Tabelle A7

– 116 – VDI 2230 Blatt 1 / Part 1

Alle Rechte vorbehalten © Verein Deutscher Ingenieure e.V., Düsseldorf 2015

Tabelle A7. Abschätzen des Durchmesserbereichs von Schrauben

1	2	3	4
Kraft in N	**Nenndurchmesser** in mm		
	Festigkeitsklasse		
	12.9	10.9	8.8
250			
400			
630			
1 000	3	3	3
1 600	3	3	3
2 500	3	3	4
4 000	4	4	5
6 300	4	5	6
10 000	5	6	8
16 000	6	8	10
25 000	8	10	12
40 000	10	12	14
63 000	12	14	16
100 000	16	18	20
160 000	20	22	24
250 000	24	27	30
400 000	30	33	36
630 000	36	39	

Startwert: 250 N + drei Schritte in Spalte 1

Beispiel

Eine Verbindung wird dynamisch und exzentrisch durch die Axialkraft F_A = 8500 N belastet. Die Schraube mit der Festigkeitsklasse 12.9 soll mit Drehmomentschlüssel montiert werden.

A 10000 N ist die zunächst größere Kraft zu F_A in Spalte 1

B zwei Schritte für „exzentrische und dynamische Axialkraft" führen zu $F_{M\,min}$ = 25000 N

C ein Schritt für „Anziehen mit Drehmomentschlüssel" führt zu $F_{M\,max}$ = 40000 N

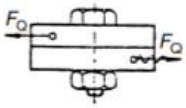
D Für $F_{M\,max}$ = 40000 N findet man in Spalte 2 (Festigkeitsklasse 12.9): M10

A Wähle in Spalte 1 die nächstgrößere Kraft zu der an der Verschraubung angreifenden Belastung. Wenn bei kombinierter Belastung (Längs- und Querkräfte) $F_{A\,max} < F_{Q\,max} / \mu_{T\,min}$ gilt, dann ist nur $F_{Q\,max}$ zu verwenden.

B Die erforderliche Mindestvorspannkraft $F_{M\,min}$ ergibt sich, indem man von dieser Zahl um folgende Anzahl Schritte weitergeht:

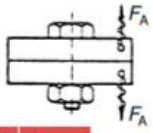
B1 Wenn mit $F_{Q\,max}$ zu entwerfen ist:

vier Schritte für statische oder dynamische Querkraft



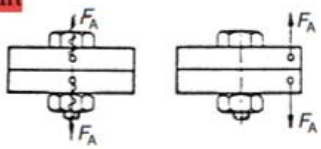
B2 Wenn mit $F_{A\,max}$ zu entwerfen ist:

zwei Schritte für dynamische und exzentrisch angreifende Axialkraft



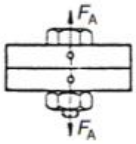
oder

ein Schritt für dynamisch und zentrisch oder statisch und exzentrisch angreifende Axialkraft



oder

keine Schritte für statisch und zentrisch angreifende Axialkraft



C Die zu ertragende maximale Vorspannkraft $F_{M\,max}$ ergibt sich, indem man von dieser Kraft $F_{M\,min}$ weitergeht um:

zwei Schritte für Anziehen der Schraube mit einfachem Drehschrauber, der über Nachziehmoment eingestellt wird

oder

ein Schritt für Anziehen mit Drehmomentschlüssel oder Präzisionsschrauber, der mittels dynamischer Drehmomentmessung oder Längungsmessung der Schraube eingestellt wird oder mit pneumatischem Impulsschrauber

oder

keine Schritte für Anziehen über Winkelkontrolle in den überelastischen Bereich oder mittels Streckgrenzkontrolle durch Computersteuerung

D Neben der gefundenen Zahl steht in Spalte 2 bis Spalte 4 die erforderliche Schraubenabmessung in mm für die gewählte Festigkeitsklasse der Schraube

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

12.3 Technische Datenblätter

12.3.1 Fügeklebstoff Loctite 638

Technisches Datenblatt

LOCTITE®

LOCTITE® 638™

Dezember 2009

PRODUKTBESCHREIBUNG

LOCTITE® 638™ besitzt die folgenden Produkteigenschaften:

