

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

FAKULTÄT FÜR ELEKTROTECHNIK
UND INFORMATIONSTECHNIK

Institut für Festkörperelektronik

Studienarbeit

*Entwicklung eines Faserziehturms zur Herstellung von
bimorphen Fasern*

Vorgelegt von: Dustin Hanusch
geboren am: 13.02.2000
Studiengang Mechatronik

Betreuer: Dipl.-Ing. Markus Koenigsdorff
Verantwortlicher Hochschullehrer: Prof. Gerald Gerlach

Tag der Einreichung: 00.00.2023

Aufgabenstellung für die Studienarbeit

Name, Vorname: Hanusch, Dustin
Matrikelnummer: 4844370
Studiengang: Mechatronik
Thema: Entwicklung eines Versuchstandes zur Herstellung künstlicher Muskelfasern und Sensorgarne durch thermisches Faserziehen

Zielsetzung:

Ein Schwerpunkt im Forschungsgebiet der Soft-Robotik ist die Entwicklung von textilen künstlichen Muskeln und Sensoren. In aktuellen Veröffentlichungen wurde das thermische Ziehen als geeignetes Herstellungsverfahren identifiziert, da es die laterale Größe von Preforms erheblich reduzieren kann und gleichzeitig die Verwendung mehrerer Materialien und nicht zylindrischer Garnquerschnitte ermöglicht. Da für dieses Herstellungsverfahren frei auf dem Markt keine Systeme zur Verfügung stehen, soll im Rahmen der Studienarbeit ein Versuchstand entwickelt werden, welcher die Untersuchung des Verfahrens zur Herstellung von Aktor- und Sensorgarnen ermöglicht.

Dabei sind folgende Schwerpunkte zu bearbeiten:

- Recherche und Dokumentation der Anforderungen an den Versuchstand
- Entwicklung der mechanischen sowie elektronischen Baugruppen
- Montage und Inbetriebnahme des Versuchsstandes

Die Studienarbeit wird in deutscher / englischer Sprache verfasst.*

* (Zutreffendes unterstreichen)

Betreuer: Dipl.-Ing. Markus Koenigsdorff
Datum Arbeitsbeginn: 01.10.2023
Einzureichen bis: 01.03.2024



Prof. Dr.-Ing. habil. Gerald Gerlach
Prüfer



Dustin Hanusch
Student

Kurzfassung

Abstract

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	3
1 Einleitung und Problemstellung	4
2 Stand der Technik	5
2.1 Elektrospinnen mit zwei Düsen	5
2.2 Thermisches Faserziehen	6
3 Präzisierung der Aufgabenstellung	7
3.1 Analyse des Prozesses	7
3.2 Anforderungsliste	8
4 Entwurf	10
4.1 Vorversuche	10
4.2 Abschätzung der Systemgeschwindigkeiten	13
4.3 Abzug	15
4.3.1 Varianten	15
4.3.2 Dimensionierung und Komponentenauswahl	17
4.3.2.1 Antriebsmoment an der Spule	17
4.3.2.2 Spulenaufnahme	18
4.4 Materialzufuhr	19
4.4.1 Varianten	20
4.4.1.1 Linearführung	20
4.4.1.2 Materialhalterung	22
4.4.2 Dimensionierung und Komponentenauswahl	23
4.4.2.1 Linearführung	23
4.4.2.2 Materialaufnahme —Entfernen—	26
4.5 Steuerung	26
4.5.1 Prozessbeschreibung - strukturierte Darstellung	26
4.5.2 Schaltungsentwurf	26
4.5.3 Implementierung	26
5 Bedienungsanleitung	27
5.1 Quick Start Guide	27
5.2 Sicherheitshinweise	29
5.3 Fehlerbehebung	30

6 Erprobung des Versuchsstandes	31
7 Zusammenfassung und Ausblick	32
Literaturverzeichnis	33
Abbildungsverzeichnis	34
Tabellenverzeichnis	35

Abkürzungsverzeichnis

Materialien

PLA Polylactide

ABS Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer

PETG Polyethylenterephthalat modifiziert mit Glykol

EVAC Ethylen-Vinylacetat-Copolymer

PES Polyethersulfone

Sn Zinn

1 Einleitung und Problemstellung

2 Stand der Technik

2.1 Elektrospinnen mit zwei Düsen

Das Elektrospinnen ist ein verfahren zur Herstellung komplexer Endlosfasern, welche Durchmesser von wenigen Mikrometern bis hin zu einigen Nanometern ermöglicht. Zum erzeugen der Faser wird eine Schmelze oder Lösung des zu verziehenden Materials benötigt. Diese wird durch eine Düse gefördert, welche zugleich die Elektrode ist. Gegenüber der Elektrode ist mit einem Abstand von circa 10-25cm eine Gegenelektrode positioniert. Zwischen den zwei Elektroden wird eine Hochspannung angelegt, welche ein Elektrisches Feld mit einer Stärke von $100-500 \frac{kV}{m}$ erzeugt. Durch die Spannung verformt sich der Tropfen am Austrittspunkt der Düse zu einem Konus. Wird die Spannung nun noch weiter erhöht tritt ein Strahl aus der Schmelze aus, welcher als "Jet" bezeichnet wird. Auf dem Weg zur Gegenelektrode verjüngt sich die Faser und härtet aus [4]. Dieses einfache Grundprinzip lässt sich adaptieren um bimorphe Fasern herzustellen. Dazu werden nun die Düsengeometrien angepasst um die Faser dem Anwendungszweck gerecht zu modellieren.

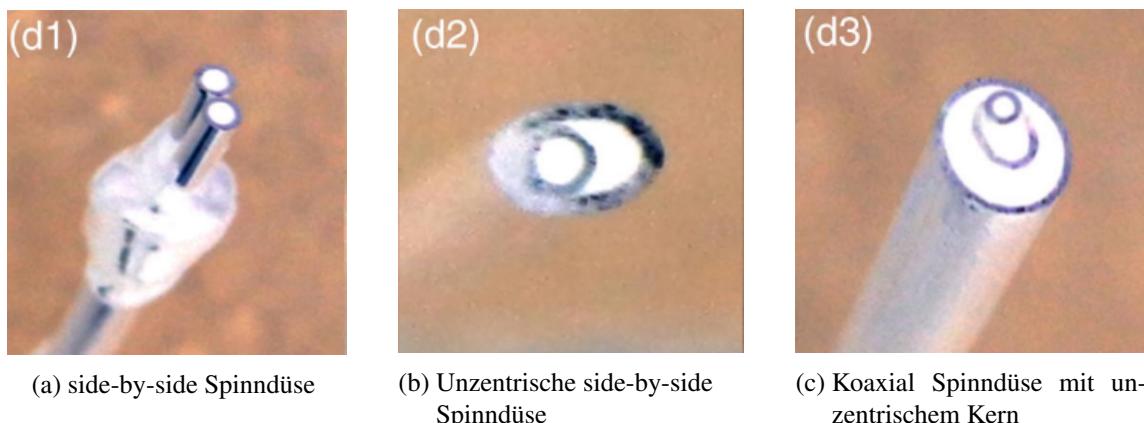


Abbildung 2.1: Spinndüsengeometrien [10]

Die in Abbildung 2.1 dargestellten Formen hätten das Potential eine Faser zu erzeugen die vom Aufbau den Anforderungen entspricht. Aufgrund der Verfahrensweise ist jedoch mit diversen Problemen zu rechnen.

Das wichtigste ist das die Verwendeten Flüssigkeiten miteinander kompatibel sind und so das Spinnen einer Faser ermöglichen. Um dies festzustellen gibt es vier Merkmale die erfüllt sein sollten. Als erstes darf keins der Fluide die Fähigkeit besitzen die Düsen zu verstopfen. Zweitens ist es wichtig das zwischen den Flüssigkeiten weder chemische noch physikalische Reaktionen auftreten und das es zwischen den Lösungen kein großes Konzentrationsgefälle gibt, da eine Diffusion die Spinnfähigkeit beeinflusst. Als letztes ist es wichtig das die Kräfte an den Grenzflächen so gering wie möglich sind [10]. Diese enge Abhängigkeit von Geometrie und Materialeigenschaften und deren Wechselwirkungen macht das verfahren recht unflexibel. Weiterhin ist der Produzierbare Dimensionumfang der Fasern sehr gering was die

Einsetzbarkeit einschränkt. Das größte Manko ist jedoch das nur Fluide verarbeitet werden können. Im gewünschten Anwendungsbereich führt das dazu das ein schnelles und flexibles Ausprobieren verschiedenster Materialkombination schwierig wäre.

2.2 Thermisches Faserziehen

Das Thermische Faserziehen ist eine relativ gut erforschte Technik und wird vor allem in der Informationstechnik angewandt. Dieses Verfahren wird zum Beispiel zur Herstellung von optischen Fasern, wie Glasfasern, verwendet. Zumeist werden so nur Fasern aus einem Material hergestellt, wobei sich das Prinzip zur Herstellung von bimorphen Fasern kaum unterscheidet. Abbildung 2.2 zeigt den

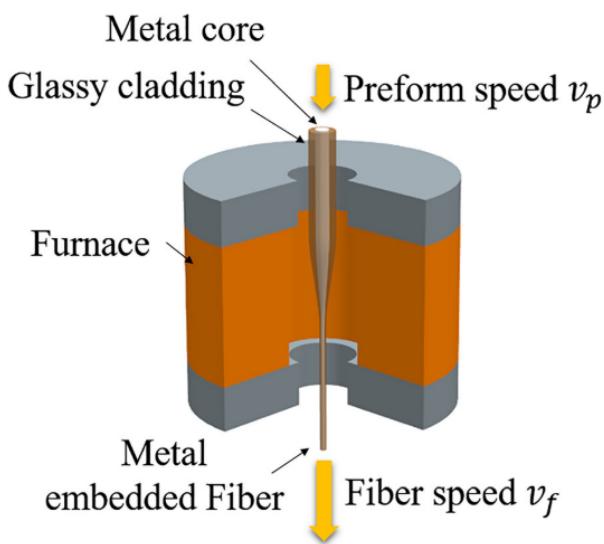


Abbildung 2.2: Schematischer Aufbau thermisches Ziehen
[11]

sollte eine verzugsbereite Multimaterial-Preform vorliegen. Während des im ofen sollte die Preform aufgrund ihres Eigengewichtes eine Verjüngung ausbilden. Wird nun an der Faser gezogen kann mittels Gleichung 2.1 die Dicke der abgezogenen Faser variiert werden[11].

$$\frac{v_f}{v_p} = \frac{D_p^2}{D_f^2} \quad (2.1)$$

Der große Vorteil dieses Verfahrens ist die Möglichkeit vielfältig Preformen einfach und schnell auszuprobieren. Dabei ist zu beachten, das die Preformen, nicht auf einen Runden Querschnitt limitiert sind, sondern das auch andere Symmetrisch aufgebaute Ausgangsformen denkbar sind. Einzig das Abschmelzverhalten der einzelnen Materialen ist schwer vorherzusagen und sollte in einzelnen versuchen untersucht werden. In verschiedenen anderen Veröffentlichungen wurde dieses Verfahren ebenfalls verwendet um Sensor und Aktorgarne herzustellen, was die Anwendbarkeit für das vorliegende Problem bestätigt[5][6]. Für den Fall das sich dieses Verfahren bewährt ist der Prozess auch gut Skalierbar und würde sich so für ein Industrielle Fertigung eignen.

