

**Masterarbeit**

# **Entwicklung von Endeffektoren mit integrierter Sensorik und Aktorik mittels additiver Fertigung**

ausgeführt am



Fachhochschul-Masterstudiengang  
Automatisierungstechnik - Wirtschaft

von

**Ing. Sven Suklitsch, BSc**

1710321014

betreut und begutachtet von

DI Dr. Christian Gasser

Graz, Jänner 2022



.....  
Unterschrift

## **EHRENWÖRTLICHE ERKLÄRUNG**

Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht benützt und die benutzten Quellen wörtlich zitiert sowie inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.



.....

Unterschrift

## **DANKSAGUNG**

Ich möchte mich herzlich bei meinem Betreuer DI Dr. Gasser für den fortlaufenden Support und das zur Verfügung stellen der Laborräumlichkeiten bedanken. Für die hilfreichen Anregungen und konstruktive Kritik möchte ich mich auch herzlich bedanken.

Ebenfalls möchte ich mich bei meinen Kommilitonen Ing. Andreas Rainer, BSc und Bastian Wiesinger, BSc bedanken. Diese haben mir erlaubt Bildmaterial in der Arbeit zu verwenden, welches in einem gemeinsamen Studienprojekt erstellt wurde.

Weiters möchte ich mich bei meinem Vater bedanken, der mir zur Durchführung der Tests ebenfalls Equipment zur Verfügung gestellt hat und dabei tatkräftig unterstützt hat. Bei meiner Mutter möchte ich mich herzlich für das Korrekturlesen meiner Masterarbeit bedanken.

Abschließend möchte ich mich bei meiner Lebensgefährtin bedanken, die mich während des Studiums fortlaufend unterstützt hat und immer ein offenes Ohr für meine Probleme hatte.

## **KURZFASSUNG**

Die Masterarbeit behandelt das Thema rund um Robotergreifer, die direkt mit additiver Fertigung hergestellt werden. Zu Beginn dieser Arbeit wird der Stand der Technik erarbeitet: Es wird geklärt welche Sensoren und Aktoren in konventionellen Greifersystemen eingesetzt werden. Im Anschluss an die theoretische Aufarbeitung herkömmlicher Endeffektoren werden 3D- Druck- Verfahren im Kunststoffbereich vorgestellt. Dieses Kapitel soll einen Überblick über die gängigsten Verfahren in diesem Bereich geben und dem Leser auf die nachfolgenden Kapitel vorbereiten. In diesem Kapitel wird neben den einzelnen Druckverfahren, auch auf die Multimaterialfähigkeiten der einzelnen Drucktechnologien eingegangen. Das Kapitel wird mit einer kleinen Übersicht über die Verfahren abgeschlossen und danach wird in das nächste Kapitel übergeleitet. Dieses hat zum Ziel die Anwendung des 3D- Drucks theoretisch zu beschreiben. Vordergründig wird hier die Verwendung von FFF- Druckern und SLA- Druckern beschrieben. Abschließend werden im Überkapitel „Stand der Technik“ geeignete Sensorik und Aktorik für additiv gefertigte Endeffektoren recherchiert und dargestellt. Diese Recherche stellt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, sondern soll auf den nachfolgenden praktischen Teil vorbereiten. Den Abschluss der theoretischen Kapitel bildet die Entwicklungsmethodik, welche idealerweise für den 3D- Druck verwendet werden sollte. Der darauffolgende praktische Teil beginnt mit Teillösungen, die zunächst in diesen Abschnitten entworfen werden. Alle Teillösungen werden dann real umgesetzt und die erhaltenen Daten sind in den Abschnitten entsprechend dargestellt. Hierbei gibt es sowohl Sensor- Lösungsansätze als auch Aktor- Lösungsansätze. Anhand dieser Teillösungen werden dann zwei Demo- Anwendungen konzipiert und umgesetzt. Die Umsetzungen sind in den vorgesehenen Abschnitten dargestellt. Abschließend werden die umgesetzten Teillösungen nochmal übersichtlich in einem Systembaukasten dargestellt, welcher in etwaigen nachfolgenden Arbeiten erweitert werden kann.

## **ABSTRACT**

This master's thesis deals with the topic of robotic grippers that are manufactured directly using additive manufacturing. At the beginning of the thesis, the state of the art is elaborated: It is clarified which sensors and actuators are used in conventional gripper systems. Following the theoretical review of conventional end effectors, 3D printing processes in the plastics sector are presented. This chapter is intended to provide an overview of the most common processes in this area and prepare the reader for the following chapters. In addition to the individual printing processes, this chapter also deals with the multi-material capabilities of the individual printing technologies. The chapter concludes with a brief overview of the processes. The aim of this chapter is to describe the theoretical application of 3D printing, primarily the use of FFF printers and SLA printers is described here. Finally, in the chapter "State of the art", suitable sensors and actuators for additively manufactured end effectors are researched and presented. This research does not claim to be complete but is intended to prepare for the following practical part. The last theoretical chapter describes the development methodology that should ideally be used for 3D printing. The following practical part starts with partial solutions, which are first designed in these sections. Some partial solutions are then implemented, and the data obtained is presented accordingly in the sections. There are sensor solutions as well as actuator solutions. Based on these partial solutions, two demo applications are then designed and implemented. The implementations are shown accordingly in the sections provided. Finally, the implemented partial solutions are again clearly presented in a system construction kit, which can be expanded in any subsequent work.

## INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung.....	7
1.1	Motivation.....	7
1.2	Zielsetzung.....	8
1.3	Aufbau der Arbeit.....	8
2	Stand der Technik.....	9
2.1	Konventionelle Endeffektoren.....	9
2.1.1	Anforderungen an flexible und moderne Greifanwendungen bei Industrierobotern.....	9
2.1.2	Eingesetzte Sensoren für Robotergreifer.....	10
2.1.2.1	Induktive Näherungsschalter.....	10
2.1.2.2	Reedkontakte.....	12
2.1.2.3	Reflexionslichtschranken.....	13
2.1.2.4	Einweglichtschranken.....	13
2.1.2.5	Reflexlichttaster.....	15
2.1.3	Eingesetzte Aktoren für die Handhabung.....	16
2.1.3.1	Antriebsarten.....	17
2.1.3.2	Parallelbackengreifer.....	20
2.1.3.3	Radialgreifer.....	21
2.1.3.4	Winkelgreifer.....	22
2.1.3.5	Innengreifer.....	22
2.1.3.6	Dreibackengreifer.....	23
2.1.3.7	Magnetgreifer.....	24
2.1.3.8	Vakuumgreifer.....	24
2.1.4	Übersichtsmatrix für Sensoren und Aktoren konventioneller Greifer.....	26
2.2	Übersicht über additive Fertigungsverfahren.....	27
2.2.1	Multimaterial 3D Druck.....	28
2.2.2	FLM Druckverfahren (Fused Layer Modeling).....	28
2.2.2.1	Multimaterialdruck mit dem FFF- Verfahren.....	30
2.2.3	SLA Druckverfahren.....	33
2.2.4	DLP Druckverfahren.....	34
2.2.5	SLS Druckverfahren.....	35
2.2.6	Multi Jet Fusion.....	37
2.2.7	PolyJet®- Verfahren (Material Jetting).....	38
2.2.8	Zusammenfassung der Druckverfahren.....	40
2.3	Anwendung des 3D Drucks.....	41
2.3.1	Modellerstellung.....	41
2.3.2	Weiterverarbeitung der Modelldaten.....	42
2.3.2.1	STL- Dateiformat.....	42
2.3.2.2	3MF- Dateiformat.....	43
2.3.2.3	AMF- Dateiformat.....	43
2.3.2.4	OBJ- Dateiformat.....	43

2.3.2.5	Slicing .....	44
2.3.3	Nachbearbeitung und Druck .....	46
2.4	Geeignete Sensoren für 3D- Druck Robotergreifer .....	47
2.4.1	Verschleißsensor Firma Iigus .....	47
2.4.2	DMS Sensoren aus dem 3D Drucker .....	48
2.4.3	Dünnschicht- Drucksensoren .....	50
2.5	Geeignete Aktoren für 3D- Druck Robotergreifer .....	52
2.5.1	Faltenbalg gedruckt .....	52
2.5.2	Pneumatische Standard- Aktoren .....	53
2.5.3	Soft- Robotics- Elemente .....	55
3	Entwicklungsmethodik für den 3d Druck .....	58
3.1	Entwurf .....	58
3.2	Auslegung .....	59
3.3	Umsetzung .....	61
4	Teillösungen .....	65
4.1	Teillösungen Aktorik .....	65
4.1.1	Passive Federelemente .....	70
4.1.1.1	Konzipierung eines passiven Spannelementes anhand eines Beispiels .....	70
4.1.1.2	Umsetzung mit dem 3D Drucker .....	74
4.1.1.3	Fazit passive Elemente .....	76
4.1.2	Gedruckter Faltenbalg- Aktor .....	76
4.1.2.1	Testaufbau Faltenbalg .....	80
4.1.2.2	Auswertung der getesteten Faltenbälge .....	83
4.1.2.3	Fazit Teillösung Faltenbalg- Aktor .....	86
4.1.3	Soft- Robotic- Innengreifer .....	87
4.1.3.1	Geometrieerzeugung .....	87
4.1.3.2	Materialauswahl Soft- Robotic Greifer .....	88
4.1.3.3	Simulation Soft- Robotic Innengreifer TPU .....	89
4.1.3.4	Erster Versuch Soft- Robotic Innengreifer .....	90
4.1.3.5	Zweiter Versuch Soft- Robotic- Innengreifer .....	91
4.1.3.6	Geometrieoptimierung .....	92
4.1.3.7	Prüfaufbau für die einzelnen Soft- Innengreifer Prüflinge .....	93
4.1.3.8	Prüfergebnisse für die einzelnen Soft- Innengreifer Prüflinge .....	94
4.1.3.9	Fazit der Teillösung Soft- Robotic- Innengreifer .....	95
4.2	Teillösungen Sensorik .....	95
4.2.1	Elektrisch leitfähiges Filament .....	95
4.2.1.1	Messung ungedrucktes Filament .....	97
4.2.1.2	Messung gedrucktes Filament entlang der Schichten .....	99
4.2.1.3	Messung gedrucktes Filament entgegen den Schichten (90°) .....	99
4.2.1.4	Messung schräg gedrucktes Filament (45°) .....	99
4.2.1.5	Beispiel für den Einsatz am 3D- Druck Robotergreifer .....	101
4.2.2	Integrierter Dünnschicht- Drucksensor .....	103

4.2.2.1	Realisierung der Sensorschaltung mit einem Mikrocontroller .....	106
5	Umsetzung der Demoanwendungen anhand der Teillösungen .....	109
5.1	Zu handhabende Steckerhülse.....	109
5.2	Zu handhabende Kleinladungsträger.....	110
5.2.1	Umsetzung einer Lösung aus dem 3D Drucker für den KLT- Greifer.....	111
5.3	Umsetzung einer Lösung aus dem 3D Drucker für den Hülsengreifer .....	119
5.3.1	Umsetzung einer Lösung aus dem 3D Drucker für den Hülsengreifer .....	120
6	Systembaukasten für Endeffektoren aus dem 3D- Drucker .....	122
7	Fazit und Ausblick.....	124
	Literaturverzeichnis.....	127
	Abkürzungsverzeichnis .....	134
	Abbildungsverzeichnis .....	135
	Tabellenverzeichnis .....	140
	Anhang 1: Prüfstand Code .....	141
	Anhang 2: Datenblatt ProtoPasta (Electric. Conductive) .....	143

# 1 EINLEITUNG

Diese Masterarbeit wird zusammen mit der FH Campus 02 und dessen MER- Lab (Mechanical Engineering and Robotics) durchgeführt. Der Betreuer dieser Arbeit führt dieses Labor und unterstützt mit seiner Expertise in diesen Bereichen die Masterarbeit. Der Studierende und Verfasser der Masterarbeit ist hauptberuflich als Konstrukteur im Sondermaschinenbau tätig und lässt seine Erfahrungen aus diesem Bereich einfließen.

## 1.1 Motivation

Die Arbeit zielt darauf ab, einen Weg zu finden Robotergreifer leichter (bezüglich des Gewichts) und kompakter zu gestalten als ein in der Industrie eingesetztes Äquivalent. In der Industrie eingesetzte Endeffektoren sind oft sehr konservativ designt und werden daher überwiegend konventionell gefertigt. Damit ist der Spielraum in der Entwicklungs- und Konstruktionsphase schon von Beginn an begrenzt. Solche Teile müssen immer so gestaltet sein, dass diese auf einer konventionellen Fertigungsmaschine herstellbar sind. Im Sondermaschinenbau zählen zu diesen Maschinen folgende Klassiker: Fräsmaschine, Drehmaschine, Schleifmaschine und Drahterodiermaschine. Diese Maschinen sind im Großen und Ganzen die vorhandenen Tools, um die designten Teile herzustellen. Dieser Sachverhalt führt dazu, dass oft Stahl oder Aluminium als Trägermaterial für die Endeffektoren verwendet wird. Das macht diese in einigen Fällen unnötig schwer – Roboter bewegen daher sehr oft unnötige Masse. In einem Industriebetrieb bedeutet das erhöhten Energieverbrauch, der eingespart werden könnte. Daher wäre die logische Konsequenz daraus die Herstellungsmethode der heutigen Greifertechnik zu überdenken. Besonders das Trägermaterial, wo die einzelnen Aktoren für den Prozess des Endeffektors angebracht sind, kann man durch additive Fertigung um einiges effizienter und materialsparender gestalten. Ein möglicher Lösungsansatz hierfür bietet die Welt der Insekten: Bienen bauen ihre Stöcke durch die Wabenform ihre Konstrukte sehr stabil und widerstandsfähig. Gleichzeitig wird der Zwischenraum, welcher die Wabenform bietet, sehr effizient genutzt. Dieses Vorbild kann in der Bauweise von Robotergreifern auch einen großen Vorteil bieten – hohe Steifigkeit bei niedrigem Gewicht. Um solche Gewichtsoptimierungen realisieren zu können gibt es bereits zahlreiche Werkzeuge: Beispielsweise können sogenannte Slicer- Programme der 3D Drucker- Systeme komplett ausgefüllte Volumina eines Modelles mit einer solchen Wabenform ersetzen. Oder man setzt schon präventiv in der Modellerstellung auf Simulationswerkzeuge wie die Topologie- Optimierung. Mit diesem Tool bekommt man schon sehr früh im Entwicklungsprozess sehr gute Informationen bezüglich möglicher Materialeinsparungen.

Weiteres Potenzial birgt die Integration von Sensoren und Aktoren via additive Fertigung. Das heißt durch die entsprechende Gestaltung der Greifwerkzeuge die Sensoren so unterbringen, dass diese sehr wenig Platz brauchen und z.B. nahezu unsichtbar im Greiferfinger untergebracht sind. Ein zweiter Weg, um die additive Fertigung für Sensoren zu nutzen ist, dass man diese komplett durch den 3D Druck herstellt. Das gleiche gilt auch für Aktoren – auch diese können durch additive Fertigung hergestellt werden. Dabei sind im Unterschied zur konventionellen Fertigung der Bauteile fast keine Grenzen gesetzt. Man kann fast jede denkbare Form herstellen. Auch ist es möglich ganze Baugruppen herzustellen, der allerdings nach der Herstellung nicht mehr zerstörungsfrei zerlegbar sind.

## 1.2 Zielsetzung

Die Zielsetzung der Arbeit ist es Robotergreifer aus so wenigen Teilen wie möglich herzustellen. Das optimale Ergebnis wäre, den gesamten funktionalen Robotergreifer in einem additiven Fertigungsschritt herstellen zu können. Ob und wie das möglich ist wird noch im Laufe dieser Arbeit ausführlich beschrieben und erarbeitet. Zumindest hat die Arbeit das Ziel umsetzbare Lösungen für den 3D Druck zu präsentieren und darzustellen, welche verschiedene Greifanwendungen für verschiedene Bedürfnisse darstellen. Zuerst werden einige Teillösungen erarbeitet, welche danach je nach Bedarf kombiniert werden können. Dabei soll ein Systembaukasten entstehen, woran man sich für die Umsetzung zukünftiger gleichartiger Projekte orientieren kann.

## 1.3 Aufbau der Arbeit

Die Arbeit ist so aufgebaut, dass man mit der Erörterung des Stands der Technik beginnt. Zunächst werden konventionelle Endeffektoren, insbesondere für Greifanwendungen, näher beleuchtet. Es wird erklärt wo solche Greifer zumeist eingesetzt werden und wie diese auch aussehen. Auch wird analysiert welche Sensoren in solchen Greifanwendungen häufig verbaut sind und welche Aktoren und Greifmechanismen dafür eingesetzt sind. Danach wird ein Einblick in die verschiedenen verfügbaren Druckverfahren gewährt, um dem Leser einen generellen Überblick zu verschaffen, welche Druckverfahren für die verschiedenen Lösungen eingesetzt werden. Daraufhin geht es, in einem Abschnitt darum wie der Workflow für so ein 3D Druck Teil aussieht und wird umrisshaft beschrieben. Da Multimaterial- Druck für die Arbeit ein maßgebliches Element darstellt, wird darauf ebenfalls im Laufe der Masterarbeit eingegangen. Hierbei werden verschiedene verfügbare Multi- Druckverfahren recherchiert und dargestellt. In den zwei nachfolgenden Kapiteln werden verschiedene Sensoren und Aktoren, welche für additiv hergestellte Roboter- Effektoren geeignet sind, erklärt. Dort gibt es Aktoren und Sensoren welche komplett im 3D Drucker entstehen oder auch „externe“ Elemente sind, die aber besonders gut integrierbar sind. Das letzte theoretische Kapitel beschreibt die Entwicklungsmethodik selbst, mit welcher der additive Fertigungsprozess optimal genutzt wird. Danach werden einige Teillösungen ausgearbeitet und entsprechend dargestellt. Anhand dieser Teillösungen wird eine Beispiellösung mit definierten Anforderungen umgesetzt. Die Ergebnisse werden mithilfe eines Baukastens dargestellt, aus welchem man sich bedienen kann, um eine Lösung für eine bestimmte Greifanwendung zu finden. Das Fazit und der Ausblick runden die Arbeit zum Schluss ab.

## **2 STAND DER TECHNIK**

In diesem Kapitel wird auf den Stand der Technik eingegangen, welcher die Grundlage für diese Arbeit bildet. Aus diesem Grund werden zuerst Komponenten konventioneller Greifer beleuchtet, wie diese eingesetzt werden und welche Komponenten für die Aktorik und Sensorik eingesetzt werden. Hierzu sollen etwaige Nachteile erkannt werden und daraus sind die Schlüsse für Verbesserungen in den nachfolgenden Kapiteln zu ziehen. Insbesondere werden, wie der Titel der Arbeit verrät, vorrangig Lösungen durch additive Fertigung erarbeitet und umgesetzt. Im Anschluss wird eine Übersicht über verschiedene additive Fertigungsverfahren gewährt, damit der Leser ein grundlegendes Verständnis über diese 3D-Druckverfahren bekommt.

### **2.1 Konventionelle Endeffektoren**

In diesem Kapitel wird der Stand der Technik der Robotergreifer, welche in der Industrie eingesetzt werden, nähergebracht. Im Speziellen wird auf die Anforderungen an heutige Greifanwendungen eingegangen. Dafür werden typischerweise eingesetzte Sensoren erläutert und auch die benötigten gängigen Aktoren hierfür beschreiben.

#### **2.1.1 Anforderungen an flexible und moderne Greifanwendungen bei Industrierobotern**

Die Anforderungen an die Endeffektoren der Robotergreifer steigt in der Industrie in den letzten Jahren stetig – die Herausforderung sind etwa höhere Dynamiken durch immer kürzere Taktzeitanforderungen. Immer kürzere Taktzeiten und höhere Durchsatzzahlen werden seit jeher in der produzierenden Industrie angestrebt.

Die wahre Herausforderung hängt mit dem Übergang in die Industrie 4.0 zusammen. Dadurch, dass sich Produkte vielfältiger und individueller entwickeln, müssen auch die Anlagen hierfür die gleiche Individualität aufweisen. Die Anforderungen an die Individualisierung gehen hin bis zur Herstellung von massentauglichen Produkten in Losgröße 1.<sup>1</sup>

Das heißt im Klartext eigentlich, dass ein und derselbe Robotergreifer verschiedenartige Bauteile greifen können muss. Und genau hier liegt die Schwierigkeit, da die benötigten Aktoren und Sensoren an einem Industrieroboter zahlenmäßig vervielfältigen. Denn, wenn die Abmaße zu sehr variieren, muss logischerweise ein zweiter parallel funktionierender Greifmechanismus angebracht werden. Dies führt dazu, dass die Masse des Robotergreifers oft um ein Vielfaches größer ist als das Bauteil, das manipuliert wird.

---

<sup>1</sup> Vgl. KUKA AG, Online-Quelle [24.August.2021].

## 2.1.2 Eingesetzte Sensoren für Robotergreifer

In der Automatisierungstechnik, speziell im Bereich der Automotive- Industrie, werden bevorzugt Sensoren eingesetzt, die sehr robust gegenüber Einflüssen von außen sind.

Bei automatisierten Anlagen ist es heutzutage unerlässlich Sensoren für die Erfassung der verschiedenen Zustände zu verwenden. Die Sensoren sollten immer der Greifanwendung angemessen ausgewählt werden. Es gibt eine sehr große Sensoren- Vielfalt, die am Markt erhältlich ist – messbar ist nahezu alles. Mit welchen Sensoren der Greifer ausgestattet ist, ist daher auch eine Kostenfrage. In vielen Fällen reicht es oft simple Näherungsschalter zu verbauen. Dies sind binär schaltende Sensoren, die genau 2 Schaltzustände in einer Steuerung abbilden können.<sup>2</sup> Diese beiden Positionen sind meistens die Grundstellung und Arbeitsstellung des Aktors.

### 2.1.2.1 Induktive Näherungsschalter

Diese Sensoren werden auch weitläufig Initiatoren genannt und haben eine sehr große Verbreitung in der Automatisierungstechnik. Zu den wichtigsten Eigenschaften dieser Sensorelemente zählen, dass diese berührungslos arbeiten und keinerlei Rückwirkungen aufweisen. Durch die geschlossene Bauform sind diese überaus resistent entgegen Umwelteinflüssen und sind bekannt für die überdurchschnittliche Zuverlässigkeit. Hohe Schaltfrequenzen bei hoher Lebensdauer werden durch die kontaktlose Funktion ermöglicht. Der grundsätzliche Aufbau des Sensors besteht zum einen aus der passiven Spule und dem Ferritkern als aktives Element.<sup>3</sup>

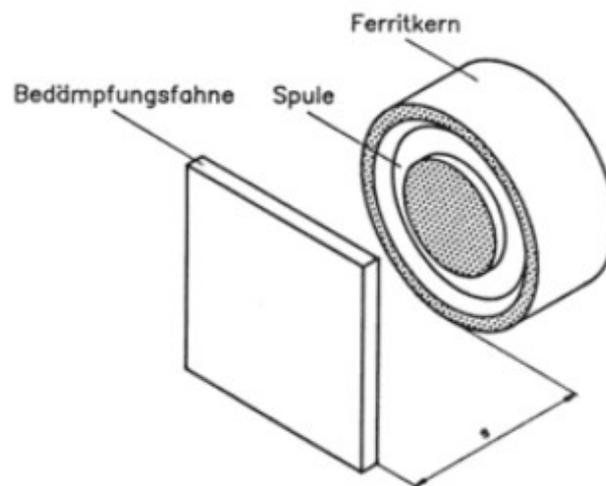


Abb. 1: Prinzip des induktiven Näherungsschalters, Quelle: Schnell (1993), S. 5.

Die Spule erzeugt in Verbund mit einem Schwingkreis ein hochfrequentes Magnetfeld. Nähert sich ein Metall dem Magnetfeld des Sensors, findet eine elektromagnetische Induktion statt und es fließt ein Wirbelstrom. Je näher das Objekt an den Sensor kommt, desto größer wird dieser Induktionsstrom

---

<sup>2</sup> Vgl. Hesse (2011), S. 195.

<sup>3</sup> Vgl. Schnell (1993), S. 5.

(Wirbelstrom). Dadurch wird die Schwingung des Schwingkreises immer kleiner, bis diese einbricht. Der Sensor misst die Amplitude ständig und detektiert dadurch ein sich annäherndes metallisches Objekt.<sup>4</sup>

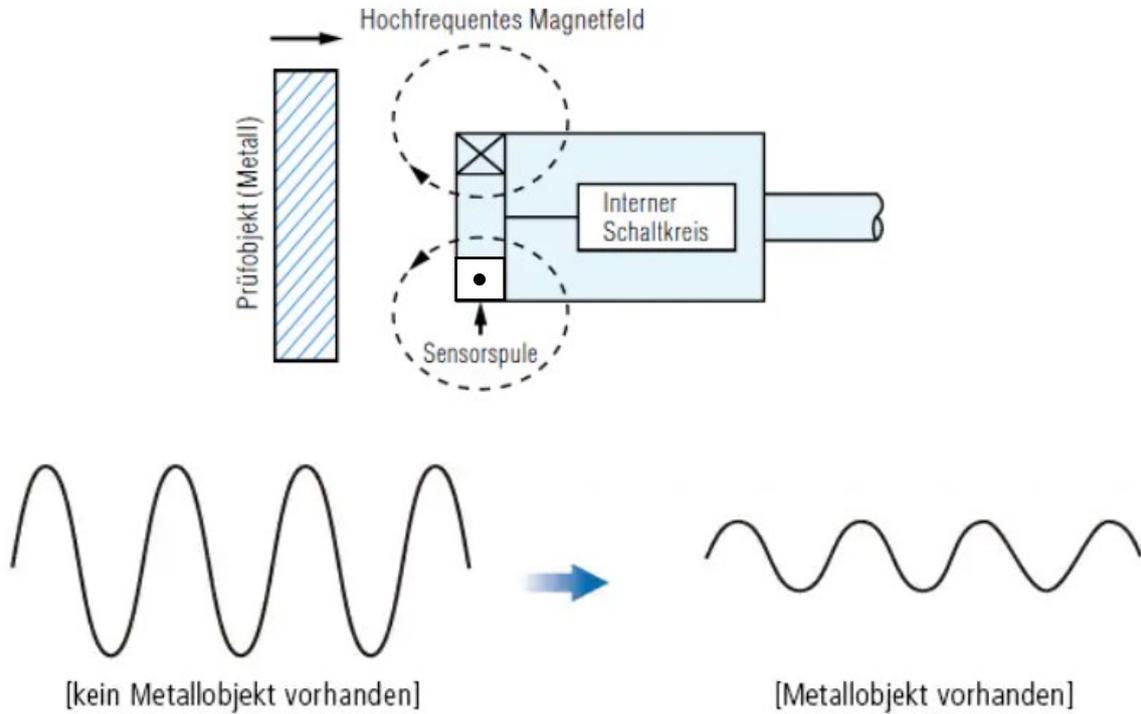


Abb. 2: Funktion eines induktiven Näherungsschalters, Quelle: KEYENCE International, Online-Quelle [25.August.2021].