Technologie	Acrylat
Chemische Basis	Urethanmethacrylat
Aussehen (unausgehärtet)	Grün, flüssig[LMB]
Fluoreszenz	Ja, unter UV-Licht[LMB]
Komponenten	Einkomponentig - kein Mischen erforderlich
Viskosität	Hoch
Aushärtung	anaerob
Sekundärhärtung	Aktivator
Anwendung	Fügen von Welle-Nabe-Verbindungen
Festigkeit	Hoch

LOCTITE® 638™ wird zum Kleben von zylindrischen Fügeteilen eingesetzt, besonders wenn Klebespalte bis 0,25mm auftreten können und maximale Festigkeit bei Raumtemperatur gefordert wird. Das Produkt härtet unter Luftabschluss zwischen enganliegenden Metallflächen aus und verhindert selbständiges Losdrehen und Undichtheiten durch Stöße und Vibrationen. Typische Anwendungen sind u.a das Befestigen von Gleitbuchsen in Gehäusen und auf Wellen.

NSF International

Freigegeben nach NSF Kategorie P1 for zum Einsatz als Dichtstoff in der Lebensmittelverarbeitung in Bereichen, wo kein Kontakt mit Lebensmitteln möglich ist. **Hinweis:** Dies ist eine regionale Freigabe. Wenn Sie weitere Klarstellung und Informationen benötigen, wenden Sie sich bitte an Ihren zuständigen technischen Service.

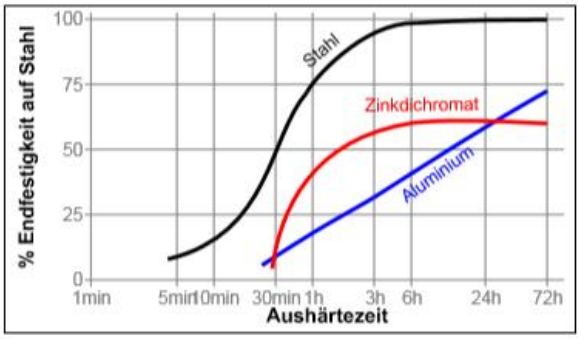
MATERIALEIGENSCHAFTEN

Spez. Dichte bei 25 °C	1,09
Flammpunkt - siehe Sicherheitsdatenblatt	
Viskosität, Brookfield - RVT, 25 °C, mPa·s (cP):	
Spindel 3, bei 20 U/min	2.000 bis 3.000[LMB]
Viskosität, EN 12092 - MV, 25 °C, nach180 s, mPa·s (cP):	
Schergeschwindigkeit 129 s^{-1}	1.500 bis 3.000

TYPISCHE AUSHÄRTEEIGENSCHAFTEN

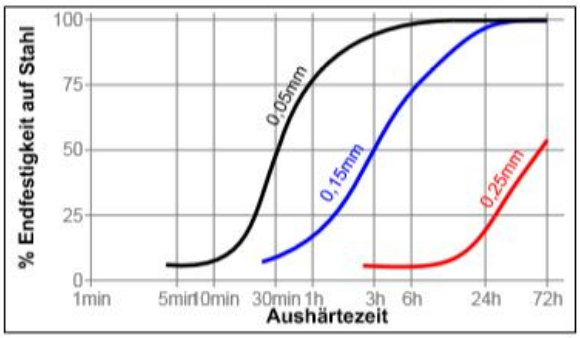
Aushärtegeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Material

Die Aushärtegeschwindigkeit ist abhängig von der verwendeten Materialoberfläche. Das folgende Diagramm zeigt die zeitliche Entwicklung der Scherfestigkeit bei Wellen und Naben aus Stahl verglichen mit anderen Materialien. Geprüft gemäß ISO 10123.