Schematischen Aufbau des Prozesses, bei welchem in eine Faser aus Metall hergestellt wird. Bevor eine Faser gezogen werden kann muss zunächst die Preform hergestellt werden. Verwendet wird ein Bündel aus mehreren Strängen Zinn (Sn), welche in einem Mantel aus Polyethersulfone (PES) eingebracht werden. Wichtig ist dabei das der Mantel eine möglichst gut kontrollierbare Viskosität beim erwärmen vorweist. Weiterhin sollte die Materialkombination so gewählt sein das der Kern während des Prozesses Schmelzen, also eine ähnliche Schmelztemperatur wie der Mantel besitzt. Wenn nun die Materialien während des Erwärmens nicht miteinander Reagieren

3 Präzisierung der Aufgabenstellung

Ziel der Studienarbeit ist die Entwicklung eines Versuchstandes, welcher die kleinskalige Produktion von bimorphen Sensor- und Aktorgarnen ermöglicht. Der Hauptgrund für die Eigenentwicklung ist, das es bisher keine auf dem Markt verfügbaren Systeme gibt.

3.1 Analyse des Prozesses

Der Grobe Ablauf des Prozesses wird hier umrissen und im weiteren näher Spezifiziert. Im allgemeinen soll folgendes Realisiert werden:

Die Anlage soll die Aufnahme einer Vorkonfektionierten Preform ermöglichen. Diese soll in eine Heizeinheit eingeführt werden. Wie in Kapitel 3.2 beschrieben soll es dort zu einer Verjüngung der Preform auf ein Endmaß kommen. Die Faser soll anschließend aufgenommen und für weiter Prozesse zu Verfügung gestellt werden. Um den Prozess besser Analysieren zu können wird er in vier Teilprozesse geteilt. Erstens die Heizeinheit, welche die Temperaturführung des Materials übernimmt. Zweitens die Fördereinheit, die zur Bereitstellung des Ausgangsmaterials dient. Drittens der Abzug, welcher zur Aufnahme und Bewegung des Garns verwendet werden soll. Viertens die Steuerung welche sich aus der Schaltung und der Software zusammensetzt und alle Teilprozesse sinnvoll miteinander verbindet.

(a) Heizeinheit

Die Heizung sollte in der Lage sein von allen seiten hize auf das Material zu übertragen was schnell auf einen Rohrofen schließen lässt, da sich dort das Material endlos einführen lässt. Wichtig ist weiterhin das eine Prizise und Stabile Temperaturführung möglich ist, da sich diese Stark auf die Viskosität der Preform auswirkt. So kann verhindert werden das eine Viskositätsschwankung zu einer Ungleichmäßigen Faser führt. Auch der Anwenderschutz sollte berücksichtigt werden, Was bedeutet das sowohl an eine Hizeschirmung sowie eine Notfallabschaltung der Temperatur möglich sein sollte. Die beiheizbare Länge des Ofens ist ebenfalls Faktor der die Art und weise der Faserbildung beeinflussen kann und sollte so gewählt werden das es zu einem stabilen fluss kommen kann. Ein Problem was allgemein bei Heizungen auftritt ist die Trägheit. Da sich deshalb schnelle Temperatursprünge mit einem Ofen nicht realisieren lassen muss der Prozess so einstellbar sein das dies nicht nötig ist und das Temperaturband nur langsam zu durchfahren ist.

(b) Fördereinheit

Die Fördereinheit sollte in der Lage sein verschiedene Querschnitte von Materialien aufzunehmen und in die Öffnung des Ofens zu befördern. besonders wichtig ist dabei das sehr langsame Bewegungen möglich sind, da in Quellen von Fördergeschwindigkeiten von weinigen $\mu m * s^{-1}$ [11] berichtet wird.

(c) Abzugseinheit

Der Abzug ist dafür verantwortlich einen Definierten Zug auf das garn auszüben und so an der

Dickenkalibrierung Anteil zu nehmen. Wichtig ist auch das er in der Lage ist ein breites Spektrum an Abzugsgeschwindigkeiten abzubilden um möglichst flexibel in der Materialauswahl zu bleiben. Diese Einheit ist weiterhin dafür Zuständig die Faser in geeigneter Art und Weise Aufzunehmen und für die Weiterverarbeitung bereitzustellen.

(d) **Steuerungseinheit**

Die Steuerung unterteilt sich in die Implementierung der Software und die Bereitstellung der Elektronik welche Aktoren und Sensoren verbindet. Die Elektronik sollte sowohl einen Personen- und Sachschutz wie auch die korrekte Ausführung des Prozesses ermöglichen. Es ist wichtig das im Betrieb auf alle Parameter der Anlage zugegriffen werden kann um verschiedenen Einflüssen manuell entgegenwirken zu können. Da es sich um einen Versuchstand handelt sollte auf große Automatismen verzichtet werden um in jedem Durchlauf klar nachvollziehen zu können was passiert ist. Sollte sich im weiteren Verlauf des Versuches aus den Daten eine gute Automatisierung ergeben ist dies der nächste Schritt, welcher jedoch nicht zwingender Bestandteil der ersten Ausführung der Anlage ist.

3.2 Anforderungsliste

Nr.	Beschreibung der Anforderung	P/W
1	Halbzeug	
1.1	Formfaktor: Rundstab, Quader	W
1.2	Durchmesser: [10mm, 45mm]	P
1.3	maximale Länge: 500mm	W
1.4	Material: Verbundkunststoff	P
2	Bauraum	
2.1	Maximalbreite: 2m	W
2.2	Maximalhöhe: 2m	W
2.3	Maximallänge: 2m	W
3	Gestell	
3.1	Ausführung als Item-Profilgestell	P
3.2	höhenverstellbare Füße zur Einstellung der Neigung des Gestells (in 2 Achsen)	P
4	Heizung	
4.1	Formfaktor: Rohrofen	P
4.2	Maximaltemperatur: 400°C	P
4.2	Länge: 590mm	P
4.2	beheizter Bereich: 500mm	P
5	Abzug	
5.1	Faserdurchmesser: 200µm - 2mm	P
5.2	Die Faser soll auf eine standardisierte Spule gewickelt werden.	P
5.3	Schnellwechselbarkeit der Spule soll erfolgen können	P
5.4	sensorische Dickenkontrolle der Faser	W

5.5	Geschwindigkeitskontrolle des Abzugs	W
6	Materialförderung	
6.1	Förderlänge: 500mm	W
6.2	Aufnahmedurchmesser: 10mm – 45 mm	P
6.3	Autostopp wenn das Material aufgebraucht ist	W
6.4	Förderung des Materials vertikal in das Heizrohr (ohne Wandberührung im Heizrohr)	P
7	Steuerung	
7.1	regelbare Geschwindigkeit der Materialzufuhr	P
7.2	Nullpunktterstellung bei unterschiedlichen Materiallängen	P
7.3	regelbare Geschwindigkeit des Abzugs	P
7.4	Parameter des Prozess (Temperatur, Geschwindigkeiten) sollen während des Prozesses manipulierbar sein	P
7.4	Manueller betrieb aller Teilmodule möglich (Tippbetrieb)	P
8	Sicherheit	
8.1	NOT-AUS: Deaktivieren aller bestromtenen Maschinenmodule	P
8.2	Kurzschlusschutz	P
8.3	elektrische Schutzklasse: min 1	P
8.4	IP-Schutzart: IP30	P
8.5	Berührungsschutz heißer Bauelemente	P
8.6	Wartung im stromlosen Zustand	P
9	Software	
9.1	Programmiersprache : C,C++	P
9.2	einfach erweiterbare Programmstruktur	W

Tabelle 3.1: Anforderungen an den Versuchstand

4 Entwurf

Zur konkreten Realisierung wurde das System in 4 Teilsysteme unterteilt, welche separat betrachtet werden können. In jedem Gebiet wird auf die Anforderungen sowie verschieden mögliche Varianten eingegangen. Je nach Realisierbarkeit wird eine Variante gewählt, dimensioniert und die entsprechenden Komponenten ausgewählt.

4.1 Vorversuche

Da das Fließverhalten der Kunststoffe nur schwer abschätzbar ist, wird zur Erprobung ein vereinfachter Aufbau verwendet. In das Heizrohr ist ein Stahlrohr eingeführt, welches das Original Keramik Innenrohr vor Verunreinigungen schützt. Die Probe wird Vertikal in das Rohr gehängt und erwärmt, zu sehen in Abbildung 4.1. Der Versuch soll Aufschluss über die nötige Abzugsgeschwindigkeit, Materialfördergeschwindigkeit und Form der Faser geben.



Abbildung 4.1: Testaufbau



Abbildung 4.2: EVAC

Die Erste Probe aus Abbildung 4.2 hat bei circa 205°C zu fließen begonnen. Dieser Versuch sollte nur veranschaulichen ob das gewählte Prinzip Funktionsfähig ist. Da sowohl die Faserdicke als auch die Fließform den erwartungen entsprechen, werden im nächsten Schritt andere Materialien verwendet. Um das Fließverhalten besser einschätzen zu können sind die folgenden Probenkörper mehrfarbig ausgeführt. Dadurch lässt sich beeurteilen wie die Faser aufgebaut ist.