Diese Schaltelemente werden zumeist eingesetzt, um die die Aktor- Stellung direkt abzufragen. Das heißt zum Beispiel bei einem Parallelbackengreifer wird die Backe auf Anwesenheit geprüft. Wie das durchgeführt wird, ist bei der nachfolgenden Abb. 3 erkennbar. Wenn das gegriffene Bauteil metallisch ist, kann dieses auch direkt abgefragt werden.

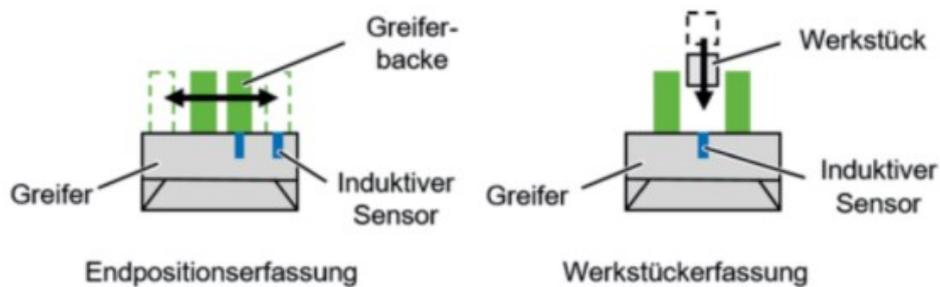


Abb. 3: Greifer mit induktiven Sensoren, Quelle: Müller/Franke/Henrich/Kuhlenkötter/Raatz/Verl (2019), S. 82.

<sup>4</sup> Vgl. KEYENCE International, Online-Quelle [25.August.2021].

### 2.1.2.2 Reedkontakte

Reedkontakte sind ebenfalls, wie induktive Sensoren, Näherungsschalter. Im Gegensatz zu den induktiven Näherungsschalter sind diese magnetisch betätigt. Grundsätzlich bestehen diese aus zwei Kontaktzungen, welche sich in einem Glasrohr befinden, das mit Schutzgas gefüllt ist. Wenn ein Magnetfeld stark genug auf den Sensor einwirkt, wird der Kontakt zwischen den beiden schwebenden Zungen geschlossen und der Kontakt schaltet den Strom durch. Bei Öffner- Versionen der Reedkontakte, werden die Kontaktzungen mit kleinen Magneten vorgespannt. Ein wesentlich stärkeres Magnetfeld, zum Beispiel der Magnetring an der Kolbenstange eines Pneumatikzylinders, löst diesen Kontakt wieder. Im Allgemeinen haben Reedschalter eine hohe Lebensdauer und verfügen über eine geringe Schaltzeit, welche sich ungefähr auf 0,2 ms beläuft, jedoch muss man Kontaktprellen bei der Implementierung berücksichtigen. Reedkontakte gelten als wartungsfrei und robust, aber man muss beachten werden, dass sich keine anderen starken Magnetfelder in der Nähe befinden und den Sensor stören.<sup>5</sup>

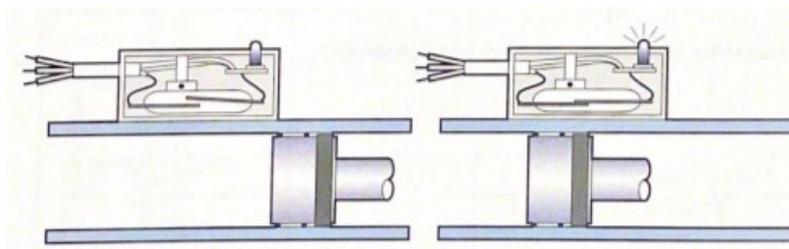


Abb. 4: Prinzip Reedkontakt, Quelle: Ebel/Idler/Prede/Scholz (2014), S. 132.

Auf der obigen Abbildung erkennt man einen Kolben mit einem magnetischen Ring, der ein Magnetfeld aufbaut. Wenn sich dieses magnetische Feld im Schaltabstand zum Kontakt befindet, wird dieser geschlossen.

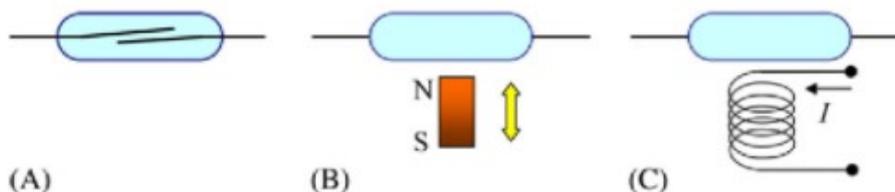


Abb. 5: Reedkontakt- Auslösung, Quelle: Regtien (2012), S. 137.

(A) zeigt den nicht betätigten Reedkontakt. Bei (B) wird der Kontakt durch ein Permanentmagnetfeld geschaltet und bei (C) wird der Kontakt durch eine Spule geschaltet.

Solche Reedkontakte sind bei verschiedenen Greiferaktoren, wie Parallelbackengreifer oder Winkelgreifer, zu finden. Reedkontakte sind sehr geeignet, um die Aktor- Stellung abzufragen, sind aber kaum dazu geeignet, um das Werkstück direkt abzufragen.

<sup>5</sup> Vgl. Ebel/Idler/Prede/Scholz (2014), S. 132.

Die nachfolgenden Unterkapitel beschreiben drei gängige Varianten der optischen Näherungsschalter.

Optische Näherungsschalter arbeiten berührungslos, rückwirkungsfrei und materialunabhängig. Grundsätzlich sind diese Sensoren verschleißfrei und erzeugen prellfreie Ausgangssignale. Die Lebensdauer ist deutlich länger als zum Beispiel bei mechanischen Endschaltern. Zu beachten ist, dass eine Hilfsenergie nötig ist, um die Sensoren betreiben zu können und Umwelteinflüsse wie Staub und Fremdlicht zu Fehlfunktionen führen können.<sup>6</sup>

### 2.1.2.3 Reflexionslichtschranken

Bei den Reflexionslichtschranken wird das Licht vom Sender (S) ausgestrahlt und in Richtung des Reflektors gestrahlt. Wenn der Lichtstrahl nicht von einem Objekt unterbrochen wird, dann wirft der Reflektor (R) das Licht zum Empfänger (E) zurück. Bei Unterbrechung des Lichtstrahles schaltet der Sensor und der Ausgang (Q) wird aktiv. Für die Erfassung müssen nichtdurchsichtige Objekte verwendet werden. Diese Sensoren sind in der Anwendung sehr robust, wenn man diese mit Reflexlichttastern vergleicht. Verschmutzungen oder andere Umwelteinflüsse sind längst nicht so störend für die Anwendung, als diese es bei Lichttasterlösungen sind.<sup>7</sup>

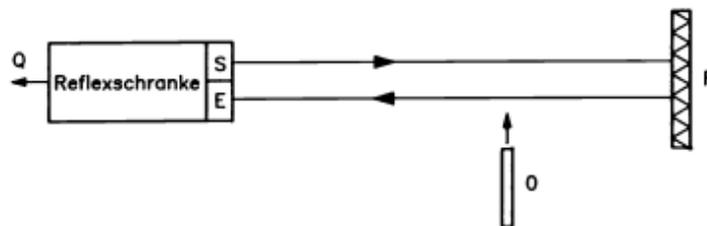


Abb. 6: Prinzip des Reflexionslichtschranken, Quelle: Schnell (1993), S. 76.

Sollte man Objekte mit glänzender Oberfläche detektieren wollen, sollte man Sensoren mit einem integrierten Polarisationsfilter verwenden. Durch diesen ist man annähernd unabhängig von der Oberfläche, Farbe und dem Material des zu erkennenden Objektes. In der Greifertechnik werden diese Sensoren so verwendet, dass man das Objekt, das man greifen will, direkt detektiert. Das heißt durch den Griff des Objektes wird der Lichtstrahl unterbrochen.

### 2.1.2.4 Einweglichtschranken

Im Prinzip sind Einweglichtschranken so aufgebaut, sodass es im Gegensatz zu Reflexionslichtschranken zu zwei separaten Bauteilen kommt. Das heißt der Sender ist an der einen Seite aufgebaut und der Empfänger auf der anderen Seite. Der Sender ist so eingestellt, dass dieser genau in den Empfänger strahlt.<sup>8</sup>

Diese Einweglichtschranken nennen sich in der Fachliteratur auch Durchlichtschranke. Mit Lichtschranken dieser Art lassen sich sensorische Detektionen auf größere Entfernungen zuverlässig realisieren. Generell

---

<sup>6</sup> Vgl. Hesse/Schnell (2014), S. 74.

<sup>7</sup> Vgl. Schnell (1993), S. 76f.

<sup>8</sup> Vgl. Ebel/Idler/Prede/Scholz (2014), S. 135.

sind alle nicht durchsichtigen Objekte mit diesem Mittel detektierbar. Einen Vorteil hat man bei der Durchlichttechnik aufgrund der räumlichen Trennung von Sender und Empfänger: Das vom Objekt reflektierte Licht kann aufgrund der Anordnung den Empfänger nicht auslösen. Diese Technik gilt auch unter den optoelektrischen Abfragen als die Robusteste. Jedoch muss man beachten, dass auch der Installationsaufwand hierbei am größer als bei Lichttastern oder Reflexionslichtschranken ist. Beide Einheiten (Sender, Empfänger) müssen separat mit Energie versorgt werden und auch die Ausrichtung der beiden Einheiten zueinander erfordert eine gewisse Präzision.<sup>9</sup>

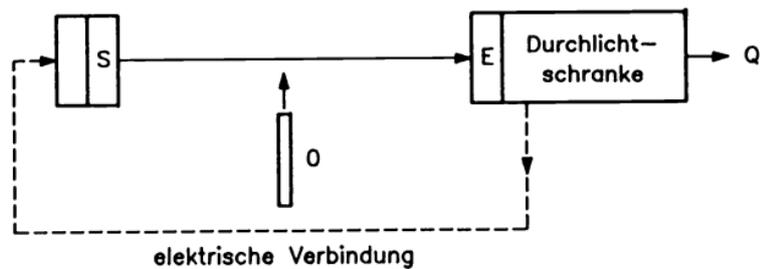


Abb. 7: Schematischer Aufbau der Durchlichtschranke, Quelle: Schnell (1993), S. 77.

Sehr vorteilhaft in der Handhabungstechnik sind einige besondere Ausführungen dieser Einweglichtschranken (Durchlichtschranke). Zu diesen Ausführungen zählen Rahmenlichtschranken, Gabellichtschranken und auch Winkellichtschranken. Im Gehäuse dieser Sensorelemente ist bereits die gesamte elektronische Einheit untergebracht. Der Sensor muss nur noch mit einer einzigen Kabelverbindung angeschlossen werden.<sup>10</sup>

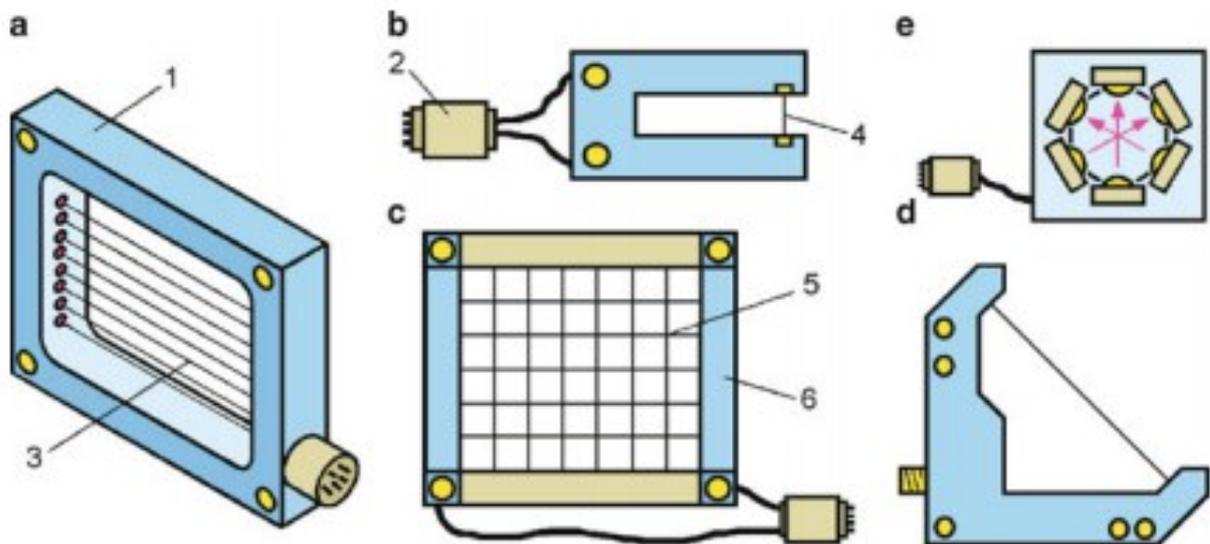


Abb. 8: Bauformen von kompakten Einweglichtschranken, Quelle: Hesse/Schnell (2014), S. 82.

<sup>9</sup> Vgl. Schnell (1993), S. 77.

<sup>10</sup> Vgl. Hesse/Schnell (2014), S. 83f.

Erklärung zur Abb. 8:

(a) zeigt eine Rahmenlichtschranke, (b) eine Gabellichtschranke, (c) einen Rahmenlichtschranken mit kreuzenden Lichtstrahlen, (d) eine Winkellichtschranke und (e) eine Ringlichtschranke

Diese Elemente können durch ihre kompakte Bauform sehr gut an einer Handhabungseinrichtung, wie einem Robotergriffeifer, angebracht werden und als Bauteilabfrage verwendet werden.

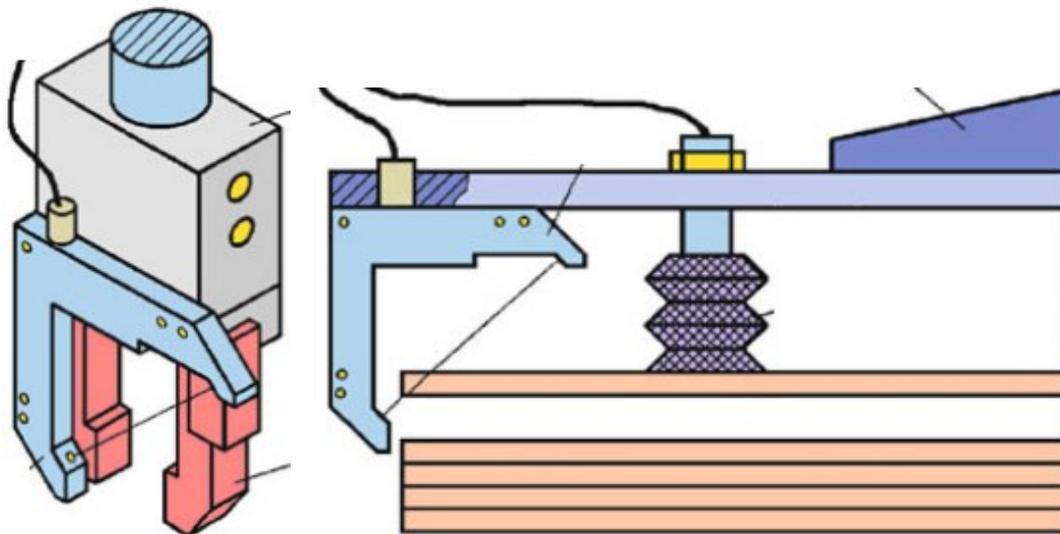


Abb. 9: Anbringungsbeispiele für Winkellichtschranken, Quelle: Hesse/Schnell (2014), S. 83.(leicht modifiziert)

### 2.1.2.5 Reflexlichttaster

Ein sehr beliebtes Mittel, um ein gegriffenes Bauteil abzufragen, ist der Reflexlichttaster.

Dabei wird Licht vom Sender S ausgesendet und von einem optisch rauhen Objekt O diffus reflektiert. Das Licht wird dabei an den Empfänger E zurückgeworfen.<sup>11</sup>

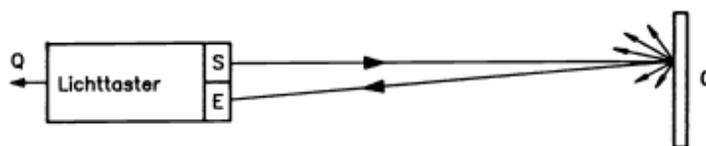


Abb. 10: Prinzip Reflexlichttaster, Quelle: Schnell (1993), S. 76.

Bei Lichttaster- Lösungen sind der Sender und Empfänger nebeneinander angeordnet. Das Licht wird vom Körper zum Empfänger reflektiert. Das Funktionsprinzip setzt voraus, dass das Bauteil, welches abgefragt wird, ein erhöhtes Reflexionspotenzial aufweist. Beispielsweise weisen metallische Werkstoffe oder Bauteile mit hellen Farben diese Eigenschaften zumeist auf.<sup>12</sup>

Reflexionslichttaster mit Hintergrundausblendung evaluieren nicht nur die reflektierende Lichtenergie, sondern können auch die Entfernung zu einem Objekt detektieren. Der Sensor arbeitet hierbei im

<sup>11</sup> Vgl. Schnell (1993), S. 76.

<sup>12</sup> Vgl. Ebel/Idler/Prede/Scholz (2014), S. 135.

Triangulations- Prinzip. Die Objekte sollten die Mindestgröße des Lichtstrahles aufweisen und sich innerhalb des einstellbaren Tastbereichs befinden. Der Sensor mit Hintergrundausblendung ist weitestgehend von Farbe und Oberfläche des Tastobjektes unabhängig. Diese Anwendung ist für exakte Positionierungen konzipiert. Durch den gebündelten Strahl ist möglich sehr kleine Elemente, wie die Beine eines elektrischen Widerstandes zu erkennen.<sup>13</sup>

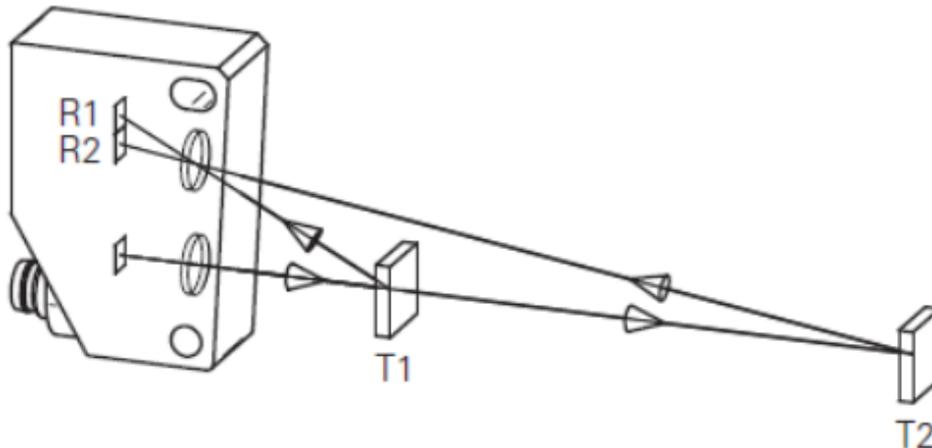


Abb. 11: Reflexionslichtschranke mit HGA- Ausblendung, Quelle: Baumer Holding AG, Online-Quelle [25.August.2021].

(T1) und (T2) stellen die Tastobjekte mit zwei verschiedenen Entfernungen zum Sender dar. Je nach Entfernung wird der Matrixempfänger (R1) und (R2) an der entsprechenden Stelle bestrahlt. Dadurch ist die Entfernung zum Tastobjekt innerhalb gewisser Grenzen detektierbar.

### 2.1.3 Eingesetzte Aktoren für die Handhabung

In diesem Kapitel wird beschrieben welche Aktoren aktuell nach heutigem Stand der Technik eingesetzt werden. Es wird hauptsächlich das Augenmerk auf sehr gängige Aktoren gelegt und Beispiele von namhaften Herstellern aufgezeigt. Es wird auf pneumatische Greifmodule, elektrische Greifmodule und pneumatische Aktoren eingegangen. Zusätzlich werden noch Sauggreifer und spezielle Lochgreifer beschrieben. Generell muss man die heutzutage eingesetzten Aktoren nach Bauform und Art des Antriebes einteilen.

Pneumatische Antriebe für Greifaufgaben in Verbindung mit Industrierobotern ist die beliebteste Wahl in der Industrie. Der Aktor ist zumeist ein Pneumatikzylinder, der im Gehäuse integriert ist. Es gibt auch einige Lösungen, wo dieser extern am Gehäuse aufgebracht ist. Daher ergeben sich die Greifkräfte aus Druck multipliziert mit der Fläche und Berücksichtigung der nachfolgenden Mechanik. Auch diese Pneumatikzylinder sind Ende zu Ende Aktoren und können ohne zusätzlichen Aufwand nicht in einer beliebigen Stellung positioniert werden. Zumeist ist es so vorgesehen, dass ein Anschlag das Bauteil selbst bildet und der andere Anschlag intern im Zylinder oder der Greifmechanik vorgesehen ist.<sup>14</sup>

---

<sup>13</sup> Vgl. Baumer Holding AG, Online-Quelle [25.August.2021].

<sup>14</sup> Vgl. Monkman/Hesse/Steinmann/Schunk (2007)

Die Verteilung der eingesetzten Aktoren nach Bauform setzt sich folgendermaßen zusammen:<sup>15</sup>

80% der eingesetzten Greifer sind mechanisch betrieben. Davon sind 45% Parallelgreifer, 20% Winkelgreifer und 15% sind Drei- oder Vierfingergreifer. Vom Gesamten entfällt ungefähr 15% Marktanteil auf Sauggreifervarianten. Die restlichen 5% fallen auf diverse Sonderlösungen.

### 2.1.3.1 Antriebsarten

Ein Greifer ist ein mechanisches System und kann von verschiedenen Medien angetrieben werden. Dafür bieten sich einige Möglichkeiten. Diese sind laut Stefan Hesse in der nachfolgenden Aufzählung aufgelistet:<sup>16</sup>

- Schwerkraft- mechanisch → Zangengreifer- Prinzip
- Über Pneumatik → am öftesten eingesetzt
- Elektro- mechanische Antriebe → Motor- Spindelsystem
- Piezoelektrisch → hochdynamische Bewegungen möglich

Die nachfolgende Abbildung zeigt anhand einer Tabelle, welche Systeme für welchen Einsatzbereich am ehesten geeignet wäre. Ein voller Punkt gibt an, dass dieser Bereich besser geeignet ist.

Antriebssystem					
	mechanisch	pneumatisch	hydraulisch	magnetisch	elektromotor.
Bewertungskriterium					
Hohe Greifkraft	●	○	●	●	○
Regelbarkeit	○	○	●	●	●
Energieübertragung	●	●	○	●	●
Schmutzunempfindlichkeit	●	●	●	○	●
Wartung	●	●	●	○	●
Not-Aus-Verhalten	●	●	●	○	○
Baugröße	○	○	●	●	●
Umweltbelastung	●	●	○	●	●
Kosten	●	●	●	●	○

Abb. 12: Eigenschaften der verschiedenen Antriebe, Quelle: Hesse (2011), S. 42.

### Elektrische Antriebe

Diese Antriebe sind hinsichtlich des Systems sehr oft als ein zweistufiges System aufgebaut. Zunächst wird ein elektrisch betriebener Motor benötigt, welcher die Drehbewegung verursacht, und eine nachfolgende Mechanik, die diese Drehbewegung in eine entsprechende Klemmkraft umwandelt. Für typische

<sup>15</sup> Vgl. Hesse (2011), S. 67.

<sup>16</sup> Vgl. Hesse (2011), S. 41.

Klemmkraft- Greifer sind beispielsweise Schrittmotoren, Servomotoren oder Linearmotoren einsetzbar. Schrittmotoren kommen zum Einsatz, wenn ein Greifsystem günstig gebaut werden muss. Servomotoren werden verwendet, wenn feinfühligere Kraft- und Positionierregelung zum Einsatz kommen soll. Für hochdynamische Anwendungen kommen Piezoantriebe oder Linearmotoren zum Einsatz. Voraussetzung dafür ist, dass es sich um sehr kleine Bauteile handelt, da die Kraft solcher Piezosysteme begrenzt ist. Wenn Hochgeschwindigkeit keine Anforderung ist, überwiegen bei Piezo- und Linearmotorensystemen jedoch die Nachteile. Bei elektrischen Antrieben ist es günstig, wenn diese mit einer selbsthemmenden Spindel zum Einsatz kommen. Nach dem Griff kann der Motorstrom durch die Selbsthemmung abgesenkt werden. Elektrische Greifer können NC- gesteuert ausgeführt sein. Das heißt die Spindel ist über die Steuerung erreichbar und kann innerhalb der Grenzen beliebig eingestellt sein. Dadurch erlangt man den Vorteil, dass man beliebig große Werkstücke ohne Greifertausch manipulieren kann. Während einer Roboterleerfahrt kann, daher der Effektor eine günstige Vorpositionierung, die Greiferbacken betreffend, einstellen. In vielen Fällen kann dies der Taktzeit der Anlage dienlich sein.<sup>17</sup>

Nachfolgend ist ein elektrisches Greifmodul mit dem Keilhaken- Wirkprinzip der Firma Schunk dargestellt. Dabei handelt es sich um einen Parallelgreifer mit Keilhakenprinzip, der von einer Spindelmutter angetrieben wird. Dadurch sind Greifkräfte bis zu 1000 N möglich.



Abb. 13: Schunk EGN mit Keilhakenprinzip, Quelle: Schunk GmbH & Co. KG (2021), Online-Quelle [30.Juli.2021].

- 1) Keilhaken für die Kraftübertragung
- 2) Gleitführung für die Momenteinleitung
- 3) Gehäuse zur Unterbringung der technischen Features
- 4) Spindelmutter zum Antreiben der Mechanik
- 5) Antrieb → Gleichstrom- Servomotor mit Resolver

---

<sup>17</sup> Vgl. Hesse (2011), S. 42f.

Den Aktor bildet bei diesem Beispiel ein Gleichstrom- Servoantrieb. Dieser dreht eine Spindelmutter, welcher dadurch eine Spindel (4) samt angebundenem Keilhaken (1) linear in zwei Richtungen bewegen kann. Der Keilhaken ist formschlüssig mit den Backen des Greifers verbunden. Durch die schiefe Ebene entsteht eine Übersetzung, welche in Kombination mit dem Antriebsmoment der Spindelmutter und der Gewindesteigung eine bestimmte Greifkraft ergibt. Die Backen sind durch den Servoantrieb und wegen der Keilhakenmechanik in beiden Richtungen frei positionierbar.