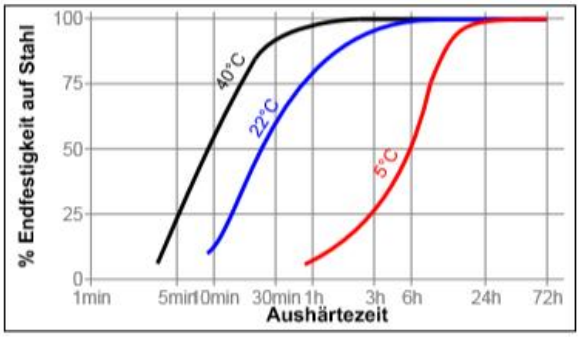
Aushärtegeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Spalt

Die Aushärtegeschwindigkeit ist abhängig vom Klebespalt. Das folgende Diagramm zeigt die zeitliche Entwicklung der Scherfestigkeit auf Wellen und Naben aus Stahl bei unterschiedlichen Spalten. Geprüft gemäß ISO 10123.



Aushärtegeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur

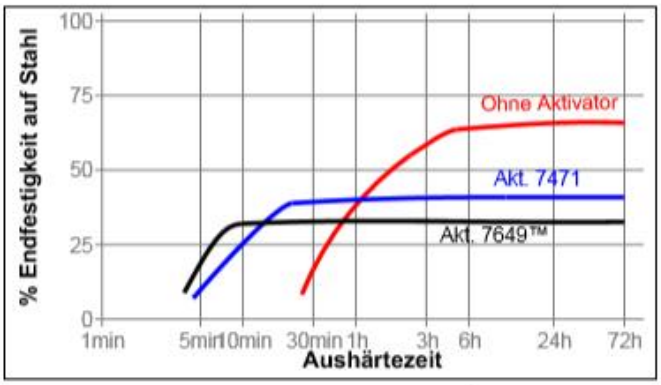
Die Aushärtegeschwindigkeit ist abhängig von der Temperatur. Das folgende Diagramm zeigt die zeitliche Entwicklung der Scherfestigkeit bei Wellen und Naben aus Stahl bei unterschiedlichen Temperaturen. Geprüft gemäß ISO 10123.



Henkel

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Aushärtegeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Aktivator
Ist die Aushärtegeschwindigkeit zu langsam, oder sind große Spalten vorhanden, kann durch Einsatz eines Aktivators die Aushärtung beschleunigt werden. Das folgende Diagramm zeigt die zeitliche Entwicklung der Scherfestigkeit bei zinkdichromatierten Stahlwellen und -naben unter Verwendung von Aktivator 7471 und 7649. Geprüft gemäß ISO 10123.



TYPISCHE EIGENSCHAFTEN IM AUSGEHÄRTETEN ZUSTAND

Physikalische Eigenschaften:

Wärmeausdehnungskoeffizient, ASTM D 696, K^{-1}	80×10^{-6}
Wärmeleitfähigkeitskoeffizient, , W/(m·K)	0,1
Spezifische Wärmekapazität, kJ/(kg·K)	0,3

FUNKTIONSEIGENSCHAFTEN IM AUSGEHÄRTETEN ZUSTAND

Eigenschaften

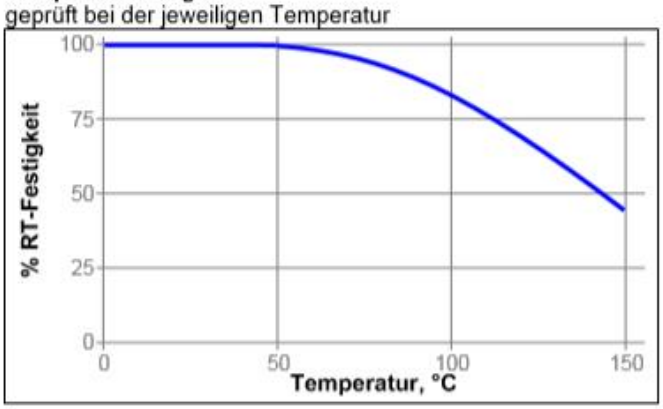
Nach 24 Stunden bei 22 °C
Druckscherfestigkeit, ISO 10123:
Wellen und Naben aus Stahl — N/mm² ≥25[LMB] (psi) (3.625)

Nach 15 Minuten bei 22 °C
Druckscherfestigkeit, ISO 10123:
Wellen und Naben aus Stahl — N/mm² ≥13,5[LMB] (psi) (1.960)