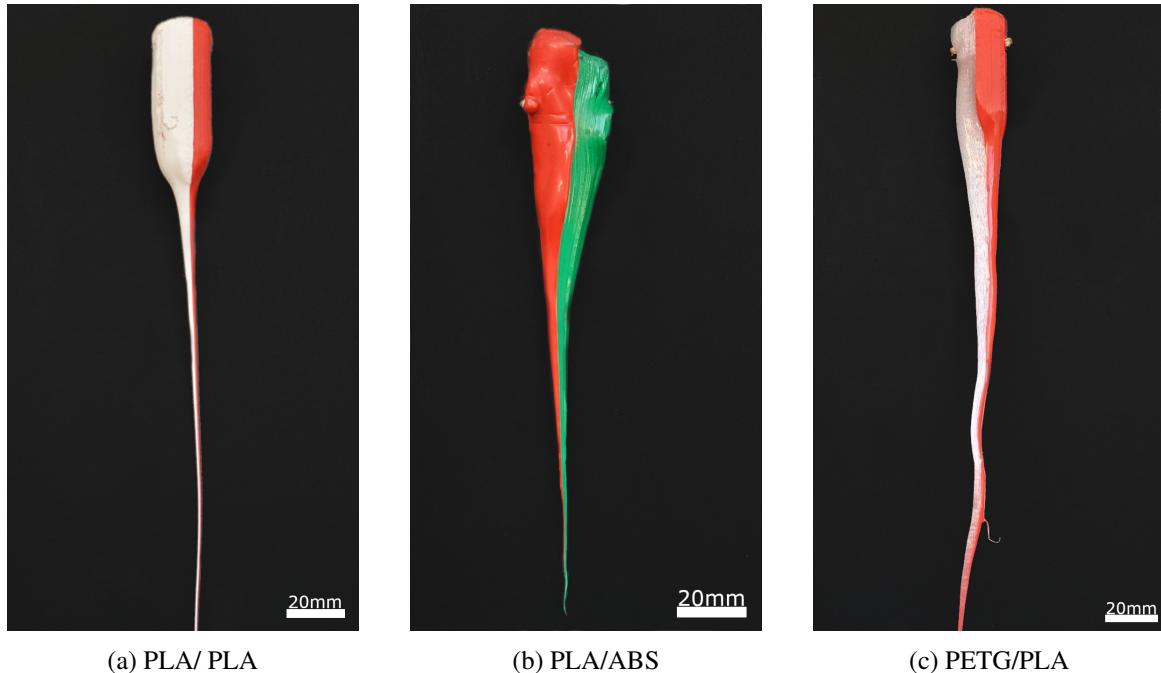


Abbildung 4.3: Probenkörper aus verschiedenen Materialkombinationen

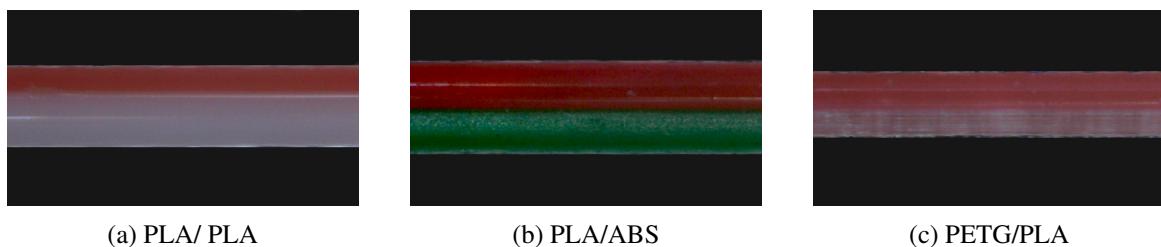


Abbildung 4.4: Fasern aus verschiedenen Materialkombinationen

Bei dem aktuell gewählten Prozess ist die Voraussetzung das sich beide Materialien des Probenkörpers, durch erwärmen in ihrer Viskosität soweit herab gesenkt werden können das es ohne weiteren Eingriff in den Vorgang zu einer Ausbildung der Faser kommt. In der Zweiten Versuchsreihe sichtbar das dies zu problemen führen kann. In der Abbildung 4.3a wird ein Probenkörper aus zwei verschiedenen Farben PLA verwendet, was zum Ziel hatte das Erste Ergebnis zu replizieren und die Verteilung der Materialien zu beurteilen. Die Temperatur bei welcher sich der Prozess eingestellt hat liegt bei ca. 353°C. Dabei ist zu beachten das es sich bei der Angabe nicht um die Tatsächliche Materialtemperatur sondern um den Einstellwert des Rohrofens handelt. Die Materialtemperatur wurde nicht ermittelt, was jedoch während der Inbetriebnahme des gesamten Versuchsstandes und zur Stabilisierung des Prozesses in Betracht zu ziehen ist. Bei dieser Probe ist zu sehen das sich ein gleichmäßiger Abschmelzkegel (Abbildung 4.3a) sowie eine gleichmäßige Verteilung der PLA-Anteile (Abbildung 4.4a) ausbildet. Die ermittelte mittlere Faserdicke (Tabelle 4.1) ist ebenfalls innerhalb der Vorgaben. Anders als In Kapitel 2.2 ist Sind die Probenkörper aus mehreren Materialien nicht mit einem stabil viskosem Mantel überzogen. So kann berurteilt werden ob dieser nötig ist oder ob es genügt wenn die Verarbeitungstemperaturen der Materialien eng beeinander liegen. In Abbildung 4.3b und 4.3c ist zu erkennen das der Abschmelzkegel sehr ungleichmäßig ist. Die Verarbeitungstemperaturen von PLA und ABS liegen circa 30°C auseinander. Bei

PETG und PLA sind es circa 40°C. Daraus lässt sich schließen das die Ausbildung eines gleichmäßigen Kegels maßgeblich von der Temperaturschere zwischen den gewählten Materialien abhängt. Das selbe Phänomen lässt sich auch bei der fertigen Faser erkennen. In Abbildung 4.4b ist zu sehen das die Verteilung der zwei Werkstoffe noch recht gleichmäßig ist, jedoch sind die zwei Halbzylinder nicht mehr vollständig an den Schnittfläche laminiert, was zu einer Sicke entlang der Grenzfläche führt. In Abbildung 4.4c ist die Temperaturdifferenz noch größer und so zeigt sich auch ein noch schlechteres Ergebnis. Zu sehen ist nur ein Dicke Schicht aus Polylactide (PLA) mit einer ganz dünnen Anhaftung von PETG. Auch wenn die erreichten Dicken (Tabelle 4.1) innerhalb der Grenzwerte liegen ist das Ergebnis nicht Erwartungsgemäß. Da sich der Aufbau der Faser in den letzten zwei Versuchen nicht kontrollieren ließ ist es schwierig ein konstantes Ergebnis erzeugen, welches Später als Sensor oder Aktor verwendet werden kann.

Materialkombination	mittlere Dichte ρ	Länge L	Masse m	Durchmesser d
PLA/PLA	1, 240 $\frac{g}{cm^3}$	126cm	0, 158g	358 μm
PLA/ABS	1, 145 $\frac{g}{cm^3}$	140cm	0, 125g	315 μm
PETG/ABS	1, 310 $\frac{g}{cm^3}$	168cm	0, 120g	263 μm

$$d = 2 \cdot \sqrt{\frac{m}{\rho * \pi * L}}$$

Tabelle 4.1: Ermittelte Faserdicke

Ein weiterer unbekannter Faktor ist die benötigte Abzugsgeschwindigkeit. Im Zuge einer Videoauswertung eines der Abzugsvorgänge konnte ein grober Richtwert von $72 \frac{mm}{s}$ ermittelt werden. Da es in dieser Studienarbeit mehr um die Entwicklung des Verfahrens und weniger um die Optimierung der Probenkörper geht sind die Erlangten Erkenntnisse sehr hilfreich und bestätigen die Funktionsweise des Verfahrens grundsätzlich.

4.2 Abschätzung der Systemgeschwindigkeiten

Da der Rohrofen bereits vorliegt und nicht ausgesucht werden muss, stellt sich eher die Farge wie sich das Material im Temperaturfeld verhält und wie sich das auf die Faserdicke auswirkt. Das Vorliegende

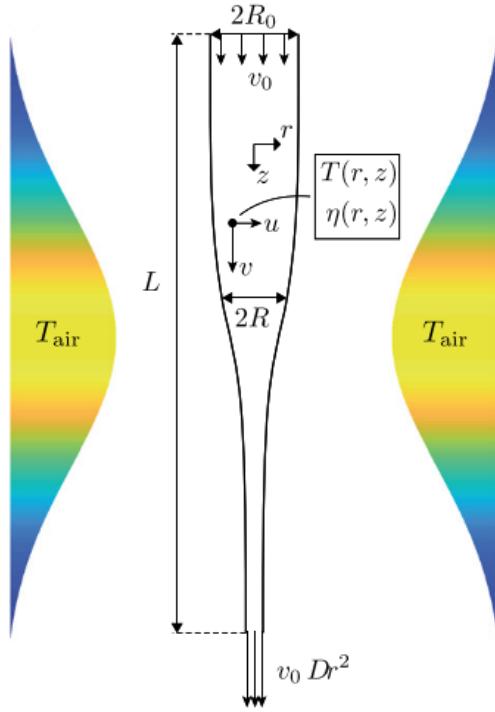


Abbildung 4.5: Temperaturfeld im Rohrofen [8]

Berechnungsmodell bezieht sich ausschließlich auf Systeme welche vom verhalten durch ihr Mantelmaterial bestimmt sind. Es beschreibt das System im 2-Dimensionalen Raum, durch die Ausdehnung $R(z)$ entlang der Hauptachse sowie durch ein Beschleunigungsfeld $u(r, z)$ in radialer und $v(r, z)$ in axialer Richtung. Weitern Einfluss nehmen das Temperaturfeld $T(r, z)$ sowie die Scherviskosität $\eta(r, z)$ [8]. Voraussetzung für die Anwendbarkeit ist das vorhandensein einer dünnen Faser.

$$\alpha^2 = \left(\frac{R_0}{L}\right)^2 \ll 1 \quad [8]Gl.(1) \quad (4.1)$$

Für den Fall des vorhandenen Ofens ergibt sich mittels Gleichung 4.1

$$\left(\frac{R_{0max}}{L}\right)^2 = \left(\frac{45mm}{500mm}\right)^2 = 8,1 \cdot 10^{-3}$$

ein Wert der deutlich unter eins liegt und die Bedingung somit erfüllt.

Die größte unbekannte Unbekannte im Entwicklungsprozess ist das Fließverhalten des Halbzeugs. Da die bimorphe Faser aus mehren Materialien mit verschiedenen thermodynamischen Eigenschaften besteht, ist das Verhalten bei der Erwärmung schwer abzuschätzen. Da zum Zeitpunkt der Auslegung die Materialkombination nicht vorliegt, wird mit einer groben Näherung über die Kontinuitätsgleichung (Gl. (4.2)) gearbeitet.

$$v_1 * A_1 = v_2 * A_2 \quad (4.2)$$

Da die möglichen Durchmesser des Halbzeuga ($d_1 = [10, 45]mm$) sowie die der Faser ($d_2 = [50 * 10^{-3}, 2]mm$) aus den Anforderungen hervorgehen, kann mit den Messwerten aus den Vorversuchen eine Abschätzung des Verhaltens getroffen werden.