### **Fluidische Antriebe**

Bei Greifersystemen welche pneumatisch oder hydraulisch betrieben werden, ist die Wirkungskette oft einkettig. Die Aktoren sind zumeist linear betrieben und basieren auf einer runden oder ovalen Geometrie.<sup>18</sup>

Bei druckbetriebenen fluidischen Greifern errechnen sich die Kolbenkräfte folgendermaßen:

$$F = p * A \quad (2.1)$$

F / N	Kolbenkraft
p / MPa	Druck
A / mm <sup>2</sup>	Kolbenquerschnittsfläche

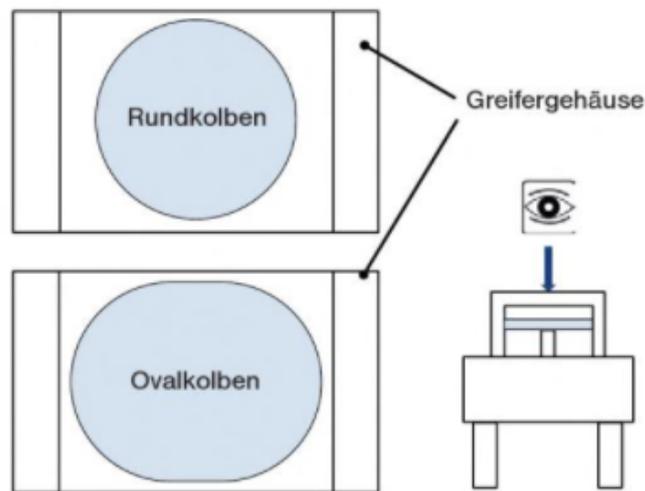


Abb. 14: Antriebsquerschnitte Fluid, Quelle: Feldmann/Schöppner/Spur (2014), S. 341.

Hydraulisch betriebene Greifertechnik ist grundsätzlich frei positionierbar, wenn steuerungstechnisch die nötigen Komponenten vorliegen. Jedoch wird die Energiezufuhr, sollte man an einen Sechachsenroboter

---

<sup>18</sup> Vgl. Hesse (2011), S. 46.

denken, sehr kompliziert. So müsste man die gesamte Energiezufuhr, bei der Hydraulik bestehend aus Druckleitung und Rückleitung, durch ein Energiekettensystems des Roboters führen. Das ist sehr aufwändig und wird in der Industrie weitestgehend vermieden. Daher werden überwiegend pneumatische Greifersysteme eingesetzt, wenn es sich um Greifanwendungen in Verbindung mit Industrierobotern handelt. Um einen guten Kontrast zur elektrischen Variante zu erhalten, wird nachfolgend ein pneumatischer Parallelgreifer der Firma Schunk dargestellt.

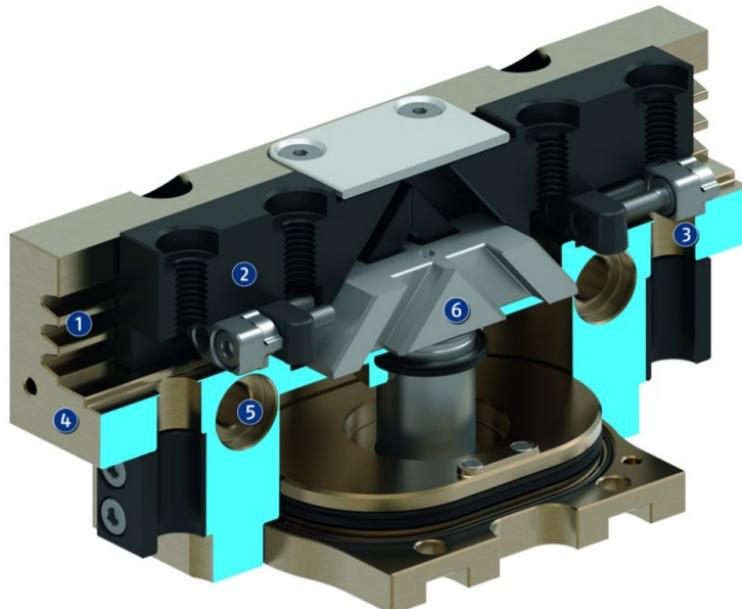


Abb. 15: Pneumatischer Parallelgreifer Schunk PGN, Quelle: Schunk GmbH & Co. KG (2021), Online-Quelle [30.Juli.2021].

- 1) Vielzahn- Gleitführung
- 2) Grundbacken → Sind vorgesehen für die Befestigung der Greiforgane
- 3) Sensorik → In dieser Öffnung wird der induktive Näherungsschalter befestigt
- 4) Gehäuse
- 5) Zentrier- und Befestigungsmöglichkeit
- 6) Keilhaken

Der ovale Kolben wird durch Druckluft nach oben bewegt. Dadurch wird der angebundene am Kolben Keilhaken (6) mit nach oben bewegt und verschiebt die zwei Backen (2) synchron in die jeweilige Richtung. Durch das Keilhakenprinzip gilt das für beide Richtungen. Je nach Kolbengröße und Übersetzungsverhältnisses des Keilhakens wird eine definierte Kraft auf die Backen übertragen. Die Backen werden jeweils in der Führung (1) geführt und die Stellung jeweils über metallische Elemente (3) durch einen induktiven Näherungsschalter abgefragt.

### 2.1.3.2 Parallelbackengreifer

Parallelgreifer erfordern entweder parallele Greifflächenelemente oder die Greiforgane sind dem Objekt entsprechend angepasst. Ein Vorteil ist, dass die Klemmkraft des Aktors über den gesamten Weg der

gleiche ist. Das Getriebe des Greifer- Typs ist etwas platzbeanspruchender als bei anderen Typen und daher sind die Parallelgreifer von der Bauform etwas größer.<sup>19</sup>

Die 2- Backen- Parallelgreifer sind bereits bei Abb. 13 und Abb. 15 im inneren Aufbau detailliert dargestellt und erklärt.

### 2.1.3.3 Radialgreifer

Diese Greifer arbeiten nach dem Scherenprinzip und zeichnen sich dadurch aus, dass diese ihre Backen sehr weit öffnen können – zumeist sind die Backen jeweils 90° öffnbar. Das wirkt sich gegebenenfalls sehr günstig auf die Greifanwendung aus, da die Störkontur auf der Vorderseite des Greifers entfällt, wenn dieser geöffnet ist. Bedingt durch das interne Greifergetriebe erreicht man die maximale Greifkraft erst am Ende des vorgesehenen Hubes.<sup>20</sup>

Am Diagramm unterhalb ist zu erkennen welchen Einfluss die Mechanik auf die Greifkraft in Bezug auf die Fingerstellung hat:

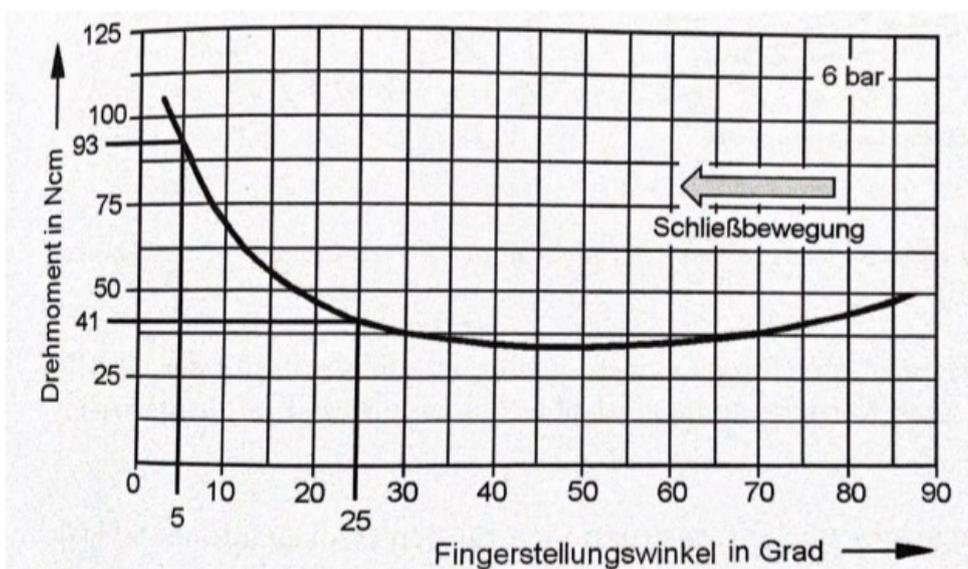


Abb. 16: Verlauf des Momentes zur Fingerstellung beim Radialgreifer, Quelle: Hesse (2011), S. 73.

Die nachfolgende Abbildung zeigt den Aufbau eines am Markt erhältlichen Radialgreifer der Fa. Zimmer. Grundsätzlich ist der Greifer durch ein zwangsgeführtes Kniehebelgetriebe (4) betrieben. Die zwei Backen sind synchronisiert in einer Kulisse geführt. Durch die Druckfeder (4) ist der Greifmechanismus auch geschlossen, wenn die Energie (Druckluft) ausfällt. Durch die Einstellschraube (3) kann man den Hub des Greifers gegebenenfalls begrenzen. Die Nut (6) ist für Reedkontakte vorgesehen und dadurch kann die Stellung des Aktors abfragen.

<sup>19</sup> Vgl. Hesse (2011), S. 67.

<sup>20</sup> Vgl. Hesse (2011), S. 69.



Abb. 17: Aufbau eines Radialgreifers (Zimmer Group), Quelle: Zimmer Group GmbH, Online-Quelle [31.Juli.2021].

### 2.1.3.4 Winkelgreifer

Die Winkelgreifer sind den Radialgreifern im Funktionsprinzip sehr ähnlich. Diese sind lediglich im Hub begrenzter, sprich dem möglichen Öffnungswinkel. Was die beiden Greifertypen auch noch gemeinsam haben ist die Abhängigkeit des Haltemoments von der Fingerlänge. Je länger die Fingerlänge ist desto kleiner wird das Haltemoment der Greifmechanik. Die Abbildung unterhalb zeigt dies beispielhaft auf.

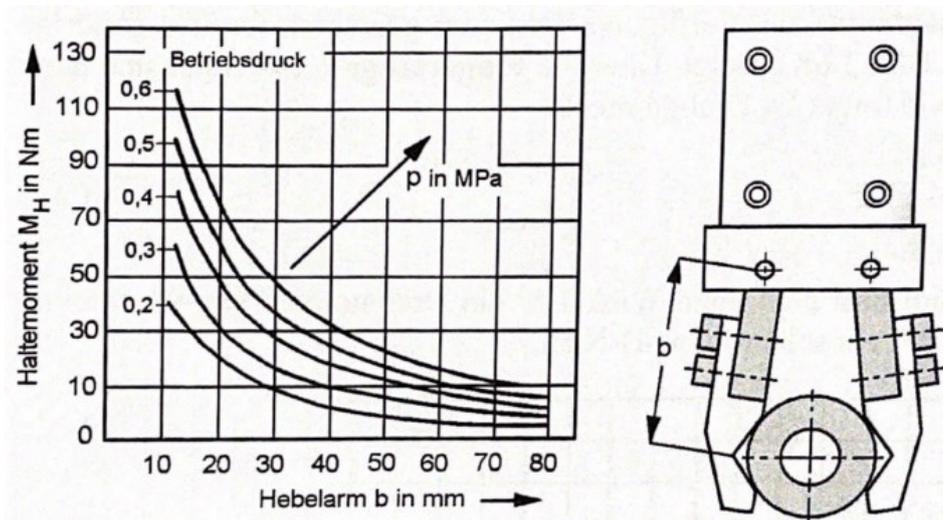


Abb. 18: Haltekraft eines Winkelgreifers abhängig von der Fingerlänge  $b$ , Quelle: Hesse (2011), S. 74.

### 2.1.3.5 Innengreifer

Innengreifer sind dafür vorgesehen ihre Objekte anhand einer Bohrung oder einer ähnlichen Innenkontur eines Werkstückes aufzunehmen. Diese werden dann eingesetzt, wenn es technisch nicht mehr sinnvoll ist einen Zentrischgreifer einzusetzen. Das kann sich zum Beispiel bei sehr kleinen Greifdurchmessern ergeben und in diesem Bereich hat sich dieser Greifertyp auch bewährt. Dafür gibt es auch einige

verschiedene Funktionsvarianten.<sup>21</sup> Eine Variante der Fa. Zimmer wird nachfolgend dargestellt. Bei dieser Version treiben Membrane eine Spannange direkt an und verursachen dabei eine nach außen wirkende Kraft.



Abb. 19: Innengreifer Aufbau, Quelle: Zimmer Group GmbH, Online-Quelle [Juli.2021.Juli].

### 2.1.3.6 Dreibackengreifer

Dreibackengreifer (Zentrischgreifer) halten ihr Objekt mit drei Greiforganen. Dabei können diese Greiforgane geradlinig, bogenförmig und schwenkend zugestellt werden. Das Ziel ist es das zu greifende Bauteil in der Mittelachse des Greifers zu zentrieren und festzuhalten. Die Greifobjekte sind zumeist rund oder von der Geometrie so geeignet, dass diese zentriert werden können. Es gibt sowohl Innengreifer-Lösungen als auch Außengreifer-Lösungen. Typischerweise haben Zentrischgreifer mit Keilhakenprinzip weniger Hub als solche Greifer mit einer Schwenkmechanik.<sup>22</sup>

In der nachfolgenden Abbildung ist ein Zentrischgreifer (Fa. Zimmer) mit Keilhakenmechanik zu sehen.



Abb. 20: Aufbau des Dreibackengreifers mit Keilhakenprinzip, Quelle: Zimmer Group GmbH, Online-Quelle [31.Juli.2021].

<sup>21</sup> Vgl. Hesse (2011), S. 78.

<sup>22</sup> Vgl. Hesse (2011), S. 81.

### 2.1.3.7 Magnetgreifer

Diese Greifer sind vom Aufbau sehr einfach gestaltet und brauchen für die eigentliche Greiffunktion kein bewegtes Bauteil. Die Fa. FIPA stellt einen solchen Greifertyp her und dieser ist nachfolgend dargestellt.

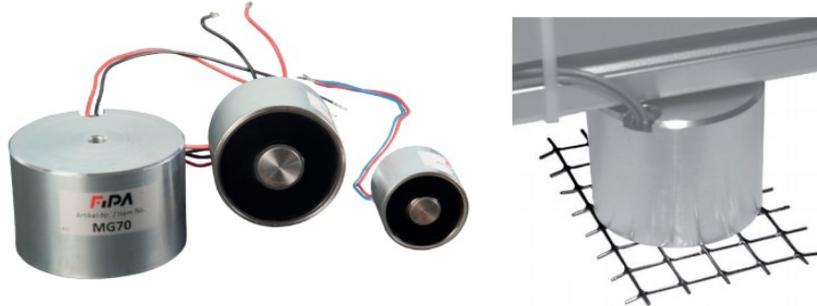


Abb. 21: Dauermagnetgreifer FIPA, Quelle: FIPA GmbH, Online-Quelle [1.August.2021].

Dieser Greifer ist ein Permanentmagnetgreifer und besitzt eine Abschaltspule, um das Magnetfeld des Permanentmagneten gegenpolig zu neutralisieren. Laut Datenblatt dieses Greifers ist eine sichere Handhabung mit unterschiedlichen Blechen und anderen ferromagnetischen Werkstücken vorgesehen. Die Greifer sind als „normally closed“ ausgeführt, das heißt, dass bei Stromausfall das Werkstück vom Permanentmagneten gehalten wird. Dieser Greifertyp ist auch sehr energieeffizient, da nur beim Ablegen des Werkstückes Energie für die Abschaltspule benötigt wird. Je nach Baugröße sind bei planarer und direkter Auflage Haltekräfte von 160 N bis 720 N möglich. Beim Bestromen der Abschaltspule betragen die Resthaltekräfte weniger als 1 Newton.<sup>23</sup>

### 2.1.3.8 Vakuumgreifer

Eine sehr beliebte Methode, um Werkstücke handzuhaben ist die Verwendung von Vakuumgreifern oder auch Sauggreifer genannt. Diese Greifer machen sich den atmosphärischen Unterdruck zunutze. Diese Greifer kommen in der Grundfunktion auch weitestgehend ohne bewegliche Teile aus. Die Sauggreifer selbst sind kostengünstig zu erwerben und in vielen Variationen erhältlich. Es gilt zu beachten, dass die Greifer in einer Vakuumkammer, aufgrund des Druckausgleiches, unwirksam werden.<sup>24</sup>

---

<sup>23</sup> Vgl. FIPA GmbH, Online-Quelle [1.August.2021].

<sup>24</sup> Vgl. Hesse (2011), S. 109.



Abb. 22: Variationen von Sauggreifern, Quelle: J. Schmalz GmbH, Online-Quelle [1.August.2021].

Das Vakuum wird extern erzeugt und zu den Sauggreifer weitergeleitet, damit diese die anhaftende Wirkung überhaupt erzeugen können.

Das wird in der Regel je nach Bedarf folgendermaßen erzeugt:<sup>25</sup>

- Über eine Vakuumpumpe oder ein Gebläse
- Vakuumsaugdüsen auch Ejektoren genannt (mit Druckluft betrieben)
- Saugbälge die oft manuell betätigt werden
- Pneumatikzylinder wo der Kolben extern gehoben wird

Als besonders praktisch haben sich Ejektoren nach dem Venturi- Prinzip erwiesen, da sich diese sehr klein bauen lassen und Inline in der Verschlauchung der Vakuumsaugdüse integrieren lassen.

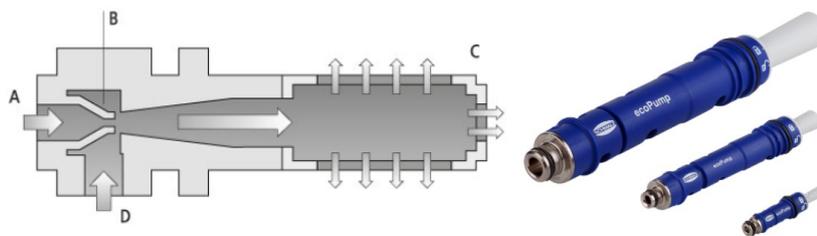


Abb. 23: Vakuum- Ejektoren, Quelle: J. Schmalz GmbH, Online-Quelle [1.August.2021].

Bei der Abb. 23 ist ein Vakuum- Ejektor schematisch dargestellt. Über den Anschluss (A) wird die Druckluft eingeleitet und durchströmt die Venturi- Düse (B). Dadurch wird die durchströmende Luft beschleunigt und zugleich komprimiert. Nachdem die Luft durch die Venturi- Düse geströmt ist, entspannt sich die beschleunigte Luft und erzeugt dadurch atmosphärischen Unterdruck. Durch diesen Effekt wird über den Anschluss (D) Luft angesaugt und dieser ist somit der Anschluss für den Sauggreifer. Die angesaugte Luft und die Druckluft treten gemeinsam über den Schalldämpfer (C) wieder aus. Vorteile dieser Ejektoren sind

---

<sup>25</sup> Vgl. Hesse (2011), S. 114.

die kompakte Bauform, das geringe Gewicht, der schnelle Vakuum- Aufbau, die Verschleißfestigkeit und die beliebige Einbaulage.<sup>26</sup>

### 2.1.4 Übersichtsmatrix für Sensoren und Aktoren konventioneller Greifer

Die dargestellten Sensoren und Aktoren haben jedenfalls keinen Anspruch auf Vollständigkeit, es gibt in diesem Bereich um einiges mehr, so wie bei den Sensoren als auch bei den Aktoren. Die Auswahl dieser Komponenten erfolgte aufgrund des häufigen Vorkommens in solchen Greifsystemen. Im Sinne der Aufgabenstellung findet hier anschließend eine kompakte Sortierung und Einordnung der vorgestellten Elemente statt.

<b>SENSOREN</b>	Direkte Bauteilabfrage	Abfrage Aktorstellung
Induktiver Näherungsschalter	<b>X</b>	<b>X</b>
Reedkontakte		<b>X</b>
Reflexionslichtschranken	<b>X</b>	
Einweglichtschranken	<b>X</b>	<b>X</b>
Reflexlichttaster	<b>X</b>	

Tabelle 1: Einordnung der ausgewählten Sensoren, Quelle: Eigene Darstellung.

Die oben gezeigte Tabelle gibt Aufschluss darüber, welche der vorgestellten Sensoren eher dafür geeignet sind Bauteile im Robotergreifer direkt abzufragen und welche eher dafür geeignet sind Aktorstellungen abzufragen.

Die nachfolgende Tabelle soll eine Übersicht über diejenigen Aktoren geben, welche im vorherigen Abschnitt beschrieben sind. Diese gibt Aufschluss darüber wie die Kraftübertragung auf das Werkstück stattfindet und wo diese bevorzugt, eingesetzt werden.

---

<sup>26</sup> Vgl. J. Schmalz GmbH, Online-Quelle [1.August.2021].

<b>Aktor</b>	<b>Kraftübertragung auf Greifobjekt</b>	<b>Anwendungsbeispiele</b>
Parallelbackengreifer	Kraft-/ Formschlüssig	Standardgreifer für Werkstücke mit gut geeigneten Greifflächen
Radialgreifer	Kraft-/ Formschlüssig	Werkstücke die umschlossen werden müssen, oder Vermeidung von Störkontur an der Vorderseite des Greifers
Winkelgreifer	Kraft-/ Formschlüssig	Größere Öffnungsweiten möglich als bei Standard- Parallelbackengreifer
Innengreifer	Kraft-/ Formschlüssig	Werkstücke die durch Innenkonturen aufgenommen werden
Dreibackengreifer	Kraft-/ Formschlüssig	Rotationssymmetrische Werkstücke
Magnetgreifer	Anhaftend	Für metallische Werkstücke welche magnetisch sind
Vakuumgreifer	Anhaftend	Objekte mit glatter Oberfläche und eher geringere Masse

Tabelle 2: Übersicht der konventionellen Aktoren, Quelle: Eigene Darstellung.

Damit wird dieser Abschnitt geschlossen und es wird übergeleitet in neuen Abschnitt, welcher eine Übersicht über die relevanten additiven Fertigungsverfahren für diese Arbeit gibt.

## 2.2 Übersicht über additive Fertigungsverfahren

Die additive Fertigung gehört zu den „neuen“ generativen Fertigungsverfahren. Bei diesem Verfahren entstehen im Gegensatz zu subtraktiven Fertigungsverfahren keine Späne. Es wird hierbei ein umgekehrter Ansatz verfolgt. Anstatt Material abzutragen, wird hier nur benötigtes Material hinzugefügt. Im Unterschied zu konventionellen und klassischen Verfahren, werden hier keine speziellen Formen (z.B. Urformen) und Werkzeuge (z.B. Umformen) zur Herstellung der Geometrien benötigt. Es muss nicht zwischendurch aufwändig umgerüstet werden, um den nächsten Fertigungsschritt durchführen zu können: Als Beispiel kann hier das Herstellen von Gewinden nach dem Konturfräsen genannt werden. Die Herstellung eines solchen Bauteiles verlangt auf jeden Fall eine automatische oder manuelle Umrüstung durch Werker:innen, wenn dies auf einer normalen Fräsmaschine hergestellt wird. Bei der additiven Fertigung wird grundsätzlich die Idee verfolgt durch ein- und dieselbe Maschine alle Geometrien herstellen zu können.

Die nachfolgende Auflistung und Beschreibung der einzelnen Druckverfahren haben keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Hier werden Verfahren beschrieben, die in der weiteren Arbeit auch relevant sind. Die Verfahren werden gleichzeitig auf Multimaterial- Fähigkeit geprüft und der Abschnitt im Anschluss gibt Aufschluss darüber, was man unter Multimaterial- Druck im Allgemeinen versteht.