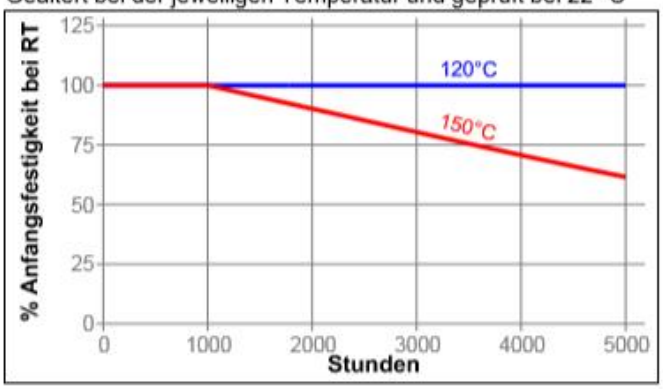
BESTÄNDIGKEIT GEGEN UMGEBUNGSEINFLÜSSE

Aushärtezeit 1 Woche bei 22 °C
Druckscherfestigkeit, ISO 10123:
Wellen und Naben aus Stahl

Temperaturfestigkeit
geprüft bei der jeweiligen Temperatur



Wärmealterung
Gealtert bei der jeweiligen Temperatur und geprüft bei 22 °C



Beständigkeit gegen Medien
Alterungstest wie beschrieben und geprüft bei 22°C.

		% Anfangsfestigkeit		
Medium	**°C**	**100 h**	**500 h**	**1000 h**
Motoröl	125	100	100	100
Bleifreies Benzin	22	100	90	85
Bremsflüssigkeit	22	100	90	80
Wasser/Glycol 50/50	87	95	80	80
Ethanol	22	100	100	75
Aceton	22	90	90	90

TU Bibliothek Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.

ALLGEMEINE INFORMATION

Dieses Produkt ist nicht geeignet für reinen Sauerstoff und/oder sauerstoffangereicherte Systeme und sollte nicht als Dichtstoff für Chlor oder stark oxidierende Medien gewählt werden.

Sicherheitshinweise zu diesem Produkt entnehmen Sie bitte dem Sicherheitsdatenblatt.

Wenn die zu verklebenden Oberflächen vorher mit einem wässrigen Reinigungssystem gereinigt werden, ist darauf zu achten, dass die Verträglichkeit zwischen Reiniger und Klebbzw. Dichtstoff gegeben ist. In manchen Fällen können diese wässrigen Reiniger die Aushärtung bzw. die Eigenschaften des Klebstoffes beeinträchtigen.

Dieses Produkt wird nicht für Kunststoffe empfohlen (insbesondere bei thermoplastischen Materialien können Spannungsrisse auftreten). Dem Anwender wird empfohlen, vorher die Verträglichkeit mit solchen Materialien zu prüfen.

Gebrauchshinweise

Montage

1. Zur Erzielung optimaler Ergebnisse alle Oberflächen (innen und aussen) mit einem Loctite® Reiniger reinigen und trocknen lassen.
2. Bei inaktiven Metalloberflächen oder zu langsamer Aushärtegeschwindigkeit Teile mit Aktivator 7471 oder 7649 besprühen und trocknen lassen.
3. **Für Schiebesitze** den Klebstoff ringförmig außen an der Vorderkante der Welle und auf die Innenseite der Nabe auftragen und Teile beim Zusammenfügen gegeneinander drehen, um eine optimale Verteilung des Klebstoffes zu gewährleisten.
4. **Für Presspassungen** den Klebstoff gleichmäßig auf beide Fügeflächen auftragen und Teile schnell und zügig fügen.
5. **Für Schrumpfverbindungen** die Welle mit Klebstoff benetzen und die Nabe erwärmen, damit ausreichend Spiel zum Fügen der Teile entsteht.
6. Die Teile sollten nicht bewegt werden, bis Handfestigkeit erreicht wird.