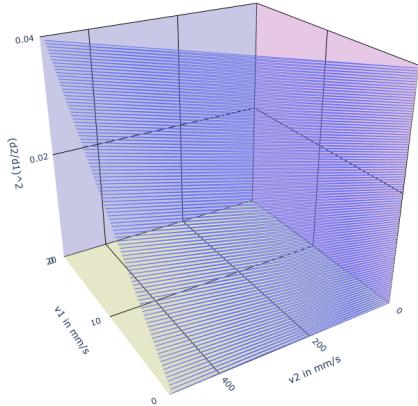
$$v_1 = v_2 * \frac{d_2^2}{d_1^2} \quad (4.3)$$

Für die gemessene Materialkombination PLA/PLA ergibt sich mittels Gleichung 4.3 die folgende För-

dergeschwindigkeit.

$$v_1 = 72 \frac{mm}{s} * \frac{(358 * 1^{-3}mm)^2}{(18,5mm)^2} \approx 26,96 \frac{\mu m}{s}$$

Da davon Auszugehen ist das sich nicht alle Materialien gleich verhalten oder sich die Form der Probenkörper ändert wird der benötigte Geschwindigkeitsbereich um die Werte aus dem Versuch hervorgegangen sind approximiert.



$$v_{1min} = 1 \frac{mm}{s} * \frac{(200 * 10^{-3}mm)^2}{45mm} \approx 0,0198 \frac{\mu m}{s}$$

$$v_{1max} = 500 \frac{mm}{s} * \frac{(2mm)^2}{10mm} \approx 20 \frac{mm}{s}$$

Abbildung 4.6: Abzugsgeschwindigkeiten

Die Entscheidung $500 \frac{mm}{s}$ (Abbildung 4.6) als maximale Abzugsgeschwindigkeit anzunehmen ist daraus begründet, das die im Versuch entstandene Faser bereits sehr nah an der unteren Dickengrenze liegt und das die Viskosität des Materials im Versuch sehr niedrig war. Deshalb gehe ich davon aus das ein Sicherheitsfaktor von circa 7 in der Abzugsgeschwindigkeit für viele mögliche Materialkombinationen ausreichend ist. So ergeben sich am ende zwei Geschwindigkeitsbereiche, einer für den Abzug und einer für die Materialförderseinheit. Dabei sit v_1 die Zuführgeschwindigkeit und v_2 die Abzugsgeschwindigkeit.

$$v_1 = [0, 198 \frac{\mu m}{s}; 20 \frac{mm}{s}] \quad v_2 = [1 \frac{mm}{s}; 500 \frac{mm}{s}]$$

4.3 Abzug

Der Abzug soll das Material aus dem Rohrofen abführen und die Faser in geeigneter Art und Weise für die Weiterverarbeitung auswerfen.

Die folgenden Bedingungen aus der Anforderungsliste sind zu erfüllen:

1. Die Dicke der abzuziehenden Faser soll je nach Material zwischen $200\mu\text{m}$ und 2mm einstellbar sein (Tabelle 3.1 Punkt 5.1). Dabei ist zu beachten das aufgrund verschiedener Fließeigenschaften der Kunststoffe nicht alle Dicken des Bereichs erreichbar sind.
2. Zur einfachen Weiterverarbeitung soll die Faser auf eine wechselbare Standardisierte Spule aufgewickelt werden (Tabelle 3.1 Punkt 5.2), welche sich einfach austauschen lässt (Tabelle 3.1 Punkt 5.3).

4.3.1 Varianten

(a) Aufrollen auf eine Spule

Die abtropfende Faser wird unterhalb des Rohrs aufgefangen und direkt auf eine Spule aufgewickelt (Abbildung: 4.7a). Zur Einhaltung der angeforderten Standartspule wird für diese ein Außendurchmesser von 100mm angenommen. Die benötigte Motordrehzahl ist direkt vom Spulendurchmesser (Gl. (4.4)) abhängig.

$$n = \frac{v}{\pi * d} \quad (4.4)$$

Somit ergibt sich mittels Gleichung 4.4 das benötigte Drehzahlband.

$$n = [0, 191; 95, 453] \frac{1}{\text{min}}$$

Da die Drehzahlen sehr gering sind und davon ausgehen ist das es die benötigte Abzugskraft ebenfalls ist, ist ein Direktantrieb der Spule denkbar. In diesem Fall ist das aus der Beschleunigung der Spule hervorgehende Drehmoment das welches überwiegt. Diese Variante bringt aber auch einige Probleme mit sich. Zunächst ist die Steuerung der Abzugsgeschwindigkeit nicht ganz trivial. Die Antriebsgeschwindigkeit muss aufgrund des steigendes Spulendurchmessers während des Wickelns im Laufe des Prozesses reduziert werden. Problematisch dabei ist den aktuellen Spulendurchmesser zu bestimmen da dieser sowohl von dem Durchmesser der Faser als auch von seiner Verteilung auf der Spule abhängt. Eine weitere Herausforderung ist der Start des Prozesses. So muss zu Beginn die Faser auf die Spule aufgebracht werden um überhaupt einen Zug auf die Faser ausüben zu können. Alles in allem bedeutet die das Voraussetzung für eine gute Regelbarkeit dieser Variante ist, das es eine Möglichkeit gibt die Faser initial in die Spule einzuhängen und das diese dann gleichmäßig über die Länge verteilt wird.

(b) Abtriebsrollen

Die Faser wird unterhalb des Heizrohrs zwischen zwei relativ kleine Rollen geklemmt, welche sie vom Halbzeug abziehen (Abbildung: 4.7b). Die Berechnung erfolgt analog zu (a). Nur der

Spulendurchmesser ist nun der Rollendurchmesser, welcher auf 10mm festgelegt wird. Das Drehzahlaband für den Motor, in diesem Fall, ergibt sich somit wie folgt.

$$n = [1, 910; 954, 9230] \frac{1}{min}$$

Zu erkennen ist direkt das die Benötigten Drehzahlen um den Faktor 10 größer sind, da die Werte jedoch nicht zu groß sind ist dies zunächst kein Punkt, der der Variante negativ ausgelegt werden kann. Anzumerken ist aber das die Rollen die Faser mit geeigneter Kraft klemmen müssen damit gezogen werden kann. Dabei darf die Anpresskraft jedoch nicht so groß sein das es zu einer Beschädigung der Faser kommt. Da Verschiedenen Materialien mit diversen Festigkeiten verwedet werden könnten ist die Kraft dem aktuellen Bedingungen immer anzupassen. Die Ermittlung der jeweils benötigten kraft ist Vermutlich nur durch Versuche möglich, da die Faser aus mehreren Materialien besteht und sich ja nach Rotation um ihre Längsachse unterschiedlich verhalten kann. Zudem sollten beide Räder Angetrieben sein um die Reibung auf der Faser zu minimieren.

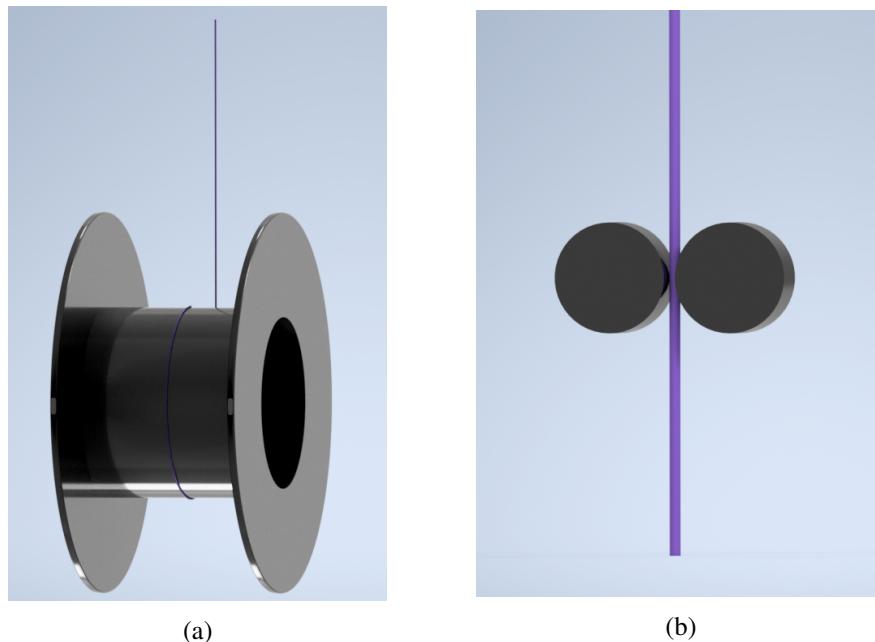


Abbildung 4.7: Abzugsvarianten

(c) Auswahl

Beide Varianten haben in gewissen Bereichen Vorteile und in anderen Nachteile. Jedoch gibt es bei Variante (b) den entscheidenden Nachteil das nach dem Abtreiben die Faser nirgends aufgenommen wird. Das führt dazu, das mit einer zusätzlichen Baugruppe, eine Lösung geschaffen werden muss. Da die naheliegende Möglichkeit der Aufnahme, der Faser, das Aufrollen ist, wären bei diesem Ansatz die Komponenten von Variante (a) zusätzlich vonnöten. Aus diesem Grund werden die Nachteile von Variante (a) in Kauf genommen. Da diese Art der Konstruktion ebenfalls simpler und mit einem niedrigeren Drehzahlband einhergeht ist sie für einen Prototypen am geeignetsten. Sollte sich während der Konstruktion und Erprobung herausstellen das die Geschwindigkeitssteuerung in diesem Fall zu instabil ist, können die Abtriebsrollen nachgerüstet werden.

4.3.2 Dimensionierung und Komponentenauswahl

4.3.2.1 Antriebsmoment an der Spule

Die zum abziehen der Faser benötigten Kräfte sind sehr klein und werden deshalb im nachfolgenden vernachlässigt. Somit ist das aufzubringende Antriebsmoment ausschließlich von der Massenträgheit und der Beschleunigung abhängig. Um die Berechnung zu vereinfachen wird eine konstante Beschleunigung angenommen.