### 2.2.1 Multimaterial 3D Druck

Unter dem Begriff multimaterialer additiver Fertigung versteht man einen Prozess, wobei ein dreidimensionales Objekt aus mehreren Materialien heterogen hergestellt wird. Dieser Prozess wird auch als MMAM abgekürzt: Multi- Material Additive Manufacturing. Dabei kann die Zusammensetzung des Materiales auch innerhalb der Schicht variieren. Diesem Verfahren wird großes Potenzial für Funktionserweiterung und integrierten Funktionen von Bauteilen nachgesagt. Diesen Vorteil kann man durch Verwendung von nur einem Material schwer bis gar nicht erzielen. Damit können zum Beispiel thermische Trennungen, angepasste Leitfähigkeiten oder integrierte 3D Schaltkreise erzielt werden. Der Multimaterial- Druck ist noch in einem sehr frühen Stadium und kann noch um einiges verbessert werden. Ziel zukünftiger MMAM- Projekte ist es eine verbesserte Funktionsfähigkeit zu einem besseren Preis anbieten zu können. Die Idee dahinter ist es nicht nur einzelne Bauteile zu fertigen, sondern in einem Produktionsschritt eine gesamte Baugruppe additiv fertigen zu können. Allerdings gilt es zu beachten, dass aktuelle Fertigungsanlagen dazu noch nicht in der Lage sind. Am Markt erhältliche Multimaterial- Anlagen sind zumeist nur fähig Werkstoffe derselben Klasse zu kombinieren. Das heißt im Klartext, dass z.B. ein Kunststoff mit einem andersartigen Kunststoff kombinierbar ist. Es wird längst nicht die gesamte Bandbreite der Werkstoffe kombiniert.<sup>27</sup>

### 2.2.2 FLM Druckverfahren (Fused Layer Modeling)

Es handelt sich hierbei um ein Extrusionsverfahren, welches auch häufig als FDM – Fused Deposition Modeling bezeichnet wird. Wie bei vielen anderen 3D- Druckverfahren geht es hierbei auch um den schichtweisen Aufbau eines dreidimensionalen Objektes. Durch Erhitzen und Erweichen des Materiales an der Austrittsdüse, wird in Verbindung mit den einzelnen Bewegungen des Druckkopfes das Objekt entsprechend aufgebaut. Man kann sich hier eine Heißklebepistole vorstellen, welche mit konstantem Vorschub den Kleber austreten lässt und zusätzlich wird diese von einem Kinematiksystem bewegt. Bei diesem Verfahren ist es jedoch ausschließlich möglich Kunststoffe zu verarbeiten. Metalle oder Holzwerkstoffe sind nur in Verbindung mit einem Thermoplast druckbar. Häufig eingesetzt wird Polyactid (PLA) und Acrylnitril-Butadien- Styrol- Copolymeren (ABS) für die Verarbeitung in einem FLM Drucker. Es gilt bei der Verarbeitung besonders Augenmerk auf die nötigen Stützstrukturen beim Druckprozess zu legen. Überhänge mit zu steilem Winkel (kleiner als 30° zur Druckebene) können nicht zuverlässig hergestellt werden. Diese Stützstrukturen sind nach dem Druck zumeist manuell zu entfernen. Diese benötigten Stützstrukturen sind so vorgesehen, dass beim Entfernen keine Beschädigungen am Objekt entstehen. Es gibt auch wasserlösliche Versionen von Stützmaterial, die von einigen Herstellern angeboten werden: Um diese zu verwenden können, muss aber ein Doppelkopfextruder an der Anlage aufgebaut sein. Die Verwendung eines wasserlöslichen Stützmaterialies verbessert die Oberfläche des Objektes nach der Nachbearbeitung erheblich. Durch das FDM- Verfahren sind die Möglichkeiten Hinterschnitte und Hohlräume zu realisieren im Gegensatz zu anderen Druckverfahren, allerdings beschränkt. Auch für kleine und komplizierte Objekte sind andere Verfahren besser einsetzbar. Es kann sehr leicht zu Abweichungen und unebenen Oberflächen kommen, welche die Qualität des gedruckten Objektes sehr vermindern. Durch

---

<sup>27</sup> Vgl. Lachmayer/Lippert/Kaierle (2019), S. 301f.

die eher simpel gehaltene Technik sind die Kosten für eine Anlage oft überschaubar, bei zugleich eher großem Bauraum. Im professionellen Bereich wird der FDM- Druck aktuell im Bau von Prototypen verwendet. Weiters wird die Verwendung von höherwertigen Materialien in der Möbelindustrie und Interieur- Design getestet.<sup>28</sup>

Als KinematiksysteM kommen hier einige in Frage: Kartesisches System, Delta System oder Systeme mit einem Roboterarm. Die kartesische Version ist die verbreitetste Version bei einem FDM- 3D Drucker. Diese besteht aus dreidimensionalen orthogonalen Achsensystem mit denen die Bewegungsrichtung des Druckkopfes gesteuert wird. Diese Lösung ist recht kostengünstig herzustellen, deswegen bieten fast alle namhaften Hersteller der Branche solche Drucker an. Es kursieren auch einige Bausätze in der Branche, welche man kostengünstig erwerben kann und auch einfach selbst zusammenzubauen sind. Die Delta-Drucker erfreuen sich im FDM- Bereich auch großer Beliebtheit. Sie arbeiten ebenfalls mit kartesischen Koordinaten. Das Druckbett ist rund und wird von einem dreiecksförmigen Säulenaufbau umschlossen, welcher das Achsensystem darstellt. Darauf ist der Name „Delta“ auch zurückzuführen. Der Extruder ist an diesen Achsen mit Gelenken befestigt und besitzt einen mechanischen Neigungsausgleich, damit dieser immer normal zur Druckplatte steht. Diese Drucker können wesentlich größere Verfahrgeschwindigkeiten im Gegensatz zum orthogonalen 3- Achssystem aufweisen. Auch ist die Qualität des Drucks nicht direkt von der Größe des Drucks abhängig. Es wird dieser Version von Druckern zugesprochen, dass diese schwerer zu kalibrieren sind. Zurzeit gibt es auch einige Entwicklungen mit Roboterarmen. Diese werden hauptsächlich im Baugewerbe zum Druck von Häusern verwendet. Der große Vorteil liegt hier in der Bewegungsfreiheit des Extruderkopfes und das bietet einige neue Möglichkeiten in der Gestaltung. Allerdings hapert es an der Genauigkeit des Druckprozesses und daher entwickeln viele Unternehmen noch an der Verbesserung.<sup>29</sup>

Das Verfahren ist auch unter den Synonymen FFF (Fused Filament Fabrication) oder FDM (Fused Deposition Modeling) bekannt.

---

<sup>28</sup> Vgl. Adamek/Piwiek (2019), S. 10f.

<sup>29</sup> Vgl. 3Dnatives SAS, Online-Quelle [10.Juni.2021].

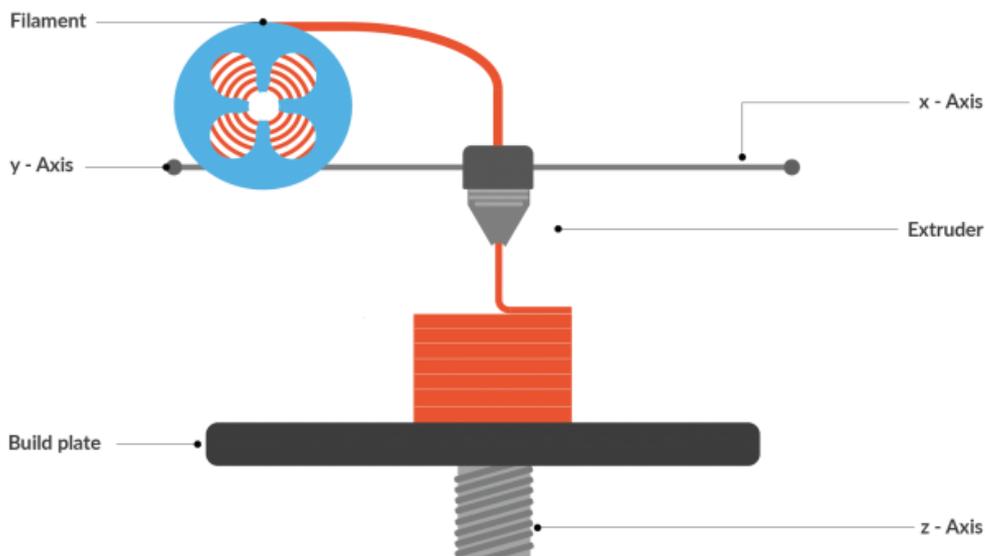


Abb. 24: FLM/ FFF Druckverfahren, Quelle: DruckWege GmbH, Online-Quelle [10.Juni.2021].

In der Abb. 24 ist das FLM- Verfahren schematisch dargestellt. Ausgang bei diesem Prozess stellt das zugeführte Filament dar. Dieses wird entweder über einen Bowden- Zug oder direkt ziehend an den Extruder zugeführt. Die Zuführung findet entsprechend des Modellaufbaus statt und wird von der Steuerung des Druckers geregelt. Bei Verwendung eines Bowden- Zuges muss man weniger Masse beschleunigen, da der Zuführtrieb nicht direkt am Extruder sitzen muss. Der Extruder ist eine beheizte Düse, welche eingangs den Durchmesser (meist 1,75 mm) des Filaments aufweist und ausgangs den definierten Durchmesser für den Modellaufbau hat (meist 0,4 mm). Bei dieser Darstellung ist vorgesehen, dass der Extruderkopf kartesisch in XY- Ebene bewegt wird. Die für den in Höhe benötigten Modellaufbau, ist die Bauplattförmung mit Z- Achse verantwortlich.

### 2.2.2.1 Multimaterialdruck mit dem FFF- Verfahren

Während die additive Fertigung noch längst nicht in den meisten produzierenden Betrieben in der Industrie angekommen ist, schreitet diese neue generative Fertigungsmethode mit großen Schritten voran. Multi-Material Bauteile werden immer sinnvoller und eröffnen den Konstrukteuren neue Türen. Man kann Bauteile und insbesondere Baugruppen neu denken – man fertigt ganze funktionale Systeme in einem Schritt. Bislang ist es den FDM Druckanlagen (gemeinsam mit dem PolyJet- Verfahren) vorbehalten, Bauteile mit verschiedenen Werkstoffen in einem Schritt herstellen zu können. Druckverfahren welche auf flüssige (SLA) oder pulverförmige Ausgangsstoffe zurückgreifen, bleibt dieses Privileg bisher verwehrt. Das hat schlicht verfahrenstechnische Gründe, die sich bis jetzt noch nicht ausräumen haben lassen. Beim FDM- Verfahren hat man den Vorteil, dass man theoretisch beliebig viele Druckköpfe nebeneinander anordnen kann und so die verschiedenen Materialien verarbeiten kann. Es gibt auch Lösungen, wo ein Druckkopf mit mehreren Extruder- Düsen bestückt ist und von verschiedenen Filamentzuführungen versorgt, wird. Auch Druckkopf- Wechseleinheiten sind für diese Anwendung durchaus denkbar. Die meisten am Markt erhältlichen Multimaterial FDM Drucker sind für 2 verschiedene Materialien ausgelegt. Dies wird zumeist dazu genutzt, um in einen Extruder das Stützmaterial zu fördern und im anderen das oft

benötigte Stützmaterial. Jedoch kann man in diesem zweiten Extruder problemlos ein zweites Nutzmaterial einspannen und dieses für ein multi- funktionales Druckteil zu nutzen. Die Software der Drucker (Slicer) ist so ausgelegt, dass man auch innerhalb einer Schicht das Material wechseln kann. Damit erhält man in dieser Hinsicht eine größere gestalterische Freiheit, weil man verschiedene Werkstoffe „nahtlos“ aneinanderfügen kann. Aufgrund der Filamentvielfalt am Markt ergeben sich viele Kombinationsmöglichkeiten, welche verschiedene Eigenschaften der Bauteile verändern oder verbessern. Dazu gehört die Optik, da sich Farben vom gleichen Materialtyp mischen lassen. Dadurch lassen sich Bauteile mit verschiedenen Farbabschnitten durch den 3D Druck realisieren. Es lassen sich auch mechanische Eigenschaften miteinander kombinieren: Beispielsweise kann man an einem faserverstärkt gedruckten Greiferfinger ein flexibles Material anfügen, um eine materialschonende Greiffläche zu bekommen. Grundsätzlich lassen sich zwei unterschiedliche Filamente auf verschiedene Methoden zu einem festen Werkstück miteinander verbinden. Zum einen gibt es die Möglichkeit die Materialien „normal“ zu drucken, also rein durch Verschmelzen aneinander zu binden. Das funktioniert immer genauso gut, wie die Polymerzusammensetzung der beiden Materialien sich zueinander ähneln. Auch die Verarbeitungstemperatur sollte hier auf einem sehr ähnlichen Niveau sein. In einigen Fällen gehen auch weniger ähnliche Materialien feste Bindungen ein. Eine klare Grenze bildet hier die Verarbeitungstemperatur. Wenn die vorgeschriebene Betttemperatur die Formstabilität des anderen Materials überschreitet, dann wird die Kombination dieser zwei Materialien aus diesem Grund unmöglich. Um die Festigkeit beim FDM Multimaterialdruck zu verbessern, gibt es die Möglichkeit auch eine formschlüssige Komponente hinzuzufügen. Für diese Methode muss man im Slicer Programm zwei STL Modelle übereinanderlegen. Daher muss die Software das auch unterstützen da man den Modellen auch unterschiedliche Parameter und Materialien zuweisen muss. Die Conclusio ist, dass man schon im CAD zwei zueinander gehörige Körper designt und diese als STL exportiert. Wichtig ist, dass sich diese Körper auf dasselbe Koordinatensystem beziehen. Diese Körper werden dann im Slicer Programm sauber aneinandergesetzt.<sup>30</sup>

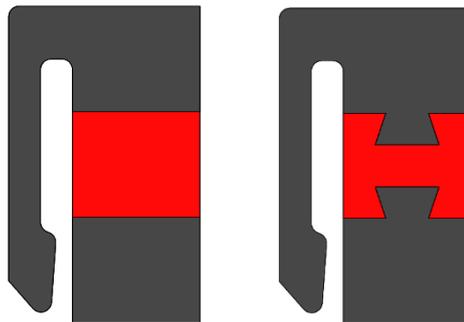


Abb. 25: Verschiedene Körper im FDM Multimaterialdruck, Quelle: Eigene Darstellung.

Die obere Abbildung zeigt auf was sich der obere Absatz bezüglich nur stoffschlüssige und die Kombinationsmöglichkeit stoff- formschlüssige Verbindung bezieht. In der linken Abbildungshälfte ist die rein stoffschlüssige Verbindung zu sehen. Je nach Materialeigenschaften ist diese Verbindung im

---

<sup>30</sup> Vgl. Eutebach (2020), Online-Quelle [12.Juni.2021].

Materialübergang hinsichtlich der mechanischen Festigkeit der gefährdete Querschnitt. Auf der rechten Abbildungshälfte ist die Kombination aus Stoffschluss und Formschluss zu sehen. Auf diese Weise wird die Situation mit dem gefährdeten Querschnitt deutlich entschärft.

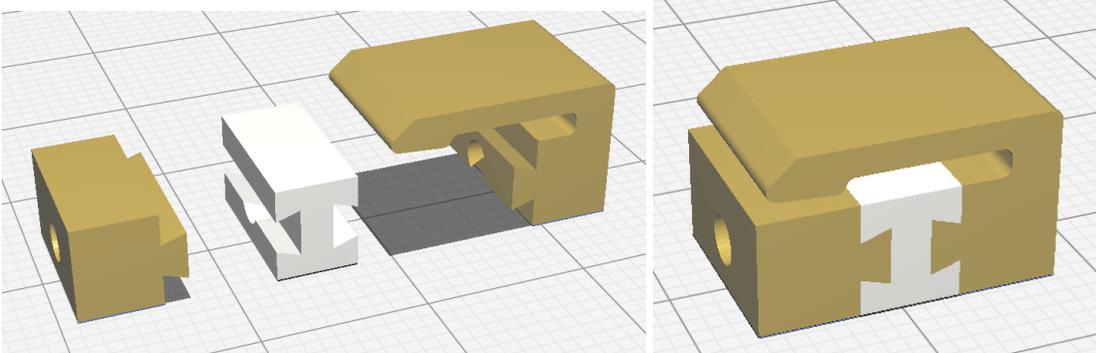


Abb. 26: Vereinigung der Bauteile im Slicer, Quelle: Eigene Darstellung.

In der oberen Abbildung ist zu erkennen, wie mit dem Slicer- Programm die Körper im Nachgang wieder zusammengefügt werden. Es ist sehr gut zu erkennen, wie der Formschluss via Schwalbenschwanz realisiert ist. Diese Methode garantiert zugleich einen stoffschlüssigen und formschlüssigen Zusammenhalt der zwei Körper zueinander.

Grundsätzlich lassen sich folgende Materialkombinationen laut Mammerler im FDM- Druck realisieren: (Die Darstellung ist besonders auf Ultimaker- Materialien ausgelegt)

	PLA	ABS	Nylon	CPE	CPE+	PC	TPU 95A	PP	PVA	Breakaway
PLA	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✓
ABS		✓	✗	✗	✗	✗	✓	✗	✗	✓
Nylon			✓	✗	✗	✗	✓	✗	✓	✓
CPE				✓	✗	✗	✗	✗	✓	✓
CPE+					✓	✗	✗	✗	✓	✓
PC						✓	✓	✗	✗	✓
TPU 95A							✓	✗	✓	✓
PP								✓	✗	✗
PVA									✗	✗
Breakaway										✗

Abb. 27: Materialkombinationen FDM- Multimaterial- Druck, Quelle: Mammerler (2019), Online-Quelle [30.September.2021].

Die Haken in der Abbildung oben zeigen an, ob eine Materialkombination möglich ist. Die möglich Kombinationen sind in diesem Fall immer zeilenweise abzulesen. Zum Beispiel lässt sich PLA sehr gut mit PVA oder Breakaway kombinieren.

### 2.2.3 SLA Druckverfahren

Dieses Verfahren ist auch bekannt unter dem Namen Laser- Stereolithographie. Die maßgebende Idee hierbei ist, dass Schicht für Schicht ein photopolymeres Kunstharz durch lokales Einwirken von UV-Laserlicht in einer definierten Form gehärtet wird. Der Rest des Harzbades bleibt dabei flüssig, solange es nicht durch besagten Lichtstrahl verfestigt wird. Auf diese Weise wird ein Objekt schichtweise aufgebaut und erwächst aus dem Harzbad. Im Gegensatz zu anderen Verfahren ist die Kinematik hier in gewisser Weise umgekehrt. Die Bauplattform ist oberhalb angeordnet und das gedruckte Objekt haftet dabei unterhalb an. Die Bauplattform wird nach jeder gedruckten Schicht um eine Schichtstärke nach oben verstellt. Nach jeder Schicht wird das Objekt kurzzeitig wieder in das Harzbad eingetaucht – dies nennt sich „Recoating“. Das Postprocessing ist bei diesem Druckverfahren etwas aufwändiger: Das Objekt muss nach dem Druck in einer Alkohollösung gereinigt werden und danach nochmals extern der Maschine mit UV- Licht nachgehärtet werden.<sup>31</sup>

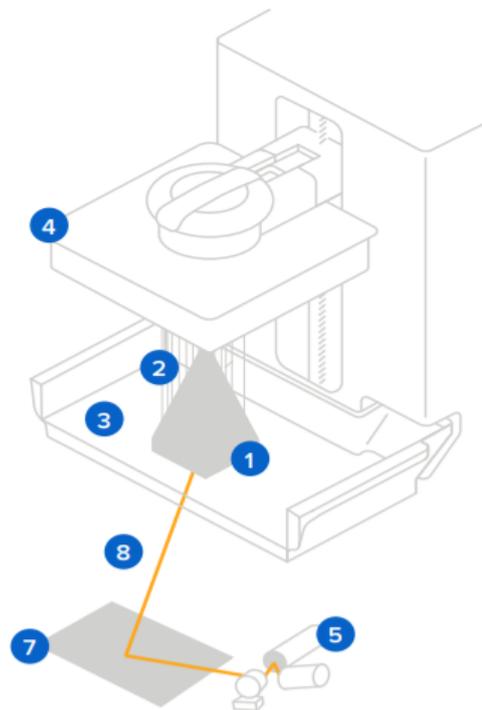


Abb. 28: SLA- Verfahren, Quelle: Formlabs, Online-Quelle [27.August.2021], S. 4.

(1) zeigt das Druckteil, welches auf der Druckplattform (4) anhaftet. Dabei wird das Bauteil von Stützstrukturen (2) getragen. Der Resin- Tank (3) stellt das flüssige Kunstharzmaterial während des Drucks bereit. Der Laserstrahl (8) ist dafür verantwortlich, dass das Material an der vorgesehenen Stelle gehärtet wird. Der X-Y- Scanspiegel (7) lenkt den Strahl gemäß der Schichtinformation an die richtige Position. Die Laserenergiequelle (5) sitzt an der Unterseite der Maschine.

„SLA 3D-Drucker nutzen duroplastische Materialien, die mit Licht reagieren und als „Resins“ oder Kunstharze bekannt sind. Wenn SLA-Kunstharze bestimmten Lichtwellenlängen ausgesetzt werden,

<sup>31</sup> Vgl. Adamek/Piwek (2019), S. 5.

vereinen sich kurze Molekülketten, die Monomere und Oligomere polymerisieren und ausgehärtet steife oder flexible Geometrien bilden.<sup>32</sup>

SLA- Druckverfahren bieten bezüglich Auflösung, Genauigkeit, Detailgrad und Oberfläche die besten Ergebnisse unter den 3D Drucktechnologien. Es gibt viele Hersteller die verschiedensten Formulierungen von geeigneten Kunstharzen herstellen. Dabei wird je nach Material das Augenmerk auf optische, mechanische oder thermische Eigenschaften gelegt. Diese Materialien stehen industriellen Thermoplasten in nichts nach.<sup>33</sup>

Ein großer Vorteil des Verfahrens ist die Isotropie der erzeugten Teile im Gegensatz zu anisotropen FLM-Erzeugnissen. So spielt es bei SLA- Erzeugnissen keine Rolle in welcher Lage das Druckteil erzeugt wird, es gibt praktisch keine Unterschiede zwischen den X-, Y- oder Z- Schichten.<sup>34</sup>

### 2.2.4 DLP Druckverfahren

Dieses Verfahren nennt sich Digital Light Processing. Dieser Druckprozess ist dem SLA- Verfahren sehr ähnlich. Es werden ebenfalls photosensitive Harze durch UV- Licht Schicht für Schicht gehärtet. Der Unterschied ist, dass der Laserstrahl die entsprechenden Stellen bestrahlt. Es wird die gesamte Schicht auf einmal mit dem UV- Licht bestrahlt. Dies wird mit vielen kleinen beweglichen Spiegeln am DLP-Projektor realisiert, diese werden entweder zum Bauraum gerichtet oder von diesem weg. Die Nachbearbeitung und Postprocessing ist identisch zum SLA- Verfahren. Diese Drucker können sehr kompakt hergestellt werden und sind zumeist sehr preisgünstig. Außerdem besitzen diese eine gute Detailauflösung und werden zum Beispiel zum Erzeugen von Schmuckrohlingen verwendet. Die Nachteile dieses Verfahrens bestehen in der geringen thermischen Widerstandsfähigkeit der gedruckten Objekte und der mechanischen Belastbarkeit der Erzeugnisse. Die genannten Eigenschaften sind zum Beispiel beim Lasersintern um einiges besser.<sup>35</sup>

Zurzeit werden auch einige Versionen eines DLP- Druckers mit einem LCD- Display als UV- Lichtquelle angeboten. Der Unterschied ist hier, dass man keinen DLP- Projektor mit verstellbaren Spiegeln verwendet, sondern ein Display, wo die einzelnen Bildpunkte entsprechend dem Modell beim Schichtaufbau beleuchtet sind. Mit einer modernen Version (Sonic Mega 8k) ist eine Präzision von 43 Mikrometer möglich und eine sehr schnelle Beleuchtungsdauer von ein bis zwei Sekunden pro Schicht möglich.

---

<sup>32</sup> Formlabs, Online-Quelle [27.August.2021], S. 4.

<sup>33</sup> Vgl. Formlabs, Online-Quelle [27.August.2021], S. 4.

<sup>34</sup> Vgl. Formlabs, Online-Quelle [27.August.2021], S. 9.

<sup>35</sup> Vgl. Breuninger/Becker/Wolf/Rommel/Verl (2013), S. 38.

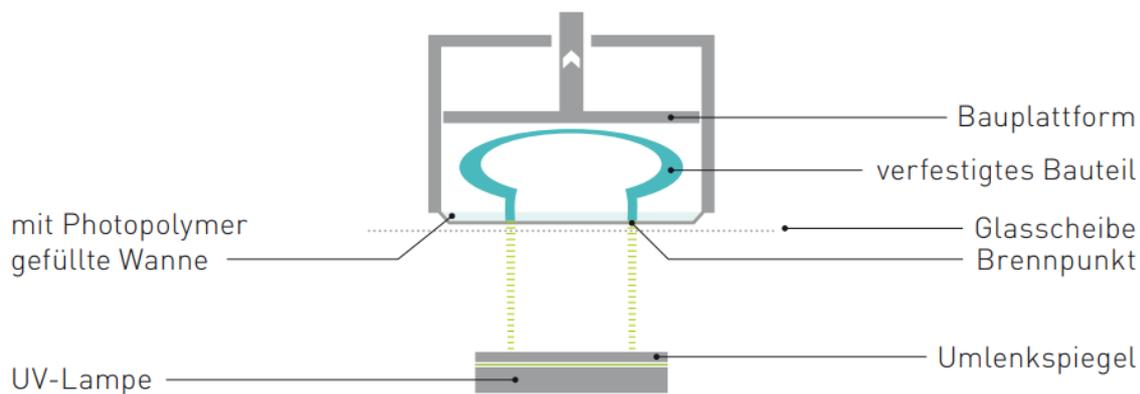


Abb. 29: DLP- Verfahren, Quelle: Breuninger/Becker/Wolf/Rommel/Verl (2013), S. 38.

## 2.2.5 SLS Druckverfahren

Beim Selektiven Lasersintern handelt es sich um einen pulverbasierten additiven Fertigungsprozess. Dabei wird Kunststoffpulver aus bereitstehenden Behältern nach und nach in dünnen Schichten auf eine Druckfläche aufgetragen und mittels eines Heizbettes auf eine gewünschte Verarbeitungstemperatur gebracht. Die Schichtdicke der applizierten Schicht, beträgt zumeist 100 Mikrometer, was einem Zehntel eines Millimeter entspricht. Mithilfe von steuerbaren Ablenkspiegeln wird durch ein Laser- Modul, zumeist ein CO<sub>2</sub> Laser, die entsprechende Kontur auf der Schicht eingeschmolzen. Die Schichtinformationen sind zumeist binär im System hinterlegt. Das heißt konkret, dass die Pulverkörner orts aufgelöst aufgeschmolzen werden und sich anschließend zu einem Schichtfragment eines Bauteils vereinigen. Dieser Vorgang arbeitet während einer Schicht kontinuierlich, bis diese fertiggestellt ist. Auf diese Art und Weise entsteht Schicht- für – Schicht ein neues Bauteil.<sup>36</sup> Das ungesinterte Material dient beim Druckprozess als Stützstruktur, somit sind keine zusätzlichen Stützstrukturen notwendig. Nach dem Druck muss die Bauplattform abkühlen damit sich die Teile nicht verformen und die mechanischen Eigenschaften wie vorgesehen bestehen bleiben.<sup>37</sup>

Bei der Nachbearbeitung der Produkte muss das Teil zuerst von der Bauplattform getrennt werden. Das überschüssige Pulver muss dabei entfernt werden, welches wiederverwendbar ist. Da die Oberfläche der Produkte nach dem Druck als grob einzuordnen ist, sollten diese nachher durch Bestrahlung (mit verschiedenen Strahlmitteln) und Gleitschleifen nachgearbeitet werden.<sup>38</sup>

In der Abb. 30 ist der SLS- Prozess schemenhaft dargestellt. Die Heizelemente (1) sorgen für die richtige Temperatur in der Konstruktionskammer (2). An den Seiten sind die Pulverzuführungssysteme zu erkennen (3). Das Druckteil ist in der Mitte (4) auf der Bauplattform zu erkennen. Der Nachbeschichter (5) sorgt dafür, dass das Material für die nächste Schicht wieder bereitgestellt wird. Der Laserstrahl (6) sorgt für die Versinterung des Materials. Der verstellbare Spiegel (7) führt den Laserstrahl an die vom Programm vorgesehene Modellposition. Bei (8) ist die Laserquelle zu erkennen, welche die Lichtenergie einleitet.

<sup>36</sup> Vgl. Schmid (2015), S. 10.

<sup>37</sup> Vgl. Formlabs (2021), Online-Quelle [27.August.2021], S. 4.

<sup>38</sup> Vgl. Formlabs (2021), Online-Quelle [27.August.2021], S. 15.