Demontage

1. Die Verbindung lokal auf ca. 250 °C erwärmen. Im erwärmten Zustand demontieren.

Reinigung

1. Ausgehärtetes Produkt kann durch Einlegen in ein Loctite® Lösungsmittel und anschließende mechanische Bearbeitung z.B. mit einer Drahtbürste entfernt werden.

Loctite Material-Spezifikation LMS

LMS vom 01. September 1995. Prüfberichte über die angegebenen Eigenschaften sind für jede Charge erhältlich. LMS-Prüfberichte enthalten ausgewählte, im Rahmen der Qualitätskontrolle festgelegte Prüfwerte, die als relevant für Kunden-Spezifikationen erachtet werden. Darüber hinaus sind umfassende Kontrollmaßnahmen in Kraft, die eine gleichbleibend hohe Produktqualität gewährleisten. Spezifikationen unter Berücksichtigung von speziellen Kundenwünschen können über die Qualitätsabteilung von Henkel koordiniert werden.

Lagerung

Produkt im ungeöffneten Behälter in trockenen Räumen lagern. Hinweise zur Lagerung können sich auf dem Etikett des Produktbehälters befinden.

Optimale Lagerung: 8 °C bis 21 °C Durch Lagerung unter 8°C und über 28°C können die Produkteigenschaften nachteilig beeinflusst werden.

Aus dem Gebinde entnommenes Produkt kann beim Gebrauch verunreinigt worden sein. Deshalb keine Produktreste in den Originalbehälter zurückschütten. Henkel kann keine Haftung für Material übernehmen, das verunreinigt oder in einer Weise gelagert wurde, die von den oben aufgeführten Bedingungen abweicht. Wenn Sie weitere Informationen benötigen, wenden Sie sich bitte an Ihren zuständigen technischen Service oder den Kundenbetreuer vor Ort.

Umrechnungsfaktoren

(°C x 1.8) + 32 = °F
kV/mm x 25.4 = V/mil
mm / 25.4 = inches
µm / 25.4 = mil
N x 0.225 = lb
N/mm x 5.71 = lb/in
N/mm² x 145 = psi
MPa x 145 = psi
N·m x 8.851 = lb·in
N·m x 0.738 = lb·ft
N·mm x 0.142 = oz·in
mPa·s = cP

Hinweis

Die hierin enthaltenen Daten dienen lediglich zur Information und gelten nach bestem Wissen als zuverlässig. Wir können jedoch keine Haftung für Ergebnisse übernehmen, die von anderen erzielt wurden, über deren Methoden wir keine Kontrolle haben. Der Anwender selbst ist dafür verantwortlich, die Eignung von hierin erwähnten Produktionsmethoden für seine Zwecke festzustellen und Vorsichtsmaßnahmen zu ergreifen, die zum Schutz von Sachen und Personen vor den Gefahren angezeigt wären, die möglicherweise bei der Handhabung und dem Gebrauch dieser Produkte auftreten. Dementsprechend **lehnt die Firma Henkel im besonderen jede aus dem Verkauf oder Gebrauch von Produkten der Firma Henkel entstehende ausdrücklich oder stillschweigend gewährte Garantie ab, einschließlich aller Gewährleistungsverpflichtungen oder Eignungsgarantien für einen bestimmten Zweck. Die Firma Henkel lehnt im besonderen jede Haftung für Folgeschäden oder mittelbare Schäden jeder Art ab, einschließlich entgangener Gewinne.** Die Tatsache, dass hier verschiedene Verfahren oder Zusammensetzungen erörtert werden, soll nicht zum Ausdruck bringen, dass diese nicht durch Patente für andere geschützt sind, bzw. unter Patenten der Firma Henkel lizenziert sind, die solche Verfahren oder Zusammensetzungen abdecken. Wir empfehlen jedem Interessenten, die von ihm beabsichtigte Anwendung vor dem serienmäßigen Einsatz zu testen und dabei diese Daten als Anleitung zu benutzen. Dieses Produkt kann durch eines oder mehrere in- oder ausländische Patente oder Patentanmeldungen geschützt sein.

Verwendung von Warenzeichen

LOCTITE ist ein Warenzeichen der Firma Henkel

Referenz 0.3

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek WIEN Your knowledge hub