Weiterhin werden folgende Annahmen getroffen:

Maximaldrehzahl	$n_{max} = 95,453 \text{ min}^{-1}$	Spulenhöhe	$h = 0,07 \text{ m}$
Spuleninnendurchmesser	$d_i = 0,1 \text{ m}$	Spulenaußendurchmesser	$d_a = 0,2 \text{ m}$
maximale Materialdichte	$\rho = 3000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Beschleunigungszeit	$t_0 = 4 \text{ s}$

Tabelle 4.2: Kennwerte zur Berechnung des Antriebsmomentes

Die Gleichung 4.5 kann nun zur berechnung verwendet werden.

$$M = J_P \cdot \ddot{\varphi} \quad (4.5)$$

Um die Massenträgheit J_P zu berechnen wird in erster Linie nicht die Masse der Spule benötigt. Es ist zwar in der Regel davon auszugehen das die Spule nur leer, zu Beginn des Prozesses, beschleunigt werden muss jedoch wird aus Gründen der Flexibilität die Anlage so ausgelegt das die Beschleunigung auch mit voller Spule möglich ist.

$$m = (d_a^2 - d_i^2) \cdot \frac{\pi \cdot h \cdot \rho}{4} \quad (4.6)$$

Vereinfacht betrachtet ist die Spule ein Hohlzylinder weshalb die Masse mit Gleichung 4.6 berechnet werden kann. Der äußere Durchmesser d_a steigt dabei je mehr Faser aufgewickelt wurde. Um auch hier einfach zu bleiben werden die beim aufwickeln entstehenden Freiräume nicht berücksichtigt.

$$J_P = m \cdot \frac{d_a^2 + d_i^2}{8} \quad (4.7)$$

So kann mit Gleichung 4.7 und 4.6 das Polare Massenträgheitsmoment der Spule vollständig beschrieben werden.

$$J_P = \frac{\pi \cdot h \cdot \rho}{32} \cdot (d_a^4 - d_i^4) \quad (4.8)$$

Nun wird noch die Winkelbeschleunigung benötigt, welche sich aus der ersten Ableitung der Winkelgeschwindigkeit ergibt.

$$\dot{\varphi} = 2\pi n \quad (4.9)$$

Da die Drehzahl Zeitveränderlich ist kann sie mit den Angaben aus Tabelle 4.2 wie folgt beschrieben werden.

$$n = \frac{n_{max}}{t_0} \cdot t \quad (4.10)$$

Somit folgt die Winkelbeschleunigung.

$$\ddot{\varphi} = 2\pi \frac{n_{max}}{t_0} \quad (4.11)$$

Werden jetzt alles Teile zusammengesetzt entsteht die Gleichung 4.12, welche eine Aussage über das benötigte Moment zum beschleunigen der Spule in Abhängigkeit vom Füllstand trifft.

$$M = \frac{\pi^2 \cdot n_{max} \cdot h \cdot \rho}{16 \cdot t_0} \cdot (d_a^4 - d_i^4) \quad (4.12)$$

Da vorher festgelegt wurde das die Momente nach dem Beschleunigen zu vernachlässigen sind, entspricht das Beschleunigungsmoment M dem benötigten Antriebsmoment M_G .

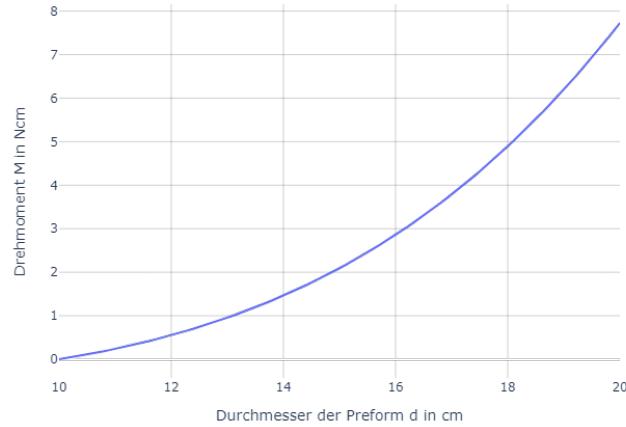


Abbildung 4.8: Benötigtes Antriebsmoment bei verschiedenen Füllständen der Spule

Die Abbildung 4.8 Zeigt den Drehmomentsanstieg für die Beschleunigung bei unterschiedlichen Füllständen der Spule. Das größte Moment was daraus hervorgeht beträgt circa $7,5 \text{ Ncm}$. Lässt sich für das Drehzahlband kein passender Motor finden ist auch der Einsatz eines Getriebes möglich. Damit der Aufbau möglichst einfach bleibt könnte ein Synchrogetriebe verwendet werden. Diese haben einen hohen Wirkungsgrad und die Übersetzung lässt sich leicht anpassen.

$$i = \frac{z_2}{z_1} = \frac{n_1}{n_2} \quad [1] \quad (4.13)$$

Mit Gleichung 4.13 lässt sich mit der Drehzahl des Motors die Passende Übersetzung berechnen. Synchrogetriebe besitzen einen Wirkungsgrad (η) der größer als $0,98$ ist [1].

$$M_G = M * \frac{z_2}{z_1} \frac{1}{\eta} \quad [1] \quad (4.14)$$

Das Angepasste Antriebsmoment (M_G) ist also von der Zähnezahl der Riemscheiben abhängig die so berechnet werden müssen das Drehmoment und Drehzahl zu Forderung passen.

4.3.2.2 Spulenaufnahme

Die Aufnahme der Spule muss sicherstellen das Sie nicht Durchrutschen kann, da darüber die Kraft auf die Faser wirkt. Da die Spule mit einer Zentralschraube befestigt wird (Abbildung 4.9), muss diese das Antriebsmoment aufnehmen können.

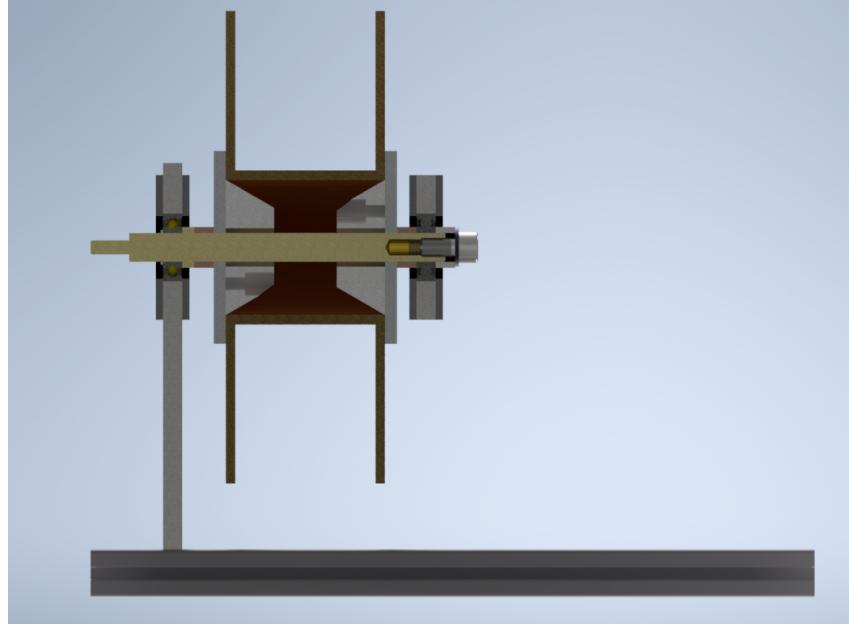


Abbildung 4.9: Hablschnitt des Abzugs

Um dies Sicherzustellen wird das benötigte Anzugsmoment der Schraube berechnet.

$$M_A = F_{Mmax} \cdot (0,16 \cdot P + 0,58 \cdot d_2 \cdot \mu_{Gmin} + \frac{D_{KM}}{2} \cdot \mu_{Kmin}) \quad [9] \quad (4.15)$$

Dabei ist F_{Mmax} die Vorspannkraft der Schraube, welche zum übertragen des Antriebsmomentes benötigt wird.

$$F_{Mmax} = \frac{M_{Motor}}{r_a \cdot \mu_{Tmin}} \quad [9] \quad (4.16)$$

Zur Berechnung wird nun das maximale Drehmoment des Motors ($M_{Motor} = 3Nm$) verwendet, auch wenn dieses viel größer ist als das benötigte Antriebsmoment. Sollte der Motor aus irgendeinem Grund, während des Prozesses, dieses Drehmoment Aufbringen soll sich die Schraubverbindung trotzdem nicht lösen. Unter Verwendung der Haftreibung zwischen Stahl und Stahl (μ_{Tmin}) von circa 0,15 und dem effektiven Radius ($r_a = 5,25mm$) des Schraubenkopfes der M8 schraube lässt sich die Vorspannkraft und somit auch das Anzugsmoment berechnen. Die Gewindesteigung P beträgt 1,25mm, der Flanken-durchmesser d_2 der Schraube beträgt 7,188mm und der Wirksame Kopfdurchmesser D_{KM} ist 10,5mm. Benötigt werden nun nur noch die Haftreibungszahl der Kopfauflage (μ_{Kmin}) von 0,15 und die Haftreibung im Gewinde (μ_{Gmin}) mit einem Wert von 0,12.

$$M_A \approx 5,668Nm \quad (4.17)$$

Da eine M8 8.8 Schraube mit bis zu 24Nm belastet werden darf kann die Spule so befestigt werden.

4.4 Materialzufuhr

Die Materialzufuhr besteht aus mehreren Problemstellungen. Es muss ein Probenkörper senkrecht über dem Heizrohr befestigt werden, welcher dann vertikal verfahren werden kann.

Die folgenden Bedingungen aus der Anforderungsliste sind zu erfüllen:

1. Die maximal zu fördernde Länge eines Probenkörpers soll 500mm betragen (3.1 Punkt 6.1)
2. Es sollen Proformen mit Durchmessern von $10\text{mm} - 45\text{mm}$ verwendbar sein (3.1 Punkt 6.2).
3. Außerdem sollen verschiedene Querschritte (Rund, Quader) von Probenkörpern aufgenommen werden können.

4.4.1 Varianten

Zur besseren Differenzierbarkeit werden verschiedene Varianten für die Linearführung und für die Aufnahme des Probenkörpers diskutiert.

4.4.1.1 Linearführung

Zur Förderung von Material gibt es Prinzipiell zwei Varianten. Erstens die Probe kann mit einer Linearachse und eine entsprechenden Aktor bewegt werden. Zweitens, sie kann ,ähnlich wie bei der Faser, zwischen zwei getriebenen Rollen eingeklemmt und nach unten gefördert werden.

(a) Linearachse

In Abbildung 4.10 ist der Aufbau einer Linearachse dargestellt. Neben dieser Variante gäbe es noch die Möglichkeit die in der Mitte der Darstellung verwendete Trapezgewindespindel durch ein anderes System zu Ersetzen. Geeignet dafür wären sowohl Hydraulische als auch Pneumatische Zylinder. Zu beachten ist aber das der Kostenaufwand für ein solchen Aktor viel größer sind. Weiterhin ist auch der Wartungsaufwand und die Fehleranfälligkeit viel größer. Das liegt zum einen daran das beide Alternativen niemals zu hundert Prozent dicht sind und es das es im Fehlerfall nicht nur zum Ausfall sondern auch zu Leckagen kommen kann, was im Falle eines Hydraulischen Systems einem großen Reperaturaufwand bedeuten würde.