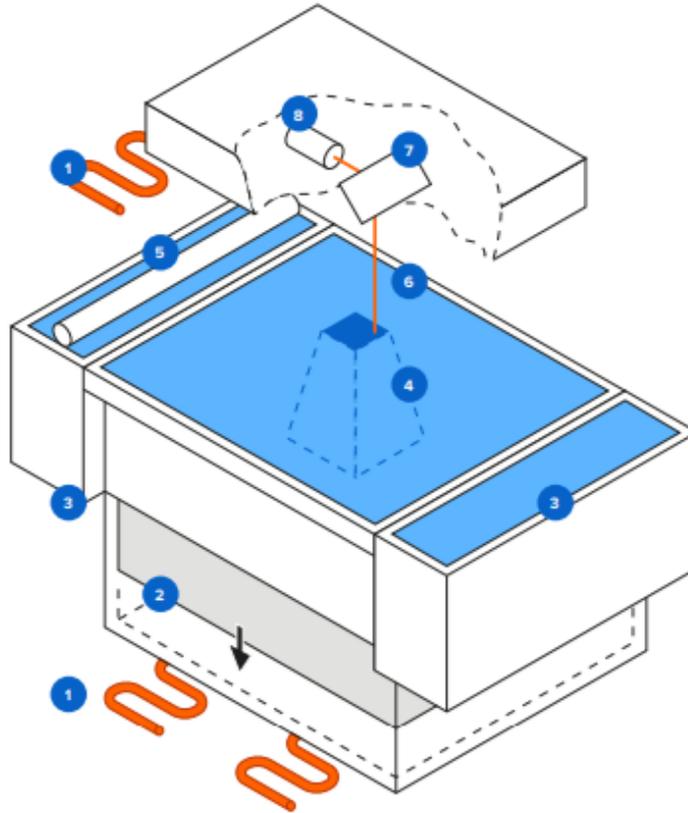


Abb. 30: Schema SLS- Druck, Quelle: Formlabs (2021), Online-Quelle [27.August.2021], S. 4.

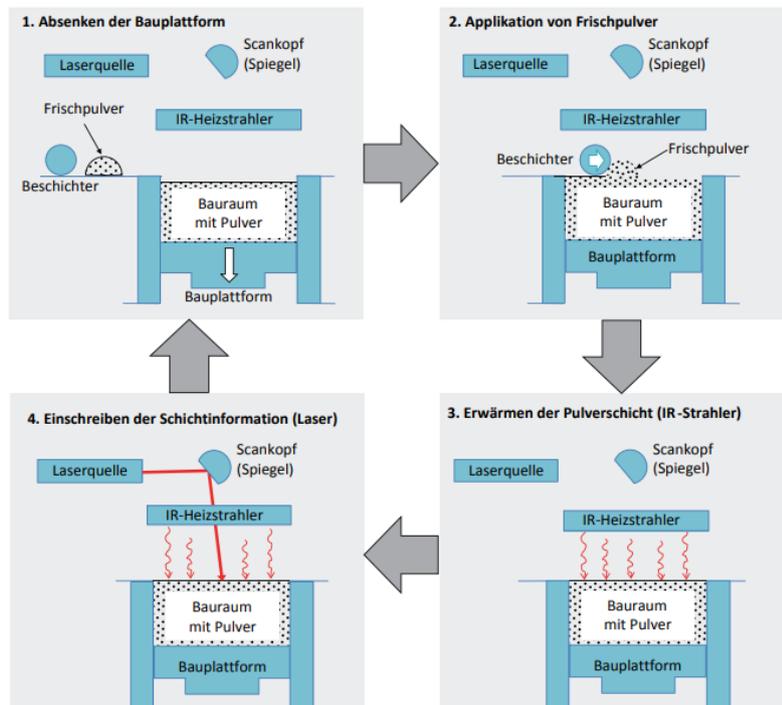


Abb. 31: Arbeitsschritte SLS- 3D Druck, Quelle: Schmid (2015), S. 10.

## 2.2.6 Multi Jet Fusion

Dieses Verfahren (MJF) ist ebenfalls ein pulverbasiertes 3D Druck Verfahren von der Firma HP, das hochauflösende und präzise Druckobjekte mit einer hohen Oberflächengüte herstellen kann. Auf Laserbestrahlung wird hier jedoch verzichtet, als Energiequelle dient bei diesem Verfahren Infrarotlicht.<sup>39</sup>

Das Verfahren beginnt mit dem Auftragen von einer dünnen Schicht des Pulvermaterials (Material recoater) auf die gesamte Bauplattform (Working Area). Dabei wird das Pulver von vorne nach hinten aufgetragen. Der HP Thermo- Inkjet- Druckkopf mit der Energiequelle verschmilzt dabei das Pulver mit einer Bewegung von links nach rechts. Bei dieser Bewegung werden die Fusing- und Detailing- Agents aufgetragen. Die Energiequelle ist dabei zuständig für das Erwärmen des Materials, das unmittelbar vor und nach dem Auftrag der Agents stattfindet. Das soll eine durchgängige Temperaturkontrolle während des Drucks bei jeder Schicht gewährleisten. Dieser Vorgang wird dann Schicht für Schicht in abwechselnder Reihenfolge wiederholt.<sup>40</sup>

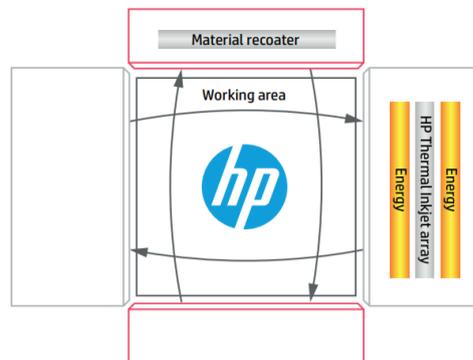


Abb. 32: Schema HP Multi Jet Fusion, Quelle: HP Development Company, L.P. (2018), Online-Quelle [27.August.2021], S. 3.

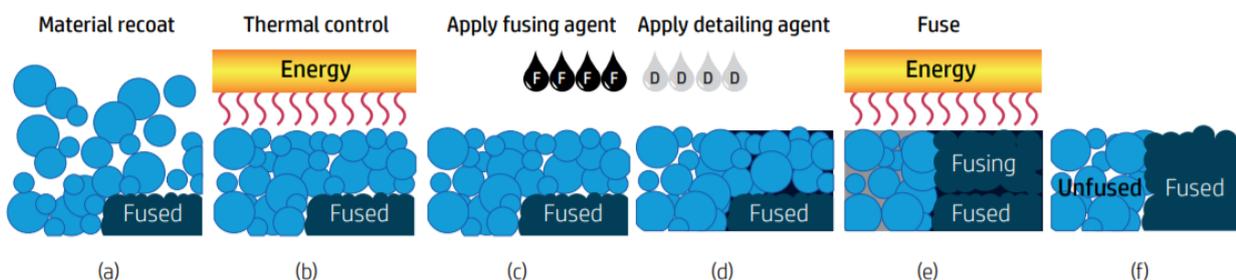


Abb. 33: Funktionsschema MJF, Quelle: HP Development Company, L.P. (2018), Online-Quelle [27.August.2021]

Die Abb. 33 zeigt den Zustand (a) nach dem Materialauftrag durch den Material- Recoater. Danach wird das Material durch den Druckkopf auf Temperatur gebracht (b), um unmittelbar danach die entsprechenden Agents (c) und (d) aufzutragen. Danach wird im gleichen Zuge die nochmal Energie zugeführt, um das Material zu binden. Auf (f) erkennt man, dass das die entsprechende Schicht abgeschlossen ist.

<sup>39</sup> Vgl. Gärtner (2021), Online-Quelle [27.August.2021].

<sup>40</sup> Vgl. Gebhardt/Kessler/Schwarz (2019), S. 7.

### 2.2.7 PolyJet®- Verfahren (Material Jetting)

Bei dieser Technologie handelt es sich um ein patentiertes Verfahren vom amerikanischen Unternehmen Stratasys. Mit diesem Verfahren ist es möglich äußerst präzise und sehr detailgetreue Modelle herzustellen. Die hohe Genauigkeit und die glatte Oberfläche übertreffen vergleichbare Druckverfahren. Zudem sind geringe Wandstärken kombiniert mit komplexen Geometrien möglich. Grundsätzlich stehen photopolymere Kunststoffe (Acrylharze) mit verschiedenen Ausprägungen zur Verfügung. Hier gibt es Variationen von fest bis gummiartig, transparente Werkstoffe, polypropylenartige oder ABS- ähnliche Werkstoffe. Es gibt auch Werkstoffe, welche für die Zahnmedizin geeignet sind oder biologisch kompatibel sind. Mit dieser Drucktechnologie ausgestatteten Maschinen verfügen bis zu acht Druckköpfe mit mehreren Düsen, aus welchen sehr feine Tropfen in Schichthöhen von bis zu 0,014 mm appliziert werden. Die Druckköpfe werden ähnlich wie bei anderen Drucktechnologien kartesisch bewegt und tragen das Material mit einer Auflösung von 600 dpi auf die Plattform auf. In der Z- Achse ist eine noch genauere Auflösung von bis zu 1600 dpi möglich, was abhängig von der verwendeten Maschine ist. Da es sich um photopolymere Kunststoffe handelt müssen diese von UV- Licht ausgehärtet werden, ähnlich wie beim DLP- oder SLA- Druckverfahren. Jedoch ist hier der Beleuchtungskörper am Druckkopf selbst angebracht und wird beim Druckvorgang selbst vollständig ausgehärtet. Das Verfahren bietet als einziges 3D- Druck-Verfahren der Welt ein gleichzeitiges Verarbeiten, Kombinieren und Mischen von bis zu 7 unterschiedlichen Basismaterialien. Je nach Bedarf können farbgebende oder mechanische Eigenschaften kombiniert oder gemischt werden. Die Firma Stratasys nennt diese Werkstoffe „digitale Materialien“. So lassen sich mit der Technologie mehrkomponentige Baugruppen erzeugen, welche zugleich elastische Elemente aufweisen und an einer anderen Stelle steife Eigenschaften aufweisen. Das Ganze in einem Arbeitsschritt – dem Druckprozess selbst. Endprodukte können dadurch sehr genau abgebildet werden, mit all ihren Eigenschaften, wie Haptik, Optik und Funktion. Vollfarb- 3D- Drucker, die ebenfalls über diese Technologie verfügen, können mehr als 500.000 Farben applizieren. Somit ist eine Texturierung der Objekte möglich und eine Herstellung farbrealistischer Modelle ist ebenfalls machbar.<sup>41</sup>

Dieses Verfahren wird auch MultiJet- Modeling (MJM) genannt. Zum Finishing gehört das Nachschleifen, wenn die Geometrie es zulässt und es nötig ist. Die Teile können nachträglich lackiert, beschichtet und poliert werden. Zu den Anwendungsgebieten zählen funktionelle Prototypen mit Materialkombinationen, Miniaturobjekte und Urformen.<sup>42</sup>

---

<sup>41</sup> Vgl. Michael Junghanß, Online-Quelle [3.August.2021].

<sup>42</sup> Vgl. 3Faktur GmbH, Online-Quelle [3.August.2021].

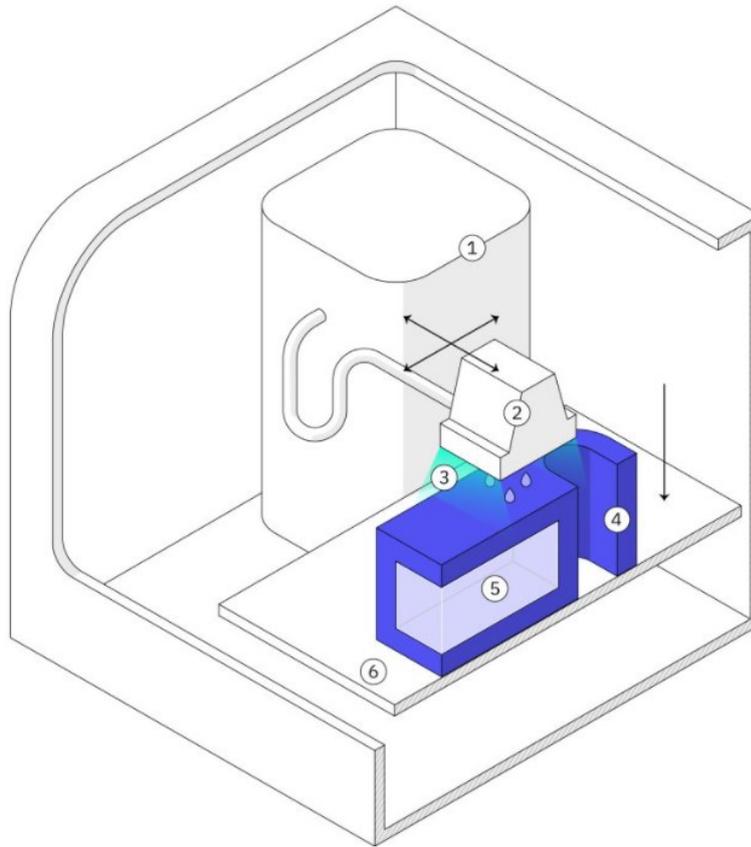


Abb. 34: Schema PolyJet- Verfahren, Quelle: HUBS B.V. (2021), Online-Quelle [04.September.2021].

Der Materialcontainer (1) führt dem Druckkopf (2) das Material zu, dieser spritzt dann hunderte winzige Polymer- Tröpfchen auf die Bauplattform (6). Die UV- Lampe (3) härtet das neu zugeführte Material am Bauteil (5) aus. Bei diesem Verfahren werden immer mindestens zwei Materialien verwendet<sup>43</sup>. Das Material aus dem das Bauteil besteht und das auflösbare Support- Material (5).

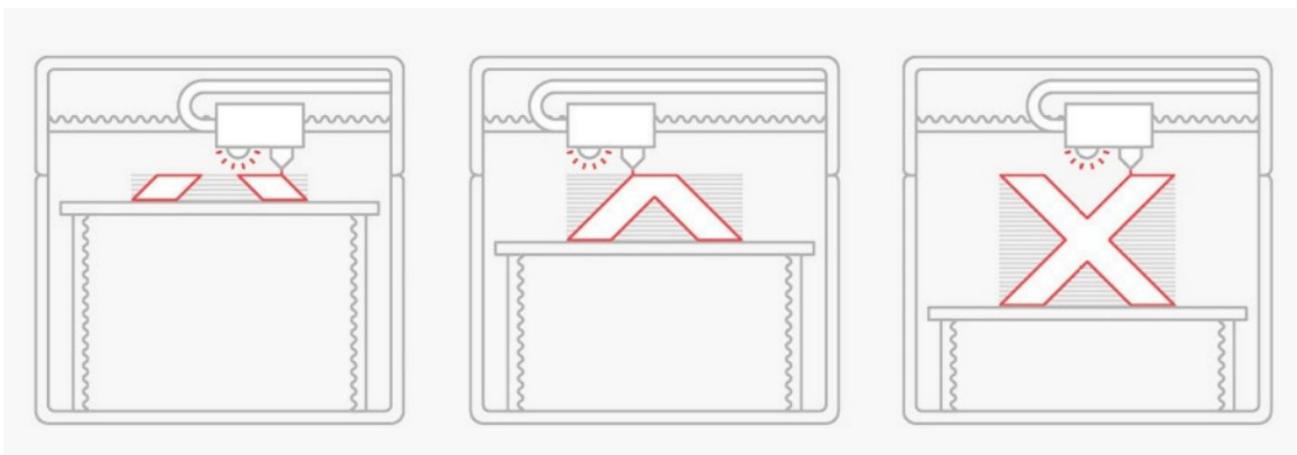


Abb. 35: PolyJet Druckvorgang, Quelle: Redwood/Schöffner/Garret (2017), S. 130.

<sup>43</sup> Vgl. Redwood/Schöffner/Garret (2017), S. 127.

## 2.2.8 Zusammenfassung der Druckverfahren

Die obigen dargestellten Verfahren stellen nicht alle verfügbaren Verfahren dar. Sie sind aber sehr gängige Verfahren, speziell im Bereich der kunststoffverarbeitenden Verfahren. Die dargestellten Verfahren und weitere relevante Verfahren werden in der nachfolgenden Tabelle dargestellt und sie gibt nochmal eine kompakte Übersicht. Die dargestellte Tabelle gibt weiters Aufschluss darüber, ob das Verfahren auch fähig ist einen Multimaterialdruck durchzuführen.

Verfahren	Basismaterial	Typische Werkstoffe	Multimaterialfähig
FLM/ FLM	Filament auf Spulen	ABS, PLA, PC	JA
SLA	Flüssiges Resin	Strong, Tough, Flexible	NEIN
DLP	Flüssiges Resin	Strong, Tough, Flexible	NEIN
SLS	Pulver	PA12, PA11, TPU, PE <sup>44</sup>	NEIN
MJF	Pulver und Agents	PA12, Elastomere <sup>45</sup>	NEIN
PolyJet	Flüssige Acryl-Polymere	Veroclear, Digital ABS	JA

Tabelle 3: Übersicht über die 3D Druck Verfahren, Eigene Darstellung.

Damit wird der Abschnitt abgeschlossen und es wird übergegangen zu einer Übersicht, wie der 3D Druck angewendet wird. Hierbei wird das Hauptaugenmerk auf zugängliche Verfahren gelegt, zu denen vordergründig das SLA- Druckverfahren und FFF- Druckverfahren zählen.

---

<sup>44</sup> Vgl. Schmid (2015), S. 15.

<sup>45</sup> Vgl. HP Development Company, L.P. (2018), Online-Quelle [27.August.2021], S. 6.

## 2.3 Anwendung des 3D Drucks

Nachdem die einzelnen möglichen 3D- Druckverfahren im vorherigen Kapitel dargestellt sind, wird in diesem Kapitel auf den Workflow für die Herstellung von 3D Druck Teilen eingegangen.

Grundsätzlich durchlaufen alle 3D gedruckten Teile den gleichen Workflow, unabhängig vom Druckverfahren. Allgemein durchläuft man in der additiven Fertigung folgende Stadien:

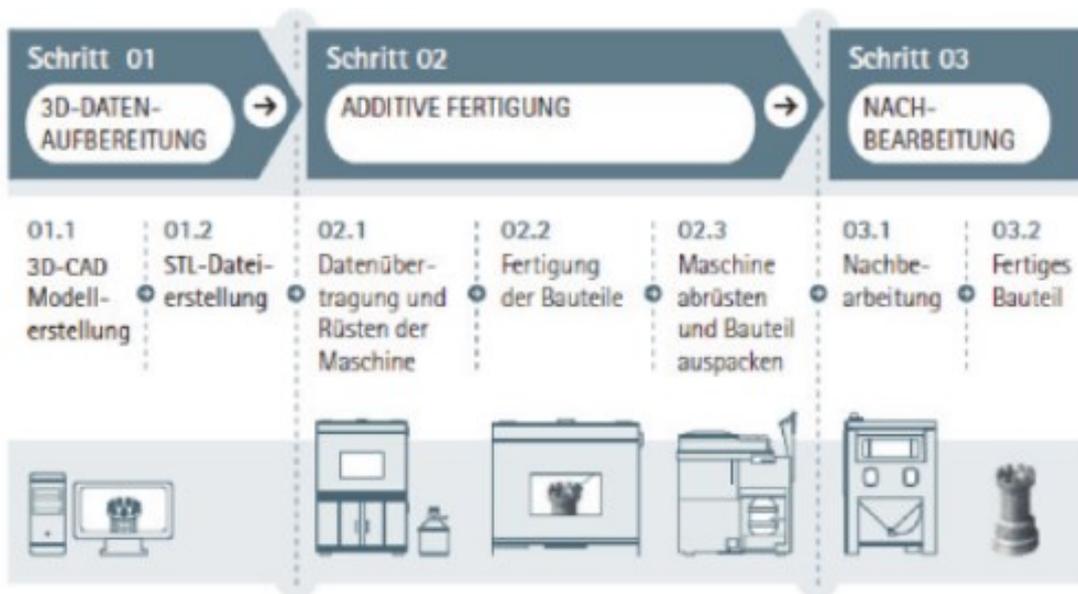


Abb. 36: Workflow 3D Druck, Quelle: Komorowsky (2014), S. 14.

Florian Horsch beschreibt den Workflow zur Herstellung eines additiv gefertigten Teils folgendermaßen:

„Man startet seine Konstruktionssoftware und erstellt eine Tasse anhand von Formeln, rotations-symmetrischen Linien, primitiven Grundformen, Freiformen oder einer Kombination all dieser Techniken. Danach wird das neu erstellte 3D-Modell im STL-Format exportiert und in die Slicing-Software geladen. Dort bestimmt man Schichtstärken, Drucktemperaturen und Geschwindigkeiten sowie eine Vielzahl weiterer Parameter. Das 3D-Modell wird in der Software in dünne, zweidimensionale Schichten zerlegt und in Form von Maschinen-Codes gespeichert. Der erzeugte Code wird nun an den 3D-Drucker übertragen. Dort wird Schicht für Schicht Material (abhängig von dem verwendeten Verfahren) aufeinander aufgetragen, bis die Form der Tasse vollendet ist.“<sup>46</sup>

### 2.3.1 Modellerstellung

Die Grundlage, dass man überhaupt etwas additiv fertigen kann, ist die digitale Arbeit, die man am Computer verrichten muss. Demnach muss man einen 3D- Datensatz erstellen, welcher zumeist ein Volumenmodell ist. So ein Volumenmodell beschreibt die komplette Oberfläche eines Modelles im Gegensatz zu einem Netz, welches nur die Kanten eines Modelles beschreibt. Dabei spielt es keine Rolle

<sup>46</sup> Horsch (2014), S. 33.

mit welchem Werkzeug das Modell erstellt wird. Es gibt die klassische Methode das Modell mit einem CAD-System zu erstellen. Hierbei könnte man zum Beispiel Autodesk Inventor oder Solid Works einsetzen.<sup>47</sup>

Jedoch gibt es auch andere Methoden, um den besagten Datensatz zu erstellen:<sup>48</sup>

- Man nutzt die CT- Scanner, welche nicht nur in der Medizin eingesetzt werden, um eine Modellgeometrie aufzunehmen. Diese CT- Daten können dann mittels eines Rekonstruktionsprogrammes in einen Volumendatentyp übersetzt werden und sind somit für die generative Weiterverarbeitung verwendbar. Diese Systeme werden in der Technik auch für zerstörungsfreie Prüfung von Werkstoffen eingesetzt.
- Man kann eine Koordinatenmessmaschine dazu einsetzen, um eine Punktwolke aufzuzeichnen. Diese Punktdaten können dann in CAD- Systeme importiert werden und zu einem Volumenmodell konvertiert werden.
- Man macht Gebrauch von zur Verfügung stehenden Bauteil- Bibliotheken. Je nach Urheberrechten kann man diese nutzen und aus dem Internet herunterladen. Diese kann man bei Bedarf mit einem CAD- System oder Grafik- Programm noch entsprechend den eigenen Wünschen modifizieren.

Bei Gestaltung eines 3D Modelles ist genaues Augenmerk darauf zu legen, dass man innerhalb gewisser Richtlinien an die Bauteilgestaltung herangeht. Dies wird im nachfolgenden Kapitel „Entwicklungsmethodik für den 3d Druck“ detailliert beschrieben.

### 2.3.2 Weiterverarbeitung der Modelldaten

Zunächst wird das 3D Modell als eine STL- Datei (oder eine Alternative) aus dem CAD- System exportiert, um für das sogenannte Slicer- Programm verarbeitbar zu sein. Neben dem gängigen STL- Datei Format gibt es einige andere Formate, die genutzt werden können. Diese enthalten im Gegensatz zum STL- Format einige Vorteile, die im Slicing genutzt werden können.

Zu diesen Formaten zählen: STL (Stereolithography), 3MF (3D Manufacturing Format), AMF (Additive Manufacturing File Format), OBJ

#### 2.3.2.1 STL- Dateiformat:

Das STL- Format hat sich als Standard für den 3D- Druck entwickelt, obwohl dieser Standard nicht vollends definiert ist. Es existieren einige Definitionen für das Akronym STL: Standard Transformation Language, Surface Tesselation Language, Standard Triangulation Language oder auch Stereolithography. Grundsätzlich wurde das Format im Jahr 1989 eingeführt. Diese Schnittstelle gilt als kompakt und öffentlich zugänglich und wird weitreichend eingesetzt. Auch wenn es einige Schwachstellen am Format gibt, wurde es bis heute nicht ersetzt. Beim Speichern von Dateien im STL- Format, wird im Wesentlichen die Oberfläche eines Modelles in eine beliebige Anzahl von Dreiecken zerlegt. Somit sind STL- Exporte aus einem CAD- Modell eigentlich immer nur Annäherungen an das Ursprungsobjekt. Je mehr Dreiecke für die Annäherung verwendet werden, desto besser wird die Qualität, die erhält man. Jedoch steigen damit auch

---

<sup>47</sup> Vgl. Komorowsky (2014), S. 15.

<sup>48</sup> Vgl. Komorowsky (2014), S. 15.

der Rechenaufwand und die Dateigröße. Es sollte also die Auflösung entsprechend der Anwendung gewählt werden. Weiters muss man beachten, dass sich als STL exportierte Dateien nur umständlich verarbeiten lassen, aber so gut wie mit jedem Grafik- System betrachten lassen. Hier kann man eine gute Analogie zum 2D- Druck und deren Standardformat PDF ausmachen.<sup>49</sup>

### 2.3.2.2 3MF- Dateiformat

Dieses Format ist ein Open- Source- Projekt, welches vom 3MF- Konsortium entwickelt ist. Hauptgründer von 3MF ist das Software- Unternehmen Microsoft, das sich zum Hauptziel gesetzt hat, ein 3D- Format zu schaffen, welches auf einer XML- Plattform basiert. Dieses Format enthält umfassendere Informationen im Gegensatz zum STL- Dateiformat. Mit diesen Daten ist es möglich einzelne Objekte zu referenzieren und zu verschieben, ohne, dass das Netz wie bei STL- Dateien neu aufgebaut werden muss. Wenn identische Objekte ein zweites Mal platziert wird, ist das eine neue Instanz und es wird die Position der Geometrie neu gespeichert. Das 3MF- Format verwendet dieselbe Komprimierungs- Methode wie ZIP- Archive. Außerdem sind innerhalb des Slicing- Vorgangs folgende Daten speicherbar: manuell erstellte Stützen, variable Schichthöhen, Farb- und Texturinformationen und Druckerprofil (bei Verwendung PrusaSlicer).<sup>50</sup> Die Firma HP ist ebenfalls ein Gründungsmitglied des Konsortiums<sup>51</sup>.

### 2.3.2.3 AMF- Dateiformat

Dieses Format ist ebenfalls ein offener Standard, der auf XML basiert. Das Dateiformat ermöglicht es Farben zu berücksichtigen und eine Manipulation der Grundstruktur. Das Objekt besteht hier nicht nur aus einem Netz mit Dreiecken, sondern auch aus Funktionen. Diese Erweiterung dient dem Farb- 3D Druck und dem Multi- Material 3D Druck.<sup>52</sup> Das Dateiformat ist als Norm unter ISO/ ASTM 52915:2020 veröffentlicht<sup>53</sup>. Eine Konvertierung in das STL- Format ist ohne Datenverlust möglich und das AMF- Format ist stark komprimierbar<sup>54</sup>.