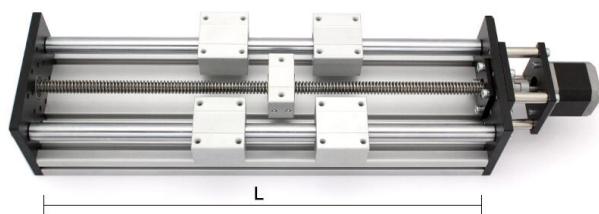


Abbildung 4.10: Beispiel einer Linearachse [3]

Bei der Verwendung eines Motors in Kombination mit einer Spindel, wie in Abbildung 4.10, ist sowohl der Wartungs- als auch der Kostenaufwand gering. Wenn bei diesem Aufbau der Motor ausfällt

hat es keine weiteren Folgen und er kann einfach ersetzt werden. Zu diskutieren ist noch welche Art von Spindelgetriebe verwendet werden sollte. Es gibt die Variante mit Trapezgewindespindel und die mit Kugelumlaufspindel. Was den Wirkungsgrad angeht ist die Trapezgewindespindel unterlegen, da diese Gleitreibung im Gewinde besitzt. Die Kugelumlaufspindel sitzt nicht in einem klassischen Gewinde sondern wird mit einer Mutter geführt die Kugeln statt eines Gewindes besitzt. Das führt neben der geringeren Reibung auch zu einer längeren Standzeit. Nachteilig ist jedoch, dass sie keine Selbsthemmung besitzt und so die Achse im stromlosen Zustand nach unten fällt, da sie vertikal verbaut werden muss. Da die zuvor berechneten Kräfte und Geschwindigkeiten sehr klein sind ist der Wirkungsgrad nicht entscheidend. Der wesentliche Vorteil der Trapezgewindespindel ist der geringere Preis weswegen diese für einen ersten Prototypen zu wählen ist. Diese Variante ist somit Preiswert und flexibel, da auf die Achse alle möglichen Arten von Materialhaltern montiert werden kann ohne die Steuerung oder das Getriebe verändern zu müssen.

(b) Abtriebsrollen

Eine weitere Möglichkeit ist ein ähnliches Vorgehen wie Variante (b) bei dem Abzug. Dazu würde der Probenkörper zwischen zwei Rollen geklemmt und nach unten gedrückt werden. In Abbildung 4.11 ist eine Entwurf eines solchen Systems zu sehen. Es ist wichtig zu beachten, dass sich je nach Durchmesser des Probenkörpers die Auflagefläche in den Rollen ändert, was dazu führen kann, dass zu wenig Reibung vorherrscht. Deswegen wäre hier für jeden Durchmesser eine andere Aufnahme von Nöten. Dies gilt auch, wenn an andere Querschnitte wie Quader gedacht wird. Vorteilhaft ist, dass diese Variante platzsparender ist und theoretisch beliebig lange Probenkörper zulässt.

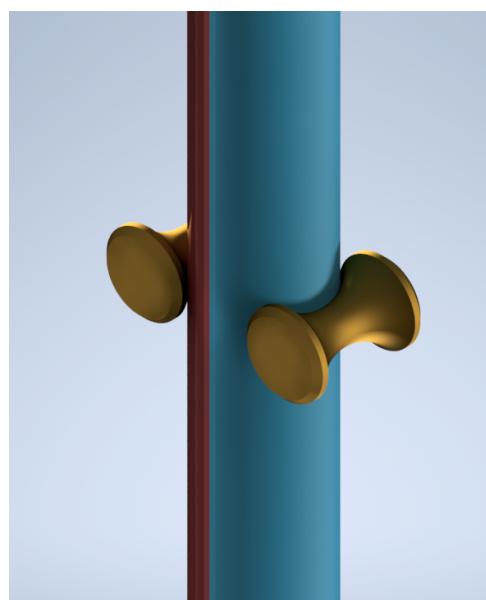


Abbildung 4.11: Abtriebsrollen für die Materialförderung

(c) Auswahl

Da die Linearachse eine einfache Modifizierbarkeit sowie besitzt und sie als fertiges Kaufteil erworben werden kann ist sie die bessere Wahl. Mit verschiedenen Anbauteilen lässt sich die Achse für ein breites Spektrum an Probenkörpern verwenden. Das mit der Linearachse keine beliebig langen Teile verarbeitet werden können spielt bei ein Versuchstand keine Rolle da zunächst eher kleine Proben in verschiedenen Konfigurationen verwendet werden sollen.

4.4.1.2 Materialhalterung

Aus dem oberen Vergleich geht hervor das eine Linearchse verwendet wird, weshalb hier nur verschiedene Halterungen für diesen Typ Achse diskutiert werden.

(a) Spannfutter

Eine Möglichkeit der Befestigung ist die Verwendung eines Spannfutters, wie es auch bei einer Drehbank zum Einsatz kommt.



Abbildung 4.12: Spannfutter 160mm für Drehbänke [7]

In Abbildung 4.12 ist ein solches zu sehen. Je nach Ausführung lassen sich die in der Mitte befindlichen Backen auf ein variables Maß einstellen und können so verschiedenste Größen von Probenkörpern aufnehmen. Werden nun noch ein paar Adapter (zum Beispiel eckig zu rund) beigelegt können auch variable Querschnitte aufgenommen werden. Ein weiterer Vorteil ist das die Probe immer beim festziehen automatisch zentriert wird. Negativ zu Betrachten ist das diese Futter sehr schwer sind, da sie im Originalen Einsatzfeld relativ große Kräfte aushalten müssen. Für den Versuchstand sind sie demzufolge überdimensioniert da die auftretenden Kräfte dort sehr klein sind.

(b) Klemmbacken

Eine einfachere Variante ist der Einsatz von Klemmbacken, wie in Abbildung 4.13. Diese funktionieren im Prinzip wie eine Schraubzwinge. Mit einer Schraube wird eine der blauen Backen so weit in die Mitte gedreht, dass sich die Probe über der Mitte des Rohrfens befindet. Dann wird die zweite Seite dagegen geschoben und fixiert so die Probenkörper. Je nach dem wie viel Drehmoment auf die Vorrichtung gegeben wird können Preformen unterschiedlich stark geklemmt werden.

Diese Variante ermöglicht außerdem die Halterung von runden und eckigen Querschnitten ohne Umbau oder den Einsatz von Adapters. Der Nachteil zu vorherigen Varianten ist das der Probenkörper nicht automatisch zentriert wird, weshalb die Einrichtung einer Probe etwas schwieriger ist.

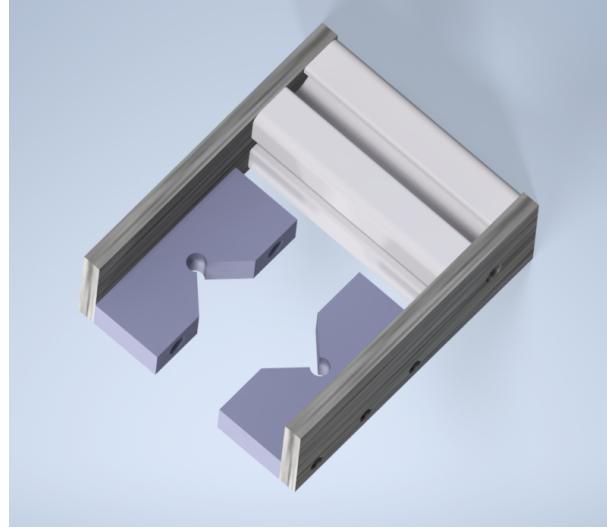


Abbildung 4.13: Klemmbacken zur Halterung von Probenkörpern

(c) Auswahl

Die Erste Variante ist zwar klar die bessere, jedoch ist sie auch wesentlich teurer und schwerer. Damit der Versuchstand so einfach und kosteneffizient wie möglich bleibt fällt die Wahl auf Variante (b), zum großen Teil auch deswegen weil sie viele verschiedene Probenkörper ermöglicht.

4.4.2 Dimensionierung und Komponentenauswahl

4.4.2.1 Linearführung

Zur Linearführung sind alle wirkenden Lasten zu berechnen um sicherzustellen das die Trapezgewindespindel diesen Standhält. Ebenfalls muss ein Motor ausgelegt werden der die entsprechenden Lasten bewegen kann.

(a) Axialkraft

Die einzige Last die auf das System wirkt ist jene, welche vom Eigengewicht des Probenkörpers ausgeht.

$$F = m \cdot g \quad (4.18)$$

Die zu auf die Spindelmutter wirkende Axialkraft F ergibt sich so mit Gleichung 4.18. Da die Masse noch Unbekannt ist muss diese Ermittelt werden.

$$m = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot L \cdot \rho \quad (4.19)$$

Zur Abschätzung der maximalen Masse wird ein zylindrischer Probenkörper mit einem Durchmesser $d = 50\text{mm}$ und einer Länge $L = 500\text{mm}$ angenommen. Die dichte der Probenkörper variiert je nach Materialkombination. Die mittlere Dichte der meisten verwendbaren Materialien liegt bei circa $1,5 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$. Um auch Materialkombinationen abzudecken die nicht im Entwurf bedacht wurden wird mit einem Sicherheitsfaktor von zwei, eine maximale mittlere Dichte ρ von $3,0 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ angenommen.

$$F = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot L \cdot \rho \cdot g \quad (4.20)$$

Mit Gleichung 4.20 und einer Fallbeschleunigung von $g = 9,81 \frac{m}{s^2}$ ergibt sich die auf die Trapezgewindemutter maximal wirkende Kraft (Gleichung 4.21).

$$F = \frac{\pi \cdot (0,05m)^2}{4} \cdot 0,5m \cdot 3000 \frac{kg}{m^3} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} = 28,893N \quad (4.21)$$

(b) Knickbeanspruchung

Da die Gesamte Kraft (Gleichung 4.21) von der Spindel gehalten werden muss, ist sicherzustellen, dass diese nicht abknickt. Aus dem Datenblatt des Herstellers lässt sich so mit Gleichung 4.22 die maximal zulässige Kraft auf die Spindel bestimmen.

$$F_{cp} = \frac{21 \cdot 10^4 \cdot D_3 \cdot \pi^3 \cdot f}{64 \cdot L_{cp}^2} \quad [2] \quad (4.22)$$

Im vorliegenden Fall ist jedoch der benötigte Kerndurchmesser D_3 die unbekannte, da die maximal wirkende Kraft zuvor berechnet wurde.

$$D_3 = \frac{F_{cp} \cdot 64 \cdot L_{cp}^2}{21 \cdot 10^4 \cdot \pi^3 \cdot f} \quad (4.23)$$

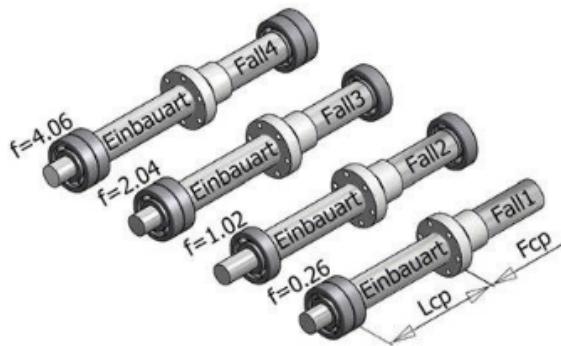


Abbildung 4.14: Lagerungstypen für Spindeltriebe [2]

Angenommen wird eine Lagerung $f = 1,02$ aus Abbildung 4.14. Somit ergibt sich mit der Kraft aus Gleichung 4.21 so wie einem maximalen Abstand zwischen Lager und Mutter von $L_{cp} = 500mm$ der minimale Kerndurchmesser.

$$D_3 = \frac{28,893 \cdot 10^{-3} kN \cdot 64 \cdot (500mm)^2}{21 \cdot 10^4 \cdot \pi^3 \cdot 1,02} \approx 6,93 \cdot 10^{-2} mm \quad (4.24)$$

Da die Kraft und dadurch der benötigte Kerndurchmesser sehr klein sind, können praktisch alle Größen von Trapezgewindespindeln verwendet werden. Es wird im weiteren von einer Spindel mit einem Flankendurchmesser von $12mm$ ausgegangen.

(c) Antriebs- und Haltemoment

Um die Last bewegen zu können, ist ein bestimmtes Drehmoment am Motor erforderlich. Da dieses

sehr stark von der Steigung der Spindel abhängt wird die Berechnung für einen festgelegten Wert für die Steigung durchgeführt. Aus Kapitel 4.2 wissen wir, dass die benötigten Geschwindigkeiten sehr klein sind jedoch präzise gesteuert werden müssen. Aus diesem Grund wird die kleinste, beim gewählten Hersteller angebotene, Steigung P von $3mm$ verwendet. Da jede Art von Getriebe verlustbehaftet ist wird mit Gleichung 4.25 zunächst der Wirkungsgrad bestimmt.

$$\eta = \frac{\tan(\alpha)}{\tan(\alpha + \beta)} \quad [2] \quad (4.25)$$

Um den Reibungswinkel β und den Steigungswinkel α zu berechnen werden die Gleichungen 4.26 und 4.27 verwendet.

$$\alpha = \arctan\left(\frac{P}{D_2 \cdot \pi}\right) \quad [2] \quad (4.26)$$

$$\beta = \arctan(\mu G) \quad [2] \quad (4.27)$$

So ergibt sich mit dem Flankendurchmesser D_2 von $12mm$ und einem Reibungskoeffizienten von $\mu G = 0,05$ [2] der Wirkungsgrad η (Gleichung 4.28).

$$\eta = \frac{P}{D_2 \cdot \pi \cdot \tan(\arctan(\frac{P}{D_2 \cdot \pi}) + \arctan(0,005))} \approx 0,6117 \quad (4.28)$$

Das benötigte Antriebsmoment lässt nun für die Auslegung des Motors bestimmen.

$$M_A = \frac{F \cdot P}{2000 \cdot \pi \cdot \eta} \quad [2] \quad (4.29)$$

Mit Gleichung 4.29 lässt sich das minimal nötige Drehmoment berechnen. Dazu wird für F der Wert aus Gleichung 4.21 verwendet.

$$M_A = \frac{28,893N \cdot 3mm}{2000\pi \cdot 0,6117} = 0,0225Nm \approx 2,25Ncm \quad (4.30)$$

Da α im Falle einer geschmierten Welle und einer Bronzemutter größer als β ist, ist die Trapezgewindespindel nicht Selbsthemmend [2]. Das hat zur Folge, dass der gewählte Motor neben dem berechneten Antriebsmoment auch ein ebenso großes Haltemoment vorweisen muss, damit bei perfekter Schmierung der Probenkörper im Stillstand an Ort und Stelle gehalten werden kann.

(d) Komponentenauswahl

Da der Durchmesser der Trapezgewindespindel nicht von größere Bedeutung ist wird hier eine mit $12mm$ Flankendurchmesser und einer Steigung von $3mm$ gewählt. Anbieten würde sich für die ausgesuchte Führung ein Nema 17 bipolar-Steppermotor. Dieser hat ein Haltemoment von $51Ncm$ und ein maximales Drehmoment von $35Ncm$ welches bei Steigerung der Drehzahl auf $1000min^{-1}$ auf circa $0,5Ncm$ sinkt (bei $24V$). Damit entspricht er prinzipiell den Anforderungen. Zu Überprüfen ist nun nur noch ob die Maximaldrehzahl ausreichend ist.

$$v_1 = n_{max} \cdot P \quad (4.31)$$

Damit kann der Motor eine Maximale Geschwindigkeit von $50 \frac{mm}{s}$ erreichen, was über der geforderten Geschwindigkeit von $20 \frac{mm}{s}$ liegt.

4.4.2.2 Materialaufnahme —Entfernen —

4.5 Steuerung

4.5.1 Prozessbeschreibung - strukturierte Darstellung

4.5.2 Schaltungsentwurf

4.5.3 Implementierung

5 Bedienungsanleitung

Dieses Kapitel soll dem späteren Bediener des Versuchstand die Handhabung vereinfachen und auf potenzielle Fehlerquellen sowie Gefahren hinweisen.

5.1 Quick Start Guide

Dieses Kapitel gibt einen schnellen Überblick darüber wie der Versuchstand zu bedienen ist.

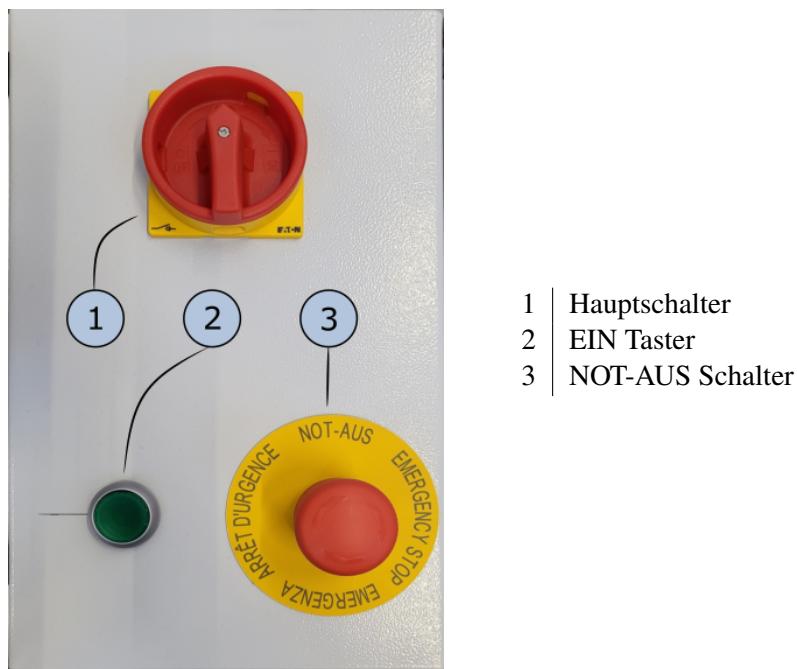


Abbildung 5.1: Oberseite Schaltschrank

Vor Inbetriebnahme sollte immer geprüft werden ob irgendwelche Teile der Mechanik durch Fremdeinwirkung blockiert sind. Ist dies nicht der Fall kann der Schuko-Stecker in die Steckdose gesteckt werden. In Abbildung 5.3 ist die Oberseite des Schaltschrankes zu sehen, mit welcher die Anlage eingeschaltet werden kann. Nun kann durch drehen des Hauptschalters (1) im Uhrzeigersinn die Anlage unter Spannung gesetzt werden. Mittels Taster (2) wird sowohl die Lastspannung für die Motoren als auch die Spannung für das Bedienfeld sowie den Temperaturregler der Heizung Eingeschaltet. Zum Ausschalten der Apperatur den Hauptschalter (1) gegen den Uhrzeigersinn drehen. Der NOT-AUS Schalter (3) schaltet den Versuchstand ebenfalls ab und verhindert zusätzlich ein wiedereinschalten.



Abbildung 5.2: Bedienfelder des Versuchstandes

Für die Steuerung der Motoren ist das in Abbildung 5.2a datgestellte Bedienfeld verantwortlich. Zu beginn sollte die Z-Achse in ihre Ausgangsposition gefahren werden. Dazu einfach durch drehen des Wahlrads (12) zum Menüpunkt (6) navigieren und durch drücken des Rades bestätigen. Nun sollte die Linearachse zum oberen Endanschlag fahren. Als nächste können alle gewünschten Betriebseinstellungen verändert werden. Das Verändern eines Parameters funktioniert immer gleich. Einfach mit dem Wahlrad (12 für die Z-Achse, 13 für die Spule) zum gewünschten Punkt navigieren und durch einen Druck bestätigen. Jetzt führt ein drehen des Wahlrades zu Veränderung des Parameters und der nächste druck auf das Rad bestätigt ihn. Die Linearachse besitzt nur einen einstellbaren Wert, die Geschwindigkeit (2). Auf der Seite der Spule lässt sich der Durchmesser (9) der verwendeten Spule sowie die Abzugsgeschwindigkeit (8) einstellen.

Da der Rohrofen ein geraume zeit zum Heizen benötigt sollte dieser als nächstes eingeschaltet werden. Der entspechnde Controller ist in Abbildung 5.2b dargestellt. Mittels der Tasten (3) und (4) kann auf Display (2) die Zieltemperatur eingestellt werden. Zum starten des Heizvorgangs Taste (5) drücken. Auf Display (1) wird die Aktuelle Temperatur dargestellt. Bevor dies Motoren gestartet und die Probe eingelegt wird sollte gewartet werden bis die Zieltemperatur erreicht ist. Der Temperraturregler bietet noch Zahlreiche weitere Einstellmöglichkeiten, welche aus dem Datenblatt des Herstellers (Anhang ??????) entnommen werden können.