### 2.3.2.4 OBJ- Dateiformat

Dieses Dateiformat stellt ein offenes Format dar, das dreidimensionale Geometrien auf einem Datenträger abbildet. Das Format ist von Wavefront Technologies entwickelt und wird von den meisten 3D- Software Systemen unterstützt. Aus diesem Grund wird es oft für den plattformübergreifenden Datenaustausch genutzt. Im Wesentlichen nutzt das OBJ- Format die Basis vom ASCII- Format in einer vereinfachten Form.

---

<sup>49</sup> Vgl. Horsch (2014), S. 84-87.

<sup>50</sup> Vgl. Engelke (2021), S. 13.

<sup>51</sup> Vgl. HP Development Company, L.P. (2018), Online-Quelle [27.August.2021], S. 7.

<sup>52</sup> Vgl. Engelke (2021), S. 13.

<sup>53</sup> Vgl. International Organization for Standardization (2020), Online-Quelle [24.August.2021].

<sup>54</sup> Vgl. May/Zaremba, Online-Quelle [24.August.2021].

Es stellt eine gute Alternative zum STL- Format dar, da es auch Informationen bezüglich Farbe und Material enthält.<sup>55</sup> Das OBJ- Format ist das Standard- Format für den farblichen 3D Druck<sup>56</sup>.

### 2.3.2.5 Slicing

Da das Thema der Aufbereitung der notwendigen Daten für den 3D Drucker sehr umfangreich ist, wird hier im Speziellen auf 2 sehr gängige Verfahren eingegangen: Das SLA- Verfahren und FDM- Verfahren.

Um den entsprechenden Pfad für den Extruder eines Druckers zu erzeugen, muss eine separate Anwendung namens Slicer verwendet werden, die ein 3D-Modell (STL, 3MF,...) in für den 3D-Druck geeignete Schichten zerlegt<sup>57</sup>. Diese Schichten entsprechen der tatsächlichen Schichthöhe beim Druck selbst.

#### Exkurs bezüglich Isotropie beim 3D Druck:

Grundsätzlich wird beim Slicing darauf geachtet, dass das Bauteil so ausgerichtet ist, dass es so wenig wie möglich Überhänge produziert. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist der Kraftfluss im später verwendeten Bauteil. Ein Bauteil, das richtungsabhängige physikalische Eigenschaften aufweist, ist anisotrop. Das trifft auf 3D gedruckte Bauteile zu, welche in unterschiedlichen Richtungen unterschiedliche Bruchdehnungen aufweisen, wie zum Beispiel bei FDM- gedruckten Bauteilen. FDM- Drucke schmelzen Kunststoffschichten übereinander und es entsteht dabei eine mechanische Haftung und keine chemische. Die FDM Schichten haften daher nicht vollständig aneinander. Dagegen sind SLA- Drucke isotrop und durch das Verfahren sind kovalente Bindungen in alle Richtungen möglich. Jedes fortlaufende Teil, welches mit dem SLA- Verfahren gedruckt wird, kann praktisch wie ein Spritzgusskunststoffteil betrachtet werden.<sup>58</sup>

#### Slicing für das FDM- Verfahren:

Das Slicer- Programm schneidet, das importierte File in horizontaler Lage in kleine Segmente. Hierbei kann vom Nutzer selbst die Stärke dieser Segmente, innerhalb eines gewissen Rahmens, definiert werden. Bei der Software CURA werden beispielsweise drei grundlegende verschiedene Schichthöhen als Schnelleinstellung angeboten. Diese 3 Schnelleinstellungen bieten eine Bandbreite zwischen 0,06 mm und 0,15 mm. Diese Profile stimmen alle anderen Parameter mit ab. Diese Parameter reichen von Wandstärke, Füllungsmuster bis hin zur Stützstruktur. Hier gibt es zahlreiche weitere Parameter, die alle selbst definiert werden können. Die final präparierte Datei enthält einen G- Code, welcher vergleichbar mit der Koordinatendatei von einer CNC- Werkzeugmaschine ist. Diese Datei enthält alle Daten, die der Drucker zur Herstellung des Modells benötigt.

---

<sup>55</sup> Vgl. Engelke (2021), S. 13.

<sup>56</sup> Vgl. May/Zaremba, Online-Quelle [24.August.2021].

<sup>57</sup> Vgl. Evans (2012), S. 37.

<sup>58</sup> Vgl. Formlabs (2021), Online-Quelle [31.August.2021].

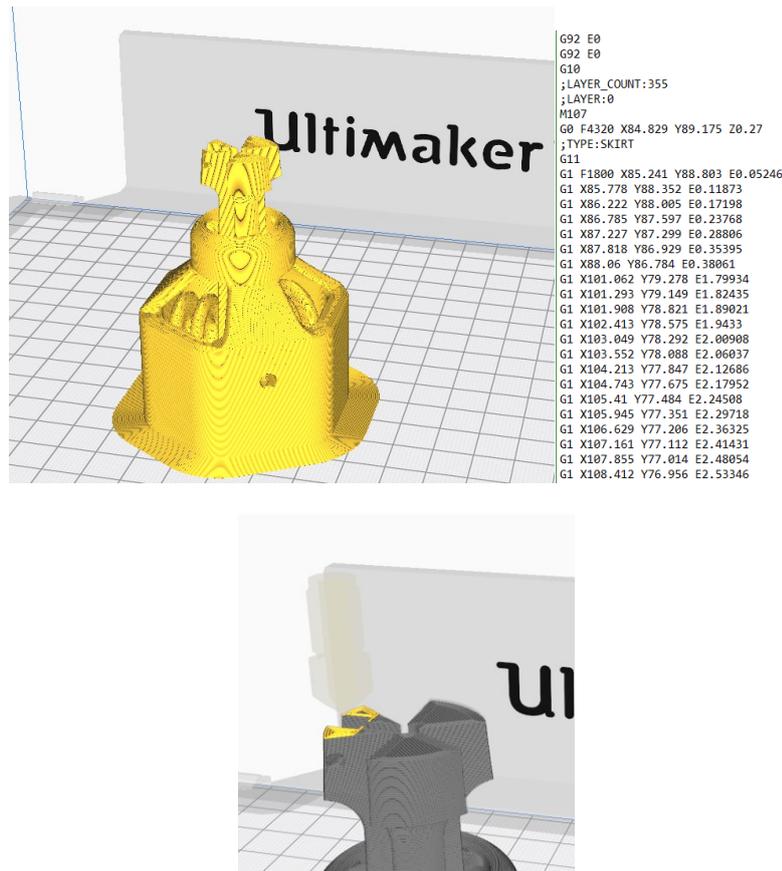


Abb. 37: Slicing mit CURA, Quelle: Eigene Darstellung.

In der obigen Abbildung ist eine geslicte Datei in Cura zu sehen. Dabei sieht man den gesamten Schichtaufbau des Objektes, rechts daneben ist das automatisch erstellte Druckerprogramm im Texteditor zu sehen. Darunter in der Mitte ist die Nozzle des Druckers zu sehen welcher gerade eine Schicht aufbaut. Damit lässt sich für den User nachvollziehen, wie eine bestimmte Schicht konkret aufgebaut wird.

Slicing für das SLA- /DLP- Verfahren:

Beim SLA- und DLP Verfahren gilt dasselbe wie für andere Druckverfahren. Im Slicer wird eine entsprechende Datei importiert (STL, OBJ...) und dort in die gewünschte Schichtstärke in vertikaler Richtung in Silhouetten- Scheiben geschnitten. Im Unterschied zu FDM- Slicern kommt es hier teils auf andere Parameter an: Die Belichtungszeit durch die Display- Matrix (DLP- Projektor, LCD) oder wie weit die Bauplattform aus dem Harzbecken gezogen wird (Recoatingprozess), wenn der Layer fertig ist. Auch bei diesem Verfahren müssen die Bauteile gestützt werden, wenn diese Überhänge aufweisen und der Winkel sich im kritischen Bereich befindet. Anders als beim FDM- Verfahren strebt man nicht an, dass das eigentliche Bauteil flach auf der Plattform aufliegt. Bei diesem Verfahren sind die eigentlichen Bauteile immer von der Bauplattform abgehoben und werden vom Stützmaterial getragen. Dabei werden diese meist immer so gedreht, sodass man abgesehen von der Unterseite des Bauteiles, so wenig wie möglich abstützen muss. Weiters sollte man darauf achten, dass der Ablauf von überschüssigen Resin im inneren des Bauteiles möglich ist. Die folgende Abbildung gibt Aufschluss darüber wie das konkret gemeint ist.

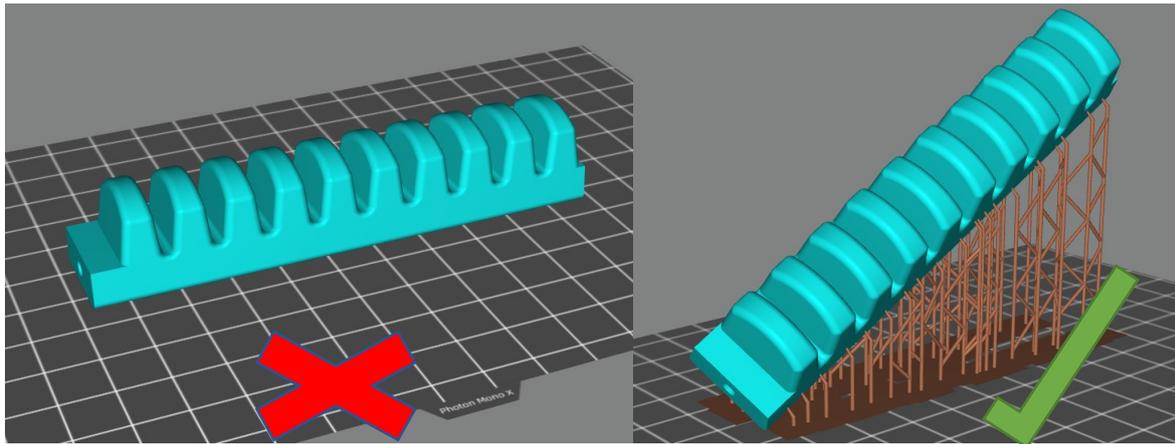


Abb. 38: Beispiel für die Ausrichtung eines Soft- Grippers auf der Plattform (SLA und DLP), Quelle: Eigene Darstellung.

### 2.3.3 Nachbearbeitung und Druck

Die mit dem Slicer erstellte Datei, wird nachher an den Drucker übergeben und dieser druckt das gewünschte Modell aus. Während des Drucks kann man je nach verwendetem Drucker noch einige Parameter nachjustieren. Bei einem Ultimaker kann man beispielsweise mit einer Override- Funktion den gesamten Druckprozess verlangsamen. Dies empfiehlt sich zu Beispiel am Anfang eines FDM- Drucks da hier die kritische Phase eines jeden FDM- Drucks stattfindet. Wie lange der Druck noch dauert und ähnliche Werte sind sehr oft auf den Prozess- Displays der Drucker ablesbar. Moderne Drucker besitzen auch schon einiges an Prozess- Sensorik, mit der man feststellen kann, ob das Filament noch zugeführt wird oder das Modell noch in richtiger Form gedruckt wird. Dies sind sehr nützvolle Tools, um Fehldrucke, die immer wieder vorkommen können, weitestgehend zu vermeiden.

Nachdem der Druck erfolgreich fertiggestellt ist, muss ein additiv gefertigtes Teil zumeist einer Nachbehandlung unterzogen werden. FDM- Druckerzeugnisse müssen zuerst von Build- Plattform gelöst werden und gegebenenfalls von Stützmaterial befreit werden. Produkte, welche mit DLP oder SLA Verfahren hergestellt wurden, müssen zuerst von der Druckplattform gelöst werden. Danach müssen diese in einer alkoholischen Lösung gewaschen werden. Zumeist wird hierfür Isopropanol verwendet, es gibt dafür auch Alternativen. Es gibt auch wasserlösliche Resin- Typen, die lediglich mit Wasser abgewaschen werden müssen. Was die DLP und SLA Erzeugnisse jedoch gemeinsam haben, ist, dass diese eine definierte Zeit mit UV- Licht nachbestrahlt werden müssen. Hierfür benötigt man zumeist eine weitere Anlage, wo das durchgeführt werden kann. Bauteile, welche mit dem SLS- Druckverfahren hergestellt sind, müssen nachträglich von Pulverrückständen im Inneren und Äußeren befreit werden. Das überschüssige Pulver wird zumeist mit einer Saugvorrichtung entfernt. Als abschließendes Finishing werden die Teile sehr oft mit Gleitschleifern oder Strahlanlagen nachbehandelt, damit die Oberfläche möglichst qualitativ wird.

Nachdem die einzelnen nötigen Arbeitsschritte für die Herstellung eines 3D Modelles im 3D Drucker kompakt in diesem Abschnitt zusammengefasst wurden, wird im nächsten Abschnitt auf bereits existierende Aktor- und Sensorelemente eingegangen und dargestellt.

## 2.4 Geeignete Sensoren für 3D- Druck Robotergreifer

Nach dem heutigen Stand der Technik sind Sensoren, die mit dem 3D Drucker hergestellt sind durchaus denkbar. Gute Beispiele hierfür werden von führenden Industriefirmen in der Automatisierungstechnik nachfolgend dargestellt und beschrieben. Generell wird hierbei versucht den typischen Sensor, wie zum Beispiel einen normalen Endschalter, neu zu denken und diesen aus seinem Gehäuse herauszubekommen und die Funktionselemente in die Anwendung selbst zu integrieren.

Besonders bei Endeffektoren ist es wichtig, dass die benötigten Sensoren möglichst kompakt und praktisch anzubringen sind. Meist wird als Sensor eine simple Bauteilerkennung benötigt. Je direkter diese Bauteilerkennung gestaltet ist, desto zuverlässiger funktioniert der Prozess, zum Beispiel eine Pick- and Place- Anwendung. Jedoch sind Robotergreifer meist so designt, sodass diese das Bauteil indirekt erkennen, beispielsweise über die Aktorenstellung. Zumeist werden aus Kostengründen diese Aktoren-Überwachungen verfolgt, da diese meist immer nur einen simplen Reed erfordern. Diese sind sehr robust und simpel in die Steuerung einzubinden. Optische Lösungen wie Lichttaster oder Faseroptiken werden daher aus Preisgründen vermieden. Da Robotergreifer nach wie vor in der Industrie noch immer konventionell hergestellt werden, ist es mit einigem Fertigungsaufwand verbunden kleine Sensoren, wie Miniatur- Endschalter, in die Greiferfinger zu integrieren.

### 2.4.1 Verschleißsensor Firma Igus

Ein gutes Beispiel für additiv gefertigte Sensorik kommt von der Firma Igus aus Köln. Diese Firma beschäftigt sich schon seit Jahrzehnten mit dem Thema Kunststoff. In dieser Firma werden beispielsweise Kunststoffherzeugnisse wie Energieführungsketten oder Gleitlager aus Teflon hergestellt. So war es für das Unternehmen kein großer Schritt zur additiven Fertigung von Kunststoffen, welche unter anderem auch als Lohnfertigung angeboten wird. Da wartungsfreie Gleitlager aus Kunststoff verschleissen und daher einem gewissen Wartungsintervall unterliegen, werden diese in industriellen Betrieben immer vor dem theoretischen Ausfall des Bauteils ausgetauscht. Daher kommt es auch logischerweise dazu, dass nicht verschlissene Lager verfrüht gewechselt werden, da der Zustand dessen logischerweise nicht vor Ausbau beurteilt werden kann. Aus diesem Grund hat man sich hier eine spezielle Lösung ausgedacht. Und zwar hat man das Gleitlager und den Sensor in einem Fertigungsschritt produziert.

Hier wird mithilfe des Multimaterialdrucks ein intelligentes 3D Druckbauteil hergestellt. Die nachfolgende Beschreibung bezieht sich auf ein IGUS Gleitlager mit integrierter Sensorik. Zurzeit stehen hier zwei Konzepte bezüglich der Funktionalität zur Verfügung: Beim ersten Konzept befindet sich zwischen den verschleißbehafteten Schichten ein elektrisch leitfähiges Material, welches bei Überlastung durch die Deformation durchschaltet und so die Information an die Steuerung weitergeben kann. Das Lager muss dafür während der Konstruktionsphase entsprechend kalibriert sein. Das zweite Konzept sieht vor, dass die elektrische Leiterbahn in der Gleitfläche eingearbeitet ist. So ist der Verschleiß über die Änderung der elektrischen Eigenschaften messbar. Das dritte Konzept sieht vor mehrere elektrische Schichten nach außen hin anzuordnen. So ist man in der Lage schon im Vorserienstadium verbesserte Auskunft über die

tatsächlichen Belastungsdaten zu erhalten.<sup>59</sup> Ein solches Gleitlager mit Verschleiß- Sensorik ist nachfolgend dargestellt. Hierbei sind die elektrischen Anschlüsse als Gewindeeinsätze realisiert. Wenn das Gewinde verschleißt, werden die Kontakte über die elektrisch leitfähigen Schichten im Bauteil kurzgeschlossen. Dieses Signal kann weiterfolgend in einer Steuerung entsprechend verwendet werden.



Abb. 39: Verschleißsensor von igus, Quelle: igus GmbH, Online-Quelle [10.Juli.2021].

## 2.4.2 DMS Sensoren aus dem 3D Drucker

Dehnungsmessstreifen sind seit vielen Jahren in der Messtechnik und Automatisierungstechnik in Verwendung. Die konventionelle Lösung ist ein Klebesensor, welcher auf eine Oberfläche geklebt wird. Für diesen Fertigungsschritt braucht es sehr viel Erfahrung und es ist wichtig, dass hier sehr sauber und akkurat vorgegangen wird. Nur dies garantiert zuverlässige Messwerte. Zusammenfassend kann man sagen, dass die Installationsprozedur eines solchen Sensors in den meisten Fällen sehr aufwändig ist. Sollte die Positionierung des Sensors nicht passen, kann man diesen leider nicht mehr zerstörungsfrei ablösen. Aufgebracht wird ein DMS mit Mitteln, die in der industriellen Klebtechnik eingesetzt werden. Das Aushärten erfolgt dann meist in Öfen, wenn das Grundmaterial dies zulässt. Ansonsten muss ein sogenanntes Kaltklebverfahren angewandt werden, welches aber durch die höhere Toleranz der Klebeschicht ungenauer ist. Diese Toleranz beeinflusst den Messprozess erheblich und erschwert die Kalibrierung. Grundsätzlich hat sich das Funktionsprinzip über die Jahre, trotz einiger Weiterentwicklungen, kaum verändert: Durch Krafteinwirkung von außen verformt sich der Dehnmessstreifen. Dabei ändert sich sowohl Länge als auch der Querschnitt des DMS. Daher ändert sich dann auch die elektrischen Eigenschaften, wie der messbare Widerstand in Ohm.<sup>60</sup>

Das Fraunhofer Institut für Lasertechnik ILT und die Firma i4M Technologies GmbH haben sich diesem Problem angenommen und haben eine Lösung, welche mit einem 3D Drucker gefertigt werden kann, entwickelt. Bei konventionellen DMS ist das Messgitter auf 2 vorhergehenden Schichten angebracht: Die Klebungsschicht und eine Trägerfolie sind hier vor dem eigentlichen Messelement. Daher muss die Dehnungsübertragung über diese 2 Schichten übertragen werden, was das Ansprechverhalten des DMS negativ beeinflussen kann. Bei der neu entwickelten Technik via additive Fertigung wird auf diese Klebeschicht gänzlich verzichtet, da diese hierbei nicht benötigt wird. Es ist nur eine kleine Zwischenschicht als Isolation und Kraftübertragung notwendig, die durch direkte Auftragung mittels des Druckverfahren

---

<sup>59</sup> Vgl. Large (2021), Online-Quelle [10.Juli.2021].

<sup>60</sup> Vgl. Rehberger/Noll (2020), S. 46.

aufgetragen wird. Dies kann man sich wie bei einem Tintenstrahldruck vorstellen. Das Herstellungsverfahren für den direkt gedruckten DMS selbst, ist möglichst digital, inlinenfähig und robust gegen störende Einflüsse. Auch auf die geringstmöglichen Fertigungskosten pro Stück wurde Wert gelegt. Vorbereitend muss das zu bedruckende Werkstück, mittels einer Laserreinigung von Fremdstoffen gründlich gereinigt werden. Ebenfalls wird im gleichen Zug, mittels einer gepulsten Laserstrahlung, die Oberfläche angeraut, um die Anhaftung für die erste Schicht zu erhöhen. Dann wird mittels Dispenser und Inkjet- Drucker das Material entsprechend auf die Messstellen angebracht. Als Nachbehandlung dient eine Lichtquelle, die die Druckstellen effizient mit Energie versorgen, ohne, dass das Bauteil selbst unnötig erwärmt wird. Das elektrische Isolationsmaterial bildet ein Hybridpolymer, zum Beispiel das vom Fraunhofer ISC entwickelte ORMOCER, welches durch Dispensen aufgetragen wird. Die Kinematik des Druckkopfes übernimmt hier eine hochpräzise CNC- Steuerung, wie bei handelsüblichen Werkzeugmaschinen. Die Aushärtung des Hybridpolymers wird durch eine Lichtquelle im Anschluss realisiert. Das Sensormessgitter erfolgt über einen Tintenstrahldruck mit Metalltinten, die Nano- Partikel enthalten. Diese kann hochauflösend auf die Isolationsschicht aufgetragen werden und dabei werden keine Schablonen oder Ätzverfahren benötigt. Da die Metalltinte nach dem Auftrag noch nicht leitfähig ist, müssen die Lösungsmittel und andere Hilfsmittel verdampft werden, damit die Metallpartikel miteinander versintert werden können. Hierzu ist der Nachbehandlungsschritt des Lasersinterns sehr geeignet und wird auch für diese thermische Nachbehandlung verwendet. Zum Schluss wird das Bauteil verkapselt und schützt das Messelement weitestgehend vor Umwelteinflüssen.<sup>61</sup>

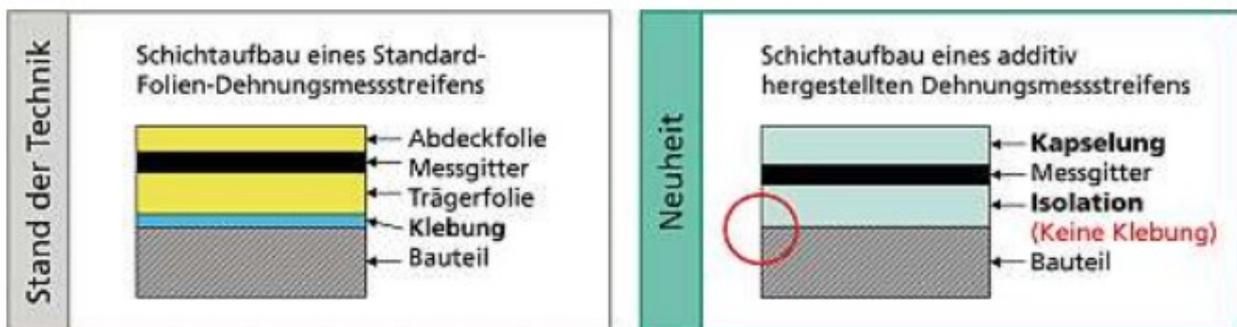


Abb. 40: Additiver DMS- Schichtaufbau im Vergleich zu konventionellem Sensor, Quelle: Rehberger/Noll (2020), S. 47.

<sup>61</sup> Vgl. Rehberger/Noll (2020), S. 47f.

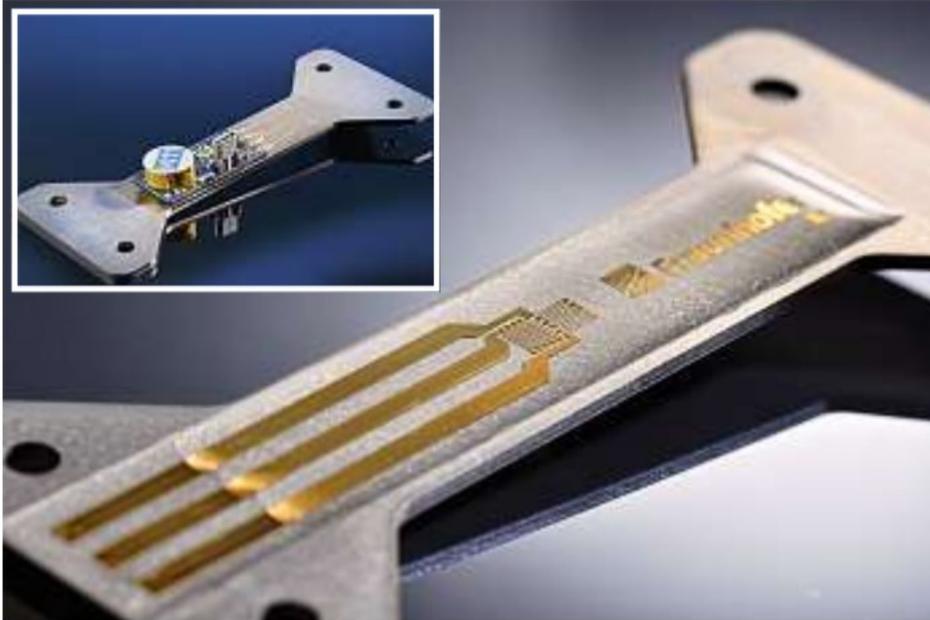


Abb. 41: Additiv hergestellter DMS auf Metallbauteil, Quelle: Rehberger/Noll (2020), S. 48.

### 2.4.3 Dünnschicht- Drucksensoren

Eine gute Möglichkeit zu überwachen, ob der Robotergreifer das Bauteil gegriffen hat, sind Dünnschicht-Drucksensoren. Sie sind günstig zu erwerben und sind in kompakten Baugrößen erhältlich. Somit lassen sich solche Sensoren sehr gut in Greiferfinger integrieren, wenn diese entsprechend eingebettet werden können.

Bei derartigen Sensoren handelt es sich um Dehnmessstreifensensoren, welcher die Verformung des Dehnmessstreifens in ein messbares Spannungssignal umwandelt. Die Messgröße steht dann wiederum in Bezug zu einer bestimmten Kraft oder Druck. Im Gegensatz zu üblichen Kraftsensoren oder Wägezellen, wo ebenfalls mit Dehnmessstreifen gearbeitet wird, sind die Dünnschicht- Drucksensoren mit Metallfolien-Dehnmessstreifen ausgestattet. Diese erlauben eine sehr dünne Bauweise. Metallfolienwiderstände werden mithilfe Fotoätztechnik hergestellt und in ein Trägermaterial aus Kunststoff eingebettet.<sup>62</sup>

Zu den Vorteilen der Sensoren zählen unter anderem, dass sie kleine Nenndrücke realisieren können, sehr klein gebaut werden können und sehr Langzeitstabil sind. Dieser Sensoren- Typ ist auch sehr temperaturunabhängig und feuchtbeständig. Zu den Nachteilen zählt, dass Dünnschichtsensoren auf eine komplizierte Technologie zurückgreift und eine gute Prozesskenntnis benötigt. Die Anbringung und Handhabung des Sensorelementes birgt zudem einiges an Vorrichtungsaufwand.<sup>63</sup>

---

<sup>62</sup> Vgl. Tränkler/Reindl (2015), S. 438.

<sup>63</sup> Vgl. Tränkler/Reindl (2015), S. 449f.

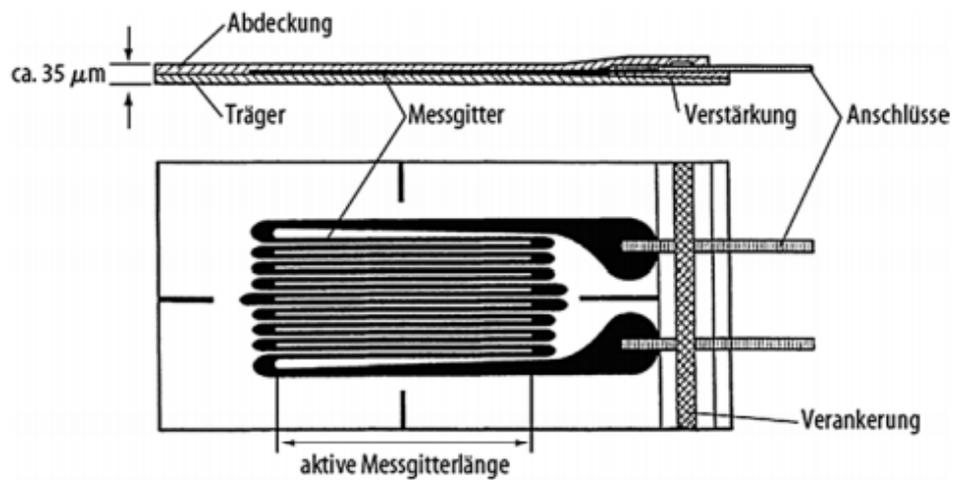


Abb. 42: Aufbau eines Metallfolien DMS, Quelle: Tränkler/Reindl (2015), S. 439.

Der nachfolgend abgebildete Sensor funktioniert via analoger Erkennung des Widerstands, wenn eine Kraft von außen auf den Sensor einwirkt. Der Widerstand verändert sich analog zum Druck von außen. Der Sensor ist wasserdicht, flexibel und hochempfindlich. Dieser Sensor hat eine angegebene Lebensdauer von ca. 1 000 000 Zyklen. Ausgelesen werden kann dieser Sensor zum Beispiel mit einem Arduino- Board (Mikrocontroller) oder einem Raspberry- Pi (Einplatinen- PC).<sup>64</sup>

Dieser Sensor muss mit einem Analog- Digital- Converter ausgelesen werden und das Signal entsprechend an die Steuerung übergeben. Als Converter kann zum Beispiel ein Arduino Board verwendet werden, welches bei einer definierten Kraft das Signal an die Robotersteuerung übergibt, wie zum Beispiel ein ganz normaler Endschalter. In Verbindung mit einem Kinematik- Greifer mit Hebelmechanismen kann hiermit die richtige Stellung beim Greifen des Werkstückes mitüberwacht werden.



Abb. 43: Dünnschicht- Drucksensor für Robotik, Quelle: Joy-IT (2020), Online-Quelle [11.Juli.2021].

<sup>64</sup> Vgl. Joy-IT (2020), Online-Quelle [11.Juli.2021].

## 2.5 Geeignete Aktoren für 3D- Druck Robotergreifer

Das Thema rund um die generative Fertigung ist nun schon länger als ein Jahrzehnt in Verwendung. In der Zwischenzeit gibt es daher schon einige Lösungen bezüglich Robotergreifer- Aktoren, welche additiv hergestellt wurden. Dieser Abschnitt beschäftigt sich nun mit diesem Thema und bringt einige interessante Lösungen zu Tage, welche auch für eine weitere Umsetzung im Laufe der Arbeit sehr ansprechend sind.

### 2.5.1 Faltenbalg gedruckt

Mit dem gedruckten Faltenbalg wird eine verbreitete Technologie, die bereits im letzten Jahrhundert schon in Verwendung war, für additiv hergestellte Robotergreifer verwendet. Genau diese Geometrie, die des Faltenbalges, hat sich das Fraunhofer Institut IPA zu Nutze gemacht und als Aktor in einen Robotergreifer integriert. Der Clou an der Geschichte ist, dass dieser Greifer aus einem einzigen Material in einem Guss gefertigt wurde. Dieses System wurde bereits Mitte der 2000er Jahre patentiert und in Deutschland, USA und Japan steht dieser Greifer immer noch unter Patentschutz.

Demnach hat dieser Robotergreifer einen Befestigungsflansch mit einer lösbaren Verbindung zum Manipulatorflansch. Das Aktorelement stützt sich am Rahmen des Greifers ab und hat wenigstens zwei oder mehr Backen. Die Backen sind über Filmgelenke gelagert und können dadurch die kinematische Bewegung ausführen.<sup>65</sup>

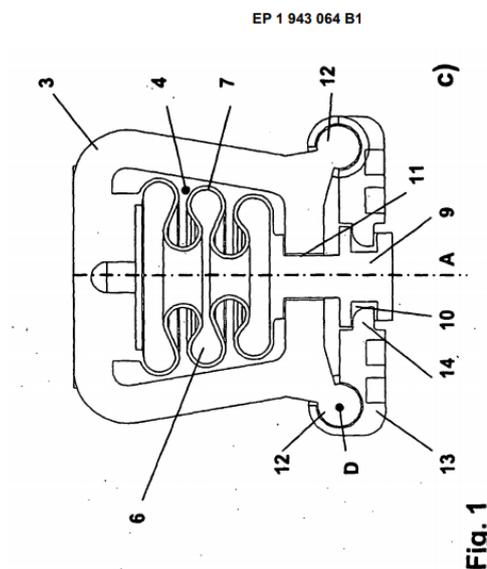


Abb. 44: Gedruckter Faltenbalg Fraunhofer, Quelle: Becker/Grzesiak (2006), EP1943064B1.

Dieses Patent liefert eine gute Vorlage, um einen Pneumatikzylinder- Ersatz mit dem 3D- Drucker herzustellen.

<sup>65</sup> Vgl. Becker/Grzesiak (2006), EP1943064B1, S. 6.

## 2.5.2 Pneumatische Standard- Aktoren

Dabei handelt es sich um pneumatische Antriebe, die in genormten Unterkategorien erhältlich sind.

Darunter gibt es einfachwirkende Zylinder als auch doppelwirkende Zylinder, welche eine lineare Bewegung ausführen können. Es gibt auch Aktoren, die eine Drehbewegung ausführen können: Luftmotor, Drehzylinder und Schwenkantrieb.<sup>66</sup>

Besonders geeignet für die Integration in gedruckte Robotergreifer, werden die lineare pneumatische Aktoren qualifiziert, da diese über eine hohe Kraftdichte verfügen und sich gut in ein 3D gedrucktes Teil einbauen lassen. Darunter fallen lineare Pneumatikzylinder als auch fluidische Muskel. Dabei gibt es Zylinderserien von den verschiedenen Herstellern, welche sehr kompakt gebaut werden. Bei dieser Recherche werden verschiedene Hersteller berücksichtigt.

### Kompakte quaderförmige Zylinder:

- CUJ-, CQU-, CQS- Serie von Fa. SMC
- ADN-, AND-S-, AEN-S- Serie von Fa. Festo

Diese Zylinder sind auf sehr kompakte Weise gebaut, wobei die Kolbengröße von 4 mm bis 20 mm und mehr reichen kann. Die Hübe der Zylinder gibt es je nach Typ wahlweise zwischen 5 mm und 100 mm. Die Zylinder gibt es je nach Typ in einfachwirkender oder doppeltwirkender Ausführung. Diese Zylinder werden meist so eingebaut, sodass der Zylinderkörper fix mit der Baugruppe verbunden ist.

### Rundzylinder:

- DSNU-, ESNU- Serie von Fa. Festo
- C85-, CDM3- Serie von Fa. SMC

Diese Zylinder, welche teils auch genormt sind, reichen von einer Kolbendurchmesser- Bandbreite von 8 mm bis zu 63 mm. Die Hübe gibt es standardmäßig bis zu 500 mm, bei Bedarf kann auch ein längerer Hub (z.B. DSNU) angefragt werden. Diese Serien sind durch Reed- Kontaktschalter direkt am Kolben abfragbar. Das besondere an diesen Zylindern ist die runde Bauform im Querschnitt. Das macht die Zylinder besonders attraktiv im Einsatz als verlängerbare Pendelstütze in einer beweglichen Baugruppe.

### Pneumatische Muskeln:

Im Wesentlichen ist der „Fluidic Muscle“ ein Membran- Kontraktions- System. Dieser besteht aus 2 grundlegenden Elementen: ein fluidisch dichter und flexibler Schlauch, der von einer Struktur mit festen Fasern, meist in Rautenform“ umspannt wird. Bei einströmender Druckluft wird der flexible Schlauch aufgebläht und wird dadurch kürzer. Die feste Struktur stützt dabei den flexiblen Schlauch. Mit zunehmenden Innendruck wird eine Zugkraft in Axialrichtung bewirkt. Der Muskel bringt im betätigten Zustand etwa zehnmal mehr Kraft als ein vergleichbarer konventioneller Zylinder und verbraucht dabei

---

<sup>66</sup> Vgl. Ebel/Idler/Prede/Scholz (2014), S. 43.

etwa vierzig Prozent weniger Energie. Bei gleicher Kraft reicht somit etwa ein Drittel des Durchmessers im Verhältnis zu einem normalen Pneumatikzylinder.<sup>67</sup>

Zu den Vorteilen dieses Antriebes zählen die absolute Dichtheit, das Fehlen des Stick- Slip- Effektes und die sanfte Bewegungsnatur des Aktors. Die nichtlineare Natur des Aktors aber erschwert die präzise Steuerung derartiger Antriebe. Deswegen ist es wichtig alle Abhängigkeiten und grundlegenden Parameter dieser Muskeln zu kennen. Zu diesen zählen: beaufschlagter Innendruck, Kraft und Kontraktionsgrad.<sup>68</sup>

Charakterisierung eines pneumatischen Muskels:

Der Verlauf des beaufschlagten Druckes und die einhergehende Kontraktion des Muskels ist nicht linear. Die nachfolgende Abbildung zeigt diesen Verlauf am Beispiel der DMSP-5-100N Serie von Festo. Hierbei sind die verschiedenen Drücke auf der rechten Bildseite dargestellt und der Graph mit dem entsprechenden Verlauf auf der linken Seite. Die horizontale Achse (h) gibt die Kontraktion in Bezug auf die Ausgangslänge an, die vertikale Achse gibt die erreichte Kraft an.

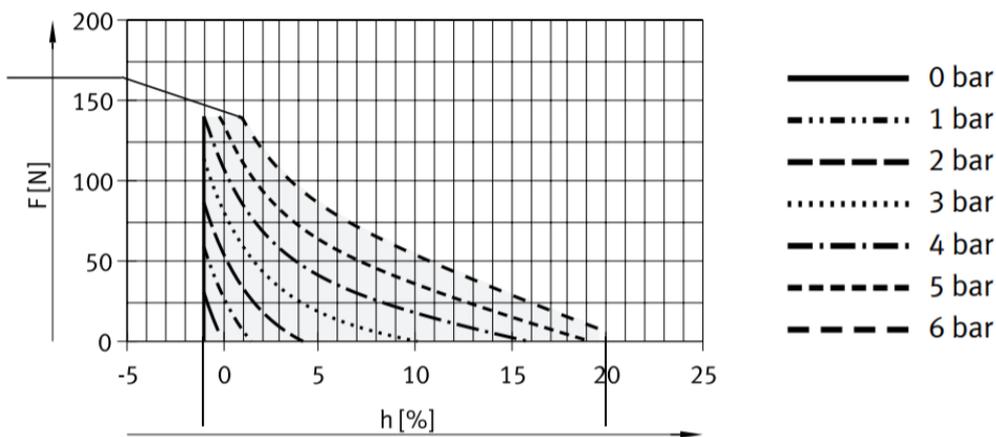


Abb. 45: Kraft- Kontraktionsverlauf des DMSP-5-100N, Quelle: Festo Ges.m..b.H. (2019), Online-Quelle [29.August.2021], S. 14.



Abb. 46: Bauformen Fluidic Muscle von Festo, Quelle: Ebel/Idler/Prede/Scholz (2014), S. 45.

<sup>67</sup> Vgl. Ebel/Idler/Prede/Scholz (2014), S. 45.

<sup>68</sup> Vgl. Pietrala (2017), Online-Quelle [29.August.2021], S. 5f.

Die DMSP- Serie von Festo sollte immer vorgereckt werden (mit ca. 0,5 bar) und diese gibt es mit Innendurchmessern von 5 mm bis 40 mm. Mit den verfügbaren Nennlängen ergibt sich eine Bandbreite von 30 mm bis 9000 mm. Die maximal zulässige Kontraktion bewegt sich zwischen 20 und 25 Prozent.

### 2.5.3 Soft- Robotics- Elemente

In der Soft- Robotic werden vorwiegend weiche und flexible Materialien verwendet. Diese sind so konstruiert, dass wenn diese zum Beispiel mit Druckluft beaufschlagt werden, die Gestalt so ändern, damit ein Objekt gegriffen werden kann.

#### Definition Soft Robotic:

Softroboter sind Robotersysteme, bei denen gezielt nachgiebige Elemente in ihre mechanische Struktur eingebettet sind<sup>69</sup>.

Soft Robotic bietet generell sehr hohe Flexibilität bezüglich Bedingungen aus der Umwelt und bieten mehr Sicherheit, wenn Menschen mit solchen Elementen interagieren<sup>70</sup>. Aus diesem Grund ist dieses Thema sehr aktuell und wird von vielen Wissenschaftlern weltweit untersucht. Druckluft ist neben mechanischer Betätigung, die meistgenutzte Energie für das Betätigen von Soft Robotic Elementen<sup>71</sup>.

Die nachfolgende Abb. 47 zeigt wie eine mechanische Betätigung aussehen kann. Hierbei sind die Soft Robotic Elemente nicht die aktiven Elemente, sondern werden mechanisch von einer Schnur betätigt. Die mechanische Betätigung führen hierbei kleine DC- Motoren mit Seilrollenfunktion aus. Dabei sind die Greiferfinger so ausgeführt, dass diese weichere Gelenkstellen besitzen und steife Elemente, um eine Greifkraft produzieren zu können.

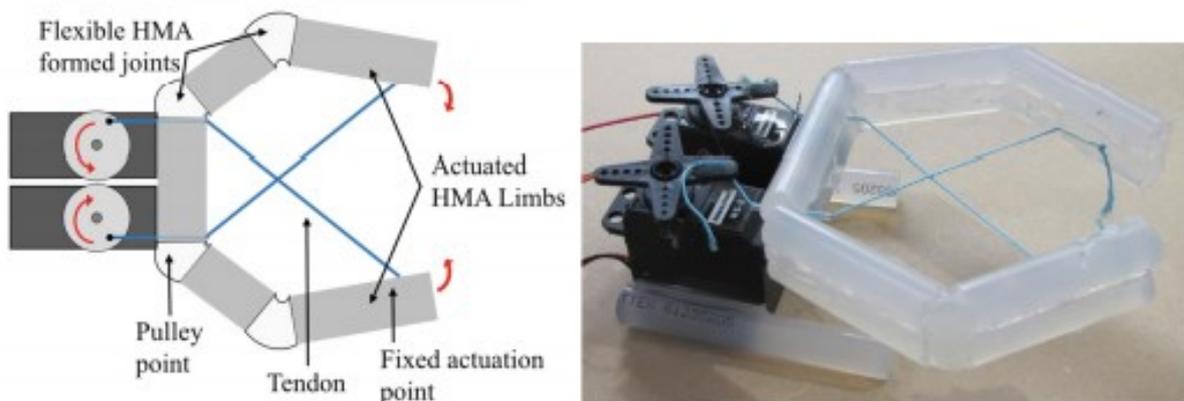


Abb. 47: Mechanisch betätigter Soft Robotic Greifer, Quelle: Laschi/Rossiter/Iida/Cianchetti/Margheri (2017), S. 90.

---

<sup>69</sup> Vgl. Della Santina (2021), Online-Quelle [12.August.2021], S. 1.

<sup>70</sup> Vgl. Fras (2016), Online-Quelle [17.August.2021], S. 1.

<sup>71</sup> Vgl. Laschi/Rossiter/Iida/Cianchetti/Margheri (2017), S. 29.

Eine pneumatische Betätigung sieht vor, dass der Greiferfinger aktiv so verformt wird, sodass dieser gezielt verformt wird. Durch diese Verformung soll ein Greifobjekt dann form- oder kraftschlüssig gegriffen werden. Wie so eine gezielte Verformung aussehen kann, zeigt die folgende Darstellung.

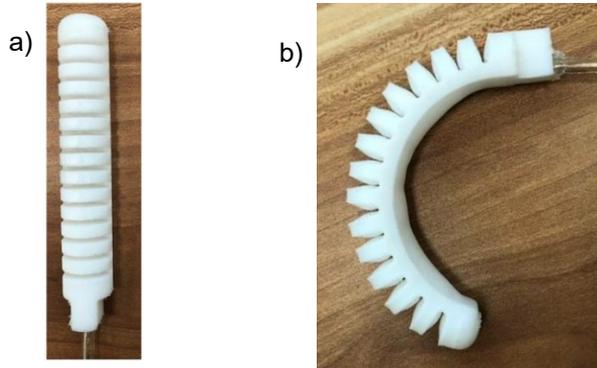


Abb. 48: Pneumatisch betätigter Soft Robotic Greiferfinger, Quelle: Salem/Wang/Wen/Xiang (2018), Online-Quelle [17.August.2021], S. 7f. (leicht modifiziert)

(a) zeigt dabei den Ausgangszustand an und (b) den aktiven Zustand mit beaufschlagter Druckluft.

Diese Greifersysteme bestehen zumeist aus mehreren Fingern, um funktionieren zu können. Dabei können die Finger asymmetrisch oder symmetrisch um das zu greifende Objekt angeordnet sein. Die Finger können dabei individuell oder unabhängig voneinander ansteuerbar sein. Diese Finger sind grundsätzlich an einem Ende mit dem Greiferkörper verbunden.

Die Charakterisierung und Vorhersage wie sich so ein Soft- Element verhält, ist mit konventionellen mathematischen Mitteln herausfordernd vorherzusagen. Daher wurde für den dargestellten Finger die Finite Elemente Methode angewandt. Dabei wurde in der Simulation der Druck auf alle Flächen im inneren des Greiferfingers definiert und das Ende des Greiferfingers ist dabei fixiert. Der Druck ist mit maximal 5 bar festgelegt. Für die Vernetzung des Modelles wurde ein Hybrid Quadrat- Tetraeder- Element gewählt. Mit diesem ist das gesamte Modell vernetzt.<sup>72</sup>

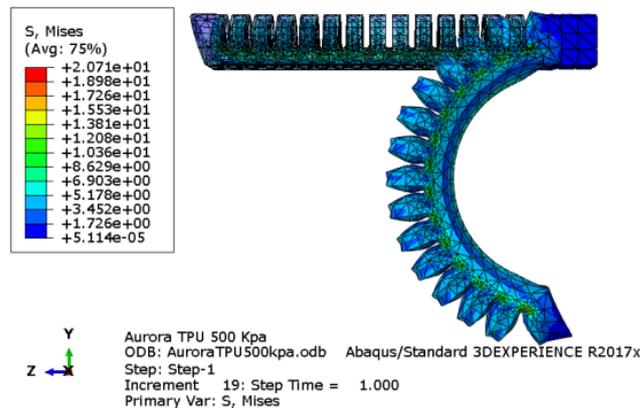


Abb. 49: FE- Simulation Soft- Greiferfinger, Quelle: Salem/Wang/Wen/Xiang (2018), Online-Quelle [17.August.2021], S. 7.

<sup>72</sup> Vgl. Salem/Wang/Wen/Xiang (2018), Online-Quelle [17.August.2021], S. 7f.

3D Druck Lösungen derartiger Greiferfinger wurden bereits mit TPU im FFF- Druck<sup>73</sup> und mit TPU92A-1 im SLS- Druck<sup>74</sup> realisiert.

Passend zum Thema wird folgender Begriff erklärt, der später in den Teillösungen noch wichtig wird: Der Memory- Effekt. Dabei handelt es sich um die bleibende Verformung, die sich mit fortschreitender Zyklenzahl von Bewegungen einstellt. Damit ist gemeint, dass sich zum Beispiel der oben gezeigte Soft-Robotic- Greiferfinger nach einer gewissen Anzahl von Druckbeaufschlagungen nicht mehr ganz in die Ausgangsstellung zurückformt.

Im Zusammenhang mit MRK- Lösungen sind solche Lösungen sehr beliebt. Während konventionelle Greifer oft aus Stahl und Aluminium hergestellt sind, nutzen diese Greifer sehr weiche Elastomere und andere ähnliche Kunststoffe. Deswegen sind Soft- Gripper hinsichtlich sicherheitstechnischer Aspekte besser einsetzbar, sollten diese in Verbindung mit einem Cobot mit einem Menschen interagieren.



Abb. 50: Soft- Gripper am Cobot montiert, Quelle: Universal Robots A/S (2021), Online-Quelle [8.Oktober.2021].

Im nächsten Abschnitt wird kompakt erklärt, wie solche 3D- Druckerzeugnisse hergestellt werden können. Dabei wird dem Leser nähergebracht, wie bei der Entwicklung und nachfolgender Umsetzung bei additiv gefertigten Erzeugnissen idealerweise vorgeht. Hierbei gibt es je nach Verfahren oder Produkthanforderung einiges zu beachten.

---

<sup>73</sup> Vgl. Salem/Wang/Wen/Xiang (2018), Online-Quelle [17.August.2021], S. 7.

<sup>74</sup> Vgl. Laschi/Rossiter/Iida/Cianchetti/Margheri (2017), S. 26.

### 3 ENTWICKLUNGSMETHODIK FÜR DEN 3D DRUCK

Der 3D Druck bietet Konstrukteuren um einiges mehr Freiheiten, da im Unterschied zu herkömmlichen Fertigungsmethoden, die Produkte werkzeuglos frei geformt werden können. Doch existieren auch mit diesem Verfahren Restriktionen, welche im Designprozess beachtet werden müssen. Es soll auch bei Produkten, welche additiv hergestellt werden, so designt werden, dass es vorteilhaft für die jeweilige verwendete Maschine ist. So können die jeweiligen Vorteile der Fertigungsmaschinen optimal genutzt werden. Grundsätzlich beachtet werden muss auch das Thema der Fertigungstoleranzen – die Toleranzen müssen bereits im CAD während des Produktdesigns berücksichtigt werden. Das ist der Tatsache geschuldet, dass direkt mit den CAD- Daten die Produkte produziert werden. Somit liegt die hauptsächliche Verantwortung, der richtigen Auslegung der Teile, bei den Abteilungen der Konstruktion oder Entwicklung und weniger im Bereich der Prozessoptimierung.<sup>75</sup>

#### 3.1 Entwurf

Um den Mehrwert der Additiven Fertigung optimal nutzen zu können müssen einige Ansätze gebündelt werden. Dazu werden laut Lippert und Lachmayr folgende Gestaltungsziele definiert: Das Gestaltungsziel dient dabei der grundlegenden Richtung für die Entwicklung der additiv gefertigten Bauteile. Welches der Ziele im Speziellen verfolgt wird hängt von der Anwendung ab. Es können auch Gestaltungsziele kombiniert werden, wenn das dem Produkt dienlich ist.<sup>76</sup> Die folgende Tabelle ist in Anlehnung von Lachmayr dargestellt.

Nr.	Gestaltungsziel	Beschreibung
1	Materialersparnis	Ziel ist das Reduzieren des Materialaufwandes, sowie Ressourceneinsparung durch Erhöhung der Materialausnutzung
2	Funktionsintegration	So viele Bauteile wie möglich werden eingespart bei gleichzeitiger größtmöglicher Umsetzung von Funktionen
3	Dünnwandigkeit	Geometrien werden dünnwandig und filigran ausgeführt, um die Reduzierung des Gewichtes zu erreichen
4	Kraftfluss- Anpassung	Material ist optimal angeordnet, um die einwirkenden Kräfte bei minimalen Materialaufwand aufnehmen zu können
5	Integrierte Kanäle	Notwendige Kanäle für die Führung von Medien, wie Flüssigkeiten oder Kabel, werden in das Innere des Bauteils verlegt
6	Mass Customization	Bauteile werden spezifisch an den Kunden angepasst und der Kunde wird in den Produktentwicklungsprozess miteinbezogen
7	Design	Freiformflächen werden forciert damit Aspekte wie Ergonomie und Nutzbarkeit des Bauteils positiv beeinflusst werden

<sup>75</sup> Vgl. Breuninger/Becker/Wolf/Rommel/Verl (2013), S. 43.

<sup>76</sup> Vgl. Lachmayer/Lippert/Kaierle (2019), S. 3.

<b>8</b>	Net- Shape Geometrien	Es werden von den Simulationen errechneten Netzmodelle übernommen und bilden die Basis für das Design
<b>9</b>	Lokale Eigenschaftsanpassung	Lokale Einstellung der Eigenschaften eines Voxels (dreidimensionaler Pixel) durch Materialgradierung oder Parametervariation
<b>10</b>	Innere Effekte	Beispielsweise Integration von aktorischen und sensorischen Elementen

Tabelle 4: Gestaltungsziele für Additive Fertigung, Quelle: Eigene Darstellung.

Die oben abgebildete Gliederung zeigt auf welche Gebiete man sich in der Produktentwicklung eines additiv gefertigten Teils konzentrieren kann. Je nach Anwendungsfall können die Gestaltungsziele auch untereinander kombiniert werden und dadurch die verschiedenen Vorteile erzielt werden.