Ist die Zieltemperatur erreicht kann wieder am Bedienfeld für die Motoren fortgefahren werden. Jetzt wird die Preform in den entsprechenden Halter eingespannt. Sollten der greif zu hoch stehen kann er unter dem Punkt (4) nach unten gefahren werden. Ist die Probe eingehängt sollte sie (Menüpunkt (4)) soweit nach unten gefahren werden das die Unterkante der Probe mit der Oberkante des Innenrohrs des Ofens überein stimmt. Im Menüpunkt (3) wird die Achse auf Null gestetzt. Von diesem Zeitpunkt wird

immer die Korrekte Eindringtiefe der Preform in den Rohrofen unter (1) angezeigt. Bevor mit Start (5) das automatische fahren der Achse aktiviert wird sollte die Probe in den Ofen eingetaucht werden (mit Funktion (4)). Wenn sich nun von selbst eine Faser bildet kann der Prozess mit Start (5) begonnen werden.

Die Spule ist erst Anzuschalten (11) wenn die Faser an ihr befestigt wurde. Sollte es an irgendeinem Punkt nötig sein die Spule manuell zu drehen ist die unter dem Menüpunkt (10) möglich.

Wenn sich die Motoren im Automatik-Modus befinden bewirkt das Drehen des entsprechenden Rades eine Anpassung der Drehgeschwindigkeit. Die Parameteränderung im laufenden Betrieb ist nur langsam zu empfehlen, da es sonst zu ungewünschten Schwingungen am system kommen kann.

5.2 Sicherheitshinweise

Im falle eines Notfalls, welcher die Abschaltung der Anlage erfordert ist sofort der NOT-AUS zu betätigen.Um weitere Gefährdungen auszuschließen dürfen im Fall einer Verletzung darf erst danach dem Betroffenen von der Anlage weg geholfen werden. Ist die unmittelbare Gefahr vorüber ist es wichtig den Versuchstand mit dem Hauptschalter vollständig zu deaktivieren.

Im allgemeinen Betrieb ist zu Beachten das nicht in die sich bewegenden Maschienenteile gegriffen werden darf. Ebenfalls ist zu beachten das nicht nur das Heizrohr sondern auch andere angrenzende Teile der Anlage heiß werden können. Um Verletzungen zu vermeiden sollte das Heizrohr nur angefasst werden wenn die Temperaturanzeige bestätigt das es kalt ist.// Kommt es im betrieb zu starker Rauchbildung aus dem Rohr oder der Elektrik ist die Anlage sofort Abzuschalten.

5.3 Fehlerbehebung

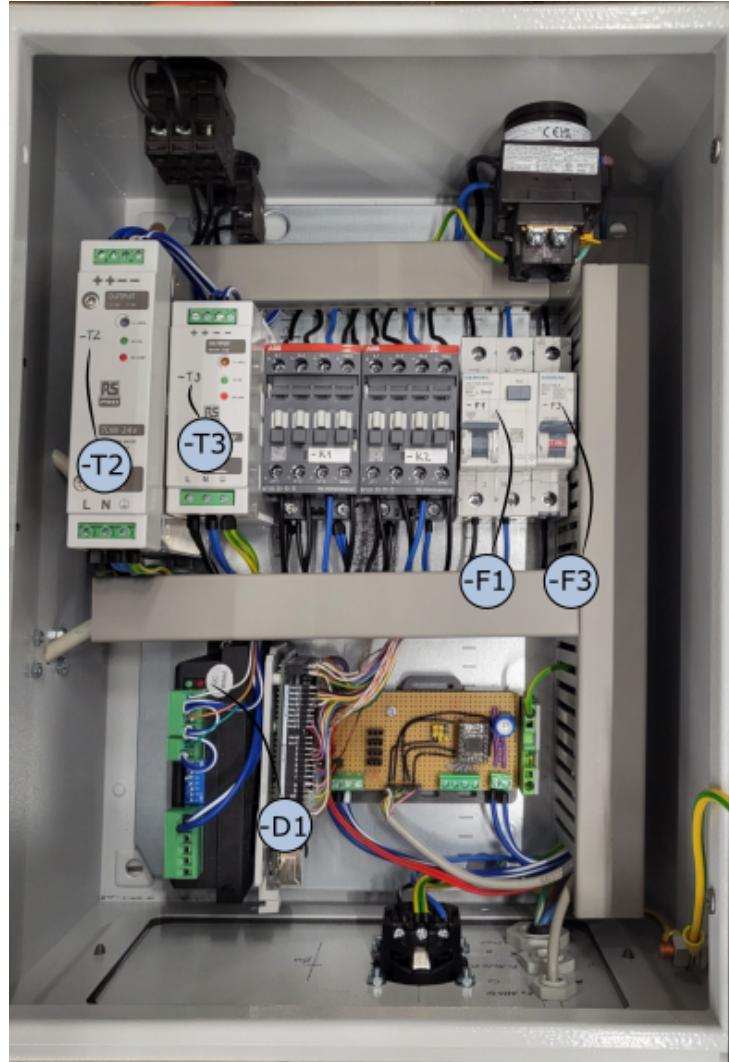


Abbildung 5.3: Schaltschrank

Sollte sich das Gerät nicht einschalten lassen kann das an mehreren Problem liegen. Zunächst sollte überprüft werden ob sich der NOT-AUS Schalter in der oberen Stellung befindet. Für den Fall das dies nicht der Fehlergrund ist muss der Versuchstand jetzt vom Stromnetz getrennt werden. Wie in Abbildung 5.3 kann nun der Schaltschrank geöffnet werden. Zu überprüfen ist nun ob sich die Sicherungen (-F1, -F3) beide in der oberen Stellung stehen. Für weitere Fehlersuche muss der Schrank unter Netzspannung stehen. Wird dies Problemlösung angewandt ist dies mit höchste Vorsicht zu tun. Es dürfen im Schrank nun keine Potentiell bestromten Teile, wie Schrauverbindungen und Kabel, mehr berührt werden. Nach dem Wiedereinschalten sollten die grünen LED's an den Netzteilen (-T2, -T3) leuchten, welche deren Funktionsfähigkeit bestätigen. Ebenfalls sollte die grüne LED an -D1 leuchten. Sind alle Lampen auf grün und die Funktionsfähigkeit ist trotzdem nicht gewährleistet liegt wahrscheinlich ein Defekt des Arduinos vor.

6 Erprobung des Versuchsstandes

7 Zusammenfassung und Ausblick

Literaturverzeichnis

- [1] DIN 7721-2. *Synchronriementriebe, metrische Teilung; Zahnlückenprofil für Synchronscheiben.* Juni 1989
- [2] DOLD MECHATRONIK GMBH. *Datenblatt-Trapezgewindespindeln-und-muttern*
- [3] DOLD MECHATRONIK GMBH ; KONFIGURATOR-EASY-MECHATRONICS-SYSTEM-1216A-NENNLÄENGE-150MM <https://www.dold-mechatronik.de/Linearachse> (Hrsg.). *DOLD Mechatronik | Linearachse Konfigurator / Easy-Mechatronics System.* 13.01.2024
- [4] GREINER, Andreas ; WENDORFF, Joachim H.: Elektrospinnen: eine faszinierende Methode zur Präparation ultradünner Fasern. In: *Angewandte Chemie* 119 (2007), Nr. 30, S. 5770–5805. – ISSN 0044–8249
- [5] KANIK, Mehmet ; ORGUC, Sirma ; VARNAVIDES, Georgios ; KIM, Jinwoo ; BENAVIDES, Thomas ; GONZALEZ, Dani ; AKINTILO, Timothy ; TASAN, C. C. ; CHANDRAKASAN, Anantha P. ; FINK, Yoel ; ANIKEEVA, Polina: Strain-programmable fiber-based artificial muscle. In: *Science (New York, N.Y.)* 365 (2019), Nr. 6449, S. 145–150
- [6] LEBER, Andreas ; LAPERROUSAZ, Stella ; QU, Yunpeng ; DONG, Chaoqun ; RICHARD, Inès ; SORIN, Fabien: Thermally Drawn Elastomer Nanocomposites for Soft Mechanical Sensors. In: *Advanced science (Weinheim, Baden-Wurttemberg, Germany)* 10 (2023), Nr. 13, S. e2207573
- [7] MUK24. *Präzisions 4 Backenfutter Ø 160 mm Drehbankfutter Vierbackenfutter Vierbacken Spannfutter | MUK24.com.* 13.01.2024
- [8] PAGE, Alexis G. ; BECHERT, Mathias ; GALLAIRE, François ; SORIN, Fabien: Unraveling radial dependency effects in fiber thermal drawing. In: *Applied Physics Letters* 115 (2019), Nr. 4. – ISSN 0003–6951
- [9] VDI 2230 BLATT 1. *Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen Zylindrische Einschraubenverbindungen.* November 2015
- [10] YU, Deng-Guang ; WANG, Menglong ; LI, Xiaoyan ; LIU, Xinkuan ; ZHU, Li-Min ; ANNIE BLIGH, Sim W.: Multifluid electrospinning for the generation of complex nanostructures. In: *Wiley Interdisciplinary Reviews: Nanomedicine and Nanobiotechnology* 12 (2020), Nr. 3, S. e1601. – ISSN 1939–0041
- [11] ZHAO, Jingzhou ; JAVADI, Abdolreza ; LIN, Ting-Chiang ; HWANG, Injoo ; YANG, Yingchao ; GUAN, Zeyi ; LI, Xiaochun: Scalable Manufacturing of Metal Nanoparticles by Thermal Fiber Drawing. In: *Journal of Micro and Nano-Manufacturing* 4 (2016), Nr. 4. – ISSN 2166–0468

Abbildungsverzeichnis

2.1	Spinndüsengeometrien [10]	5
2.2	Schematischer Aufbau thermisches Ziehen [11]	6
4.1	Testaufbau	10
4.2	EVAC	10
4.3	Probenkörper aus verschiedenen Materialkombinationen	11
4.4	Fasern aus verschiedenen Materialkombinationen	11
4.5	Temperaturfeld im Rohrofen [8]	13
4.6	Abzugsgeschwindigkeiten	14
4.7	Abzugsvarianten	16
4.8	Benötigtes Antriebsmoment bei verschiedenen Füllständen der Spule	18
4.9	Hablschnitt des Abzugs	19
4.10	Beispiel einer Linearachse [3]	20
4.11	Abtriebsrollen für die Materialförderung	21
4.12	Spannfuter 160mm für Drehbänke [7]	22
4.13	Klemmbacken zur Halterung von Probenkörpern	23
4.14	Lagerungstypen für Spindeltriebe [2]	24
5.1	Oberseite Schaltschrank	27
5.2	Bedienfelder des Versuchstandes	28
5.3	Schaltschrank	30

Tabellenverzeichnis

3.1	Anforderungen an den Versuchstand	9
4.1	Ermittelte Faserdicke	12
4.2	Kennwerte zur Berechnung des Antriebsmomentes	17