Im Falle eines additiv gefertigten Robotergreifers können zum Beispiel folgende Gestaltungsziele forciert werden:

- Materialersparnis, um möglichst wenig Masse am Manipulator zu haben
- Funktionsintegration, um den Greifer aus möglichst wenigen Teilen zu erhalten
- Integrierte Kanäle, um die Energieführung und Sensorbahnen in den Greifer zu integrieren
- Innere Effekte, um externe Sensoren und Aktoren einzusparen und direkt zu integrieren

Als erstes muss man alle Daten des zu greifenden Objektes einholen, um den Designprozess zu starten. Diese Daten sollten die physikalischen Bedingungen wie Geometrie des Objektes, Material und Masse des Objektes enthalten. Wenn man diese Daten erhalten hat, ist man in der Lage einen ersten Entwurf eines entsprechenden Greifers zu erstellen. Beim ersten Entwurf muss zu erkennen sein mit welcher Methodik das Objekt gegriffen wird, wie die Aktorik aussieht und wie das gegriffene Bauteil sensorisch detektiert wird. Die Proportionen und die generelle Topologie können sich im Verlaufe des Design- Prozesses noch um einiges verändern. Der erste Entwurf muss keinesfalls im CAD- System umgesetzt werden, jedoch braucht man spätestens bei der Auslegung des Greifers ein digitales Modell um Tools wie Topologie- Optimierung oder FEM- Analyse nutzen können. Daher lohnt es sich in vielen Fällen schon früh mit einem digitalen Modell zu starten.

### 3.2 Auslegung

Nachdem der erste Entwurf erledigt ist, muss man sich um die Auslegung kümmern. Schließlich sollte der Effektor auch der Belastung im Einsatz gewachsen sein. Spätestens in diesem Schritt sollten alle physikalischen Daten des Greifobjektes vorliegen, um sinnvolle Simulationsergebnisse zu erhalten. Weiters muss in diesem Schritt ein digitales Modell existieren, um überhaupt eine Simulation starten zu können. Das nachfolgende Modell wird zunächst mit einer statisch- mechanischen Simulation auf die einzelnen Aspekte geprüft:

- Reicht die Kraft des Aktors aus, um die vorgesehene Bewegung auszuführen (Filmscharnier)?
- Hält der Aktor dem beaufschlagten Druck stand?
- Hält die eingebettete Feder den Belastungen stand?
- Ist der strukturelle Aufbau fähig den Belastungen standzuhalten?

Wenn diese Aspekte analysiert sind und die Ergebnisse entsprechend den Anforderungen genügen, kann man den Aspekt der Materialersparnis genauer beleuchten. Das ideale Werkzeug hierzu wäre eine Topologie- Optimierung. Diese sind in den marktführenden CAD- Systemen und Simulationssystemen bereits enthalten und können für solche Anwendungen genutzt werden. Das Ergebnis der Topologie- Analyse liefert je nach vorheriger Parametrierung ein Schaubild, welches Material erforderlich ist, um den Belastungen standhalten zu können und welches Material entfernt werden kann. Diese Ergebnisse kann man dann in das eigentliche Modell einarbeiten und erhält somit ein gewichtsoptimiertes Modell. Eine interessante Frage ist oft wie dünnwandig ein Bauteil gestaltet sein kann. Diese Fragestellung hängt sehr vom eingesetzten Verfahren ab. Die folgende Tabelle gibt Aufschluss über diese Fragestellung und gibt einen Richtwert für die Auslegung vor.

<b>Typ</b>	<b>Maß</b>	<b>SLA</b>	<b>FDM</b>	<b>SLS</b>
<b>Gestützte Wand</b>	Mindeststärke	0,2 mm	1 mm	0,7 mm
<b>Ungestützte Wand</b>	Mindeststärke	0,2 mm	1 mm	1 mm
<b>Drahtdurchmesser vertikaler Drähte</b>	Mindestdurchmesser	0,2 mm	3 mm	0,8 mm
<b>Eingravierte Details</b>	Mindestvertiefung	0,15 mm	0,6 mm breit & 2 mm tief	0,2 mm

Tabelle 5: Richtlinie Mindestwandstärken, Quelle: Formlabs (2021), Online-Quelle [3.September.2021]. (leicht modifiziert)

Das MJF- Verfahren ist dem SLS vom Rohmaterial sehr ähnlich. Die Mindestwandstärke beträgt bei MJF ebenfalls 0,7 mm<sup>77</sup>. PolyJet ist dem Grundmaterial des SLA- Verfahrens auch sehr ähnlich, deswegen kann hier auch von den gleichen Werten ausgegangen werden. Jedoch gilt für alle Verfahren, dass die Wandstärke auch vom verwendeten Material abhängt und das Materialdatenblatt, soweit vorhanden für die Designentscheidung bezüglich Wandstärke herangezogen werden sollte.

Auch eine sehr wichtige Fragestellung bei funktionellen 3D Druck- Teilen ist die erreichbare Toleranz bei mit den verschiedenen Verfahren. Zu Orientierung für die Auslegung solcher Teile stellt die folgende Tabelle Richtwerte<sup>78</sup> zur Verfügung.

<b>Toleranzen 3D Druck</b>	<b>FDM</b>	<b>SLA</b>	<b>PolyJet</b>	<b>SLS</b>	<b>MJF</b>
<b>Abweichung/ %</b>	± 0,5	± 0,2	± 0,15	± 0,3	± 0,3
<b>Untere Grenze / mm</b>	± 0,5	± 0,2	± 0,15	± 0,3	± 0,3

Tabelle 6: Richtlinie Toleranzen, Quelle: Eigene Darstellung.

<sup>77</sup> Vgl. Rapidoobject GmbH, Online-Quelle [3.September.2021], S. 4.

<sup>78</sup> Vgl. 3Faktur GmbH, Online-Quelle [3.September.2021].

### 3.3 Umsetzung

Bei der Umsetzung liegt das Hauptaugenmerk darauf, den Gestaltungsrichtlinien für das jeweilige additive Verfahren gerecht zu werden. Dies wird in der Fachsprache auch „Design for Additive Manufacturing“ genannt<sup>79</sup>. Hierbei gibt es auch einige Fertigungsrestriktionen, ähnlich wie bei der konventionellen Fertigung, die es zu beachten gilt. Hierzu gibt es 7 Prinzipien einzuhalten, welche die additive Fertigung begünstigen.

Denn wenn die additive Fertigung schlecht eingesetzt wird, ist es im Wesentlichen nur ein Ersatz für konventionelle gefertigte Teile und generiert keinen Mehrwert. Es sollte bei Einsatz des 3D Drucks auch immer das Potenzial dieser generativen Fertigung ausgenutzt werden. Sollte aber das additiv gefertigte Teil entsprechend den DfAM- Richtlinien umgesetzt sein, kommt man zu einer guten Lösung, bezüglich Funktionalität oder Kosten.<sup>80</sup>

**Diese 7 DfAM- Richtlinien werden nach Angelle Erickson folgendermaßen beschrieben:**<sup>81</sup>

#### 1. Additiv Denken

Die meisten Ingenieure denken heute „subtraktiv“, weil die traditionelle Fertigung im Allgemeinen bedeutet, einen Materialblock zu nehmen und daraus Material zu entfernen. Dieser Prozess muss bei additiv gefertigten Teilen genau umgekehrt gedacht werden. Es ist ein anderer Denkprozess, was die Herstellung angeht. Der Ansatz hierbei ist, nur dort Material hinzuzufügen, wo es auch gebraucht wird.

#### 2. Orientierung beim Design berücksichtigen

Wie ein Teil auf dem Druckbett platziert wird, führt zu einigen Unterschieden, wenn es um das endgültige Teil geht. Wenn das Teil zum Beispiel auf der Seite liegt, verleiht es dem Teil große Festigkeit und Genauigkeit, wenn es jedoch flachgelegt wird, wird der schnellste Druck erzielt, und wenn es im Stehen gedruckt wird, wird es das beste Aussehen haben, aber es wird möglicherweise das schwächste Teil sein. Besonders beim FDM- Druck ist daher der Faserverlauf im Verhältnis zum Kraftfluss des Teils zu beachten.

Die Orientierung, mit welchem das Teil dann final gedruckt wird, ist daher sehr wichtig. Es erfordert das Wissen welche Winkel noch selbsttragend für die jeweilige Maschine sind oder wie gut das Teil an der Druckplattform anhaftet. In einem Unternehmen würde dies eine sehr gute Kommunikation zwischen Engineering und der Operations- Abteilung erfordern, um einwandfreie Teile zu produzieren.

#### 3. Konturdesign

Konturdesigns bedeuten, dass bestimmte Teile mit nur einer oder zwei Extrusionslinien gedruckt werden können. Mit diesen Extrusionslinien kann man leichte, aber starke Teile wie Flügelemente herstellen. Es geht hierbei um sehr dünnwandig ausgeführte Teile, welche sehr wenig Masse aufweisen.

---

<sup>79</sup> Vgl. Lachmayer/Lippert/Kaierle (2019), S. 16.

<sup>80</sup> Vgl. Erickson (2018), Online-Quelle [14.August.2021].

<sup>81</sup> Vgl. Erickson (2018), Online-Quelle [14.August.2021].

#### 4. Segmentierte Teile

Dies betrifft Teile, welche zu groß für den Bauraum eines Druckers sind. Wenn dies der Fall ist, kann man die Teile segmentieren und in beliebige Abschnitte unterteilen, die dann auch mit dem Bauraum des verfügbaren Druckers übereinstimmen. Die ausgedruckten Teile können dann mit einem entsprechenden Klebstoff zum finalen Teil zusammengefügt werden. Hierbei empfiehlt es sich die Einzelteile so auszuführen, sodass diese vor dem Verkleben formschlüssig zusammengefügt werden können. Dazu kann man sich zum Beispiel ein Feder- Nut System zu Nutze machen oder auch ein Schwalbenschwanz-System.

#### 5. Hardware hinzufügen

Es gibt einige verschiedene Arten wie Hardware hinzugefügt wird. Mit Hardware kann zum Beispiel eine Buchse für Gleiteigenschaften oder Gewindeeinsätze zur Befestigung gemeint sein. Diese Hardware kann entweder miteingedruckt werden oder nachträglich in das Bauteil eingefügt werden.

#### 6. Komplikationen minimieren

Dieses Prinzip ist interessant, weil es der ursprünglichen Idee „Je weniger Material verwendet wird, desto effizienter ist der 3D- Druck genutzt“ widerspricht. Beim gezeigten Beispiel (Abb. 51) verlängert Supportmaterial den Druckprozess erheblich, da jede Schicht im Modell von Modellparameter zu Supportparameter wechseln muss. Dieser wechselnde Parameter kann die Druckzeit erheblich verlängern. Daher kann es gegebenenfalls günstiger sein mehr Material für das Modell zu verwenden, als es eigentlich nötig wäre.

#### 7. Kritische Oberflächen berücksichtigen

Hier geht es darum kritische Punkte wie Querbohrungen oder Überhänge mit sehr steilem Winkel zu berücksichtigen. Es sollten in der Designphase idealerweise harte Übergänge vermieden werden und diese sollten grundsätzlich mit einer Rundung versehen werden. Zusätzlich sollte man wissen bis zu welchem Überhangwinkel das Teil noch druckbar für den jeweiligen Drucker ist. Diese Punkte sind vor allem bei der FDM und SLA Drucktechnik kritische Punkte und sind bei PolyJet und SLS- Verfahren eher unkritisch, da Supportmaterial durch den Prozess überall zur Verfügung steht.

Die nachfolgende Tabelle ist in Anlehnung an Angelle Erickson erstellt.

DfAM Prinzipien	Ressourcen einsparen			Qualität verbessern		
	Gewicht & Kosten	Druckzeit	Touch Time	Festigkeit	Ästhetik	Funktionalität
#1 Additiv denken	X	X		X	X	
#2 Orientierung		X	X	X	X	
#3 Kontur Design	X			X		
#4 Segmentierte Teile	X	X				
#5 Hardware hinzufügen			X	X	X	X
#6 Komplikationen minimieren	X	X	X		X	
#7 Kritische Oberflächen						X

Tabelle 7: DfAM Auswirkungsmatrix, Quelle: Eigene Darstellung.

**Erklärung der Matrix:**

In der Vertikalen sind zwei grundlegende Rubriken erkennbar: Ressourcen einsparen und Qualität verbessern. Beim ersten geht es darum etwas einzusparen und dadurch einen Vorteil bezüglich wirtschaftlicher Interessen zu erzielen. Bei der zweiten Rubrik geht es darum verschiedene Eigenschaften eines Bauteiles zu verbessern. In den Zeilen der Matrix sind die einzelnen Prinzipien zu erkennen, welche angewendet werden können. Die Kreuze zeigen welches Prinzip welchen Effekt repräsentiert. Dabei können einzelne Prinzipien mehrere Effekte erzielen.

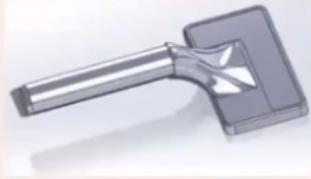
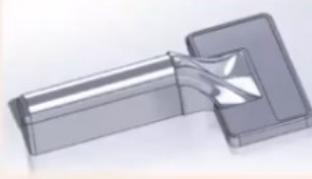
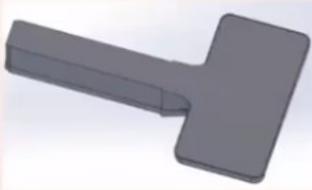
A & B side	A side only
	
	
8.0 hours	5.3 hours
34 in <sup>3</sup> material	27 in <sup>3</sup> material

Abb. 51: Vergleich FDM mit und ohne Support, Quelle: Erickson (2018), Online-Quelle [14.August.2021].

Dieses Kapitel zeigt auf, wie man die Additive Manufacturing optimal einsetzt, sodass man nicht nur die konventionelle Fertigung durch Werkzeugmaschinen, mit der neuen generativen Fertigung (3D- Druck) ersetzt. So soll bei Einsatz dieser jungen Technologie schon in der Entwurfsphase die Gestaltungsziele miteinbezogen werden. Bei der Auslegung ist es ideal die verschiedenen digitalen Tools, wie FE- Analyse oder Topologie- Optimierung miteinzubeziehen, um das bestmögliche Ergebnis für das jeweilige Design zu erzielen. Bei der Umsetzung soll dann darauf geachtet werden, die DfAM zu beachten. Diese helfen dabei das entsprechende Produkt optimal, auf das gewählte Druckverfahren vorzubereiten und auszulegen.

Damit wird dieses Kapitel geschlossen und es wird übergegangen auf das Kapitel der einzelnen Teillösungen. In den Teillösungen werden die Ansätze der optimalen Entwicklungsmethodik bereits eingesetzt, um gute Ergebnisse zu erhalten.

## 4 TEILLÖSUNGEN

In diesem Kapitel wird beschrieben, wie die Teillösungen für die Ergebnisse erarbeitet werden und wie diese realisiert werden können. Die Teillösungen sind auf 2 Teilbereiche aufgeteilt: Ein Teil beschreibt die einzelnen angestrebten Lösungen für den Bereich Aktorik und der zweite Teilabschnitt beschreibt ausgewählte Sensorik- Lösungen.

### 4.1 Teillösungen Aktorik

In diesem Kapitel geht es darum aufzuzeigen, wie man nur durch einen 3D Drucker einen funktionsfähigen Aktor herstellen kann. Dabei ist es wichtig Materialien zu finden, die grundsätzlich eine passende Dehnung aufweisen, denn die folgenden Aktorik- Elemente sind alle an diese Eigenschaft gebunden. Das Material soll sich möglichst dehnen lassen, aber gleichzeitig eine gute Steifigkeit aufweisen, um die Aufgaben als Aktorelement zu erfüllen. Diese Eigenschaften werden in den nachfolgenden Teillösungen von essenzieller Bedeutung sein, da jede Teillösung von der Dehnung des Materials lebt.

Aus diesem Grund werden nachfolgend geeignete Materialien je nach Verfahren aufgelistet, die möglichst passende Eigenschaften für die einzelnen Teillösungen aufweisen. Vorher werden die Verfahren, hinsichtlich einiger wichtiger Eigenschaften bewertet. Drei Plus bedeuten besonders günstige Eigenschaften für die jeweilige Kategorie.

Bewertung der Druckverfahren für die Teillösungen:

	FFF	SLA	PolyJet	SLS	MJF
<b>Dichtheit</b>	+--	+++	+++	++-	++-
<b>Isotropie</b>	+--	+++	+++	++-	++-
<b>Materialien</b>	+++	+--	+--	++-	++-
<b>Wandstärke</b>	+--	+++	+++	++-	++-
<b>Qualität</b>	+--	+++	+++	++-	++-
<b>Multimaterial</b>	++-	---	+++	---	---
<b>Support notwendig</b>	+--	++-	++-	+++	+++

Tabelle 8: Bewertung der Verfahren für Teillösungen, Quelle: Eigene Darstellung.

Diese Tabelle gibt Aufschluss darüber welche Druckverfahren geeignet sind, um ein solches Element zu produzieren. Das FFF- Verfahren schneidet hier in einigen Kategorien am schlechtesten ab, hat aber eine sehr weitreichende Materialauswahl mit echten Highlights wie Carbon- Verbundmaterial. Es ist jedoch ohne Nachbehandlung oft nicht dicht und das Verfahren weist die größte Anisotropie auf. Das sieht beim SLA und PolyJet anders aus. Diese beiden Verfahren schneiden bezüglich der Anisotropie am besten ab, ein Manko ist hier die begrenzte Auswahl an geeigneten Materialien. Das SLS- Verfahren ist ebenfalls sehr geeignet, weist aber schlechtere Eigenschaften bezüglich der Isotropie und der Fähigkeit dünne

Wandstärken zu drucken auf. Das MJF- Verfahren schneidet ähnlich ab, nur die Materialauswahl ist hier am kleinsten: In der Regel bieten hier die Hersteller ein PA11 und ein TPU als Material an.

Geeignete Materialien sortiert nach Druckverfahren:

Verfahren	Material	Hersteller	Dehnung / %	Zugfestigkeit / N/mm <sup>2</sup>	Härte	Tough/ Soft
<b>FFF</b>	ABS <sup>82</sup>	Ultimaker	4,8	39	76 Shore D	T
	Tough PLA <sup>83</sup>	Ultimaker	3,1	37	79 Shore D	T
	Nylon <sup>84</sup>	Ultimaker	210	34,4	74 Shore D	T
	PS-FLEX-285-0500-BK <sup>85</sup>	PrimaSelect	530	24	45 Shore D	S
	Ninjaflex 3DNF0229005 <sup>86</sup>	Ninjatek	660	26	85 Shore A	S
<b>SLA/ DLP</b>	Tough 2000 <sup>87</sup>	Formlabs	48	46	k.A.	T
	Tough 1500 <sup>88</sup>	Formlabs	51	33	k.A.	T
	Flexible-X <sup>89</sup>	Liqcreate	6	72	55 Shore A	S
	Strong Resin Black <sup>90</sup>	Formfutura	160	3,23	50 Shore A	T
	Clear Impact <sup>91</sup>	Liqcreate	25	47	68 Shore D	T
	Tough-X <sup>92</sup>	Liqcreate	150	15	60 Shore D	S

<sup>82</sup> Vgl. Ultimaker BV (2017), Online-Quelle [15.September.2021].

<sup>83</sup> Vgl. Ultimaker BV (2018), Online-Quelle [11.November.2021].

<sup>84</sup> Vgl. Ultimaker BV (2017), Online-Quelle [11.November.2021].

<sup>85</sup> Vgl. PrimaCreator, Online-Quelle [15.September.2021].

<sup>86</sup> Vgl. NinjaTek, Online-Quelle [10.Oktober.2021].

<sup>87</sup> Vgl. Formlabs GmbH (2020), Online-Quelle [15.September.2021].

<sup>88</sup> Vgl. Formlabs GmbH (2021), Online-Quelle [15.September .2021].

<sup>89</sup> Vgl. Liqcreate (2021), Online-Quelle [11.November.2021].

<sup>90</sup> Vgl. Formfutura BV (2021), Online-Quelle [2.November.2021].

<sup>91</sup> Vgl. Liqcreate (2021), Online-Quelle [11.November.2021].

<sup>92</sup> Vgl. Liqcreate (2021), Online-Quelle [11.November.2021].

<b>PolyJet</b>	Agilus30 <sup>93</sup>	Stratasys	220- 270	2,4- 3,1	30-35 Shore A	S
	Elastico <sup>94</sup>	Stratasys	360- 400	3- 5	45-50 Shore A	S
	Durus <sup>95</sup>	Stratasys	40- 50	20- 30	74-78 Shore D	T
	Digital ABS plus <sup>96</sup>	Stratasys	25 -40	55- 60	85- 87 Shore D	T
<b>SLS</b>	Sinterit <sup>97</sup>	Nylon 11	40	54	k.A.	T
	Polypropylene <sup>98</sup>	Materialise	529	21,4	k.A.	S
<b>MJF</b>	PA12 <sup>99</sup>	Materialise	15/ 20	48	k.A.	T
	TPU 90A-01 <sup>100</sup>	Materialise	120/ 220	7/ 9	88 Shore A	S

Tabelle 9: Geeignete Materialien für Aktorik- Teillösungen, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Tabelle 9 ist das Ergebnis einer Recherche nach Materialien, die für funktionale 3D- gedruckte Robotergreifer geeignet sind. Diese sind nach Verfahren sortiert und weisen jeweils sehr feste und dehnbare Materialien („Tough“) und weiche Materialien („Soft“) auf. Tough- Material wird eher für Aktoren verwendet, die eine höhere Festigkeit benötigen und gute Rückstellungseigenschaften brauchen. Soft- Materialien werden für Aktoren verwendet, die sehr dehnbar und anpassungsfähig sein sollen. Diese werden dann nachfolgend in zwei Datendiagrammen erfasst und miteinander verglichen.

Die Materialien der PolyJet- Verfahren Durus und Digital ABS haben eine „von bis Angabe“, da diese je nach Druckparametern in diesem Bereich verarbeitet werden können. → Stichwort digitales Material. Die MJF- Materialien weisen auch jeweils 2 Werte auf, weil diese in den Datenblättern bereits eine Anisotropie- Angabe haben. Der kleinere Wert ist der theoretische Minimalwert für die Z- Richtung des Drucks.

<sup>93</sup> Vgl. Stratasys Ltd. (2021), Online-Quelle [15.September.2021].

<sup>94</sup> Vgl. Stratasys Ltd. (2021), Online-Quelle [15.September.2021].

<sup>95</sup> Vgl. Stratasys Ltd. (2018), Online-Quelle [30.September.2021].

<sup>96</sup> Vgl. Stratasys Ltd. (2021), Online-Quelle [15.Oktober.2021].

<sup>97</sup> Vgl. Sinterit sp. z o.o., Online-Quelle [1.Oktober.2021].

<sup>98</sup> Vgl. Materialise (2021), Online-Quelle [30.September.2021], S. 20.

<sup>99</sup> Vgl. Materialise (2021), Online-Quelle [30.September.2021], S. 28.

<sup>100</sup> Vgl. Materialise (2021), Online-Quelle [30.September.2021], S. 29.

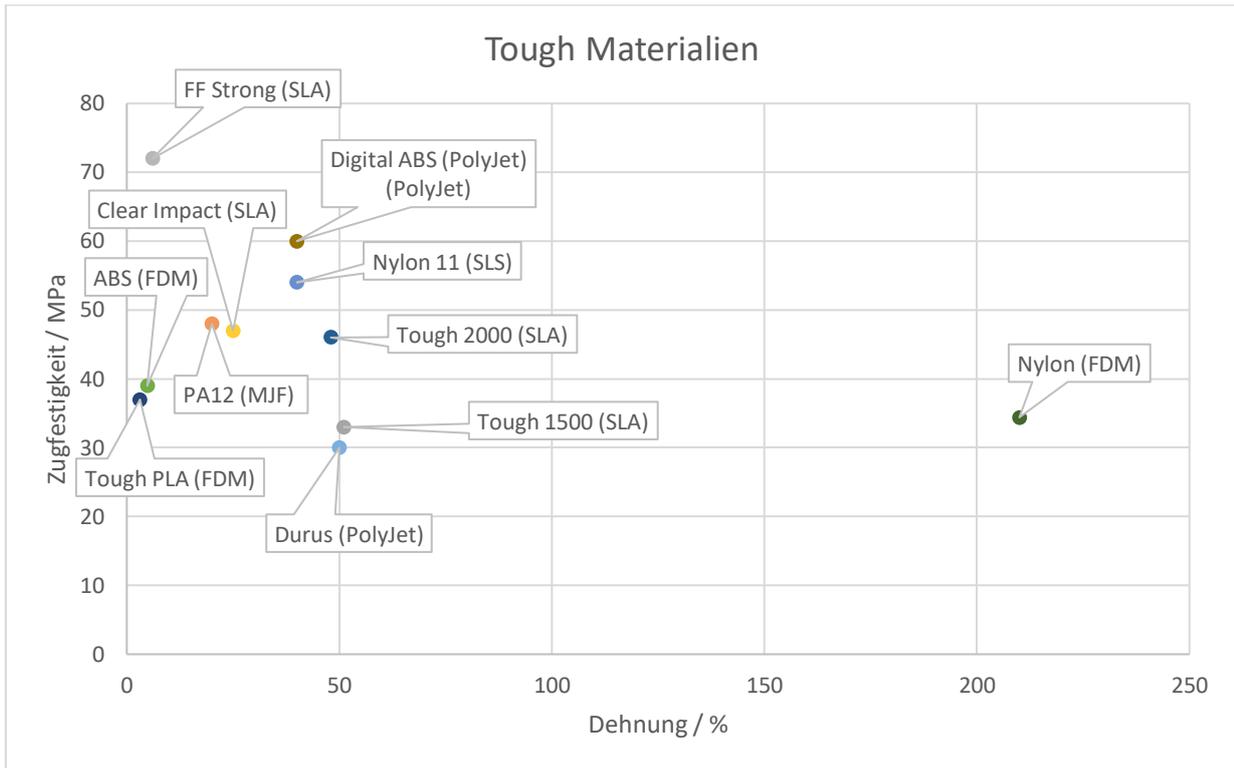


Abb. 52: Tough Materialien, Quelle: Eigene Darstellung.

Bei den toughen Materialien ist es erstrebenswert ein Material zu verwenden, welches in der rechten oberen Diagramm- Ecke zu finden ist. Dieses Material wäre ideal für einen Aktor der mechanisch beansprucht wird und dabei sehr gute Dehnungseigenschaften aufweist. Zu finden sind in diesem Diagramm alle Werkstoffe, die der Kategorie „Tough“ zugeordnet sind. Dabei ist dieses Diagramm als erste Auswahrlösung zu betrachten, denn es kommen noch einige andere Aspekte hinzu, welche die Auswahl des Materials beeinflussen. Weitere wichtige Werte sind zum Beispiel die Streckdehnung, Rückfederwerte, Anisotropiewerte oder Zugmodul. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Eignung eines Verfahrens für die Herstellung eines Aktors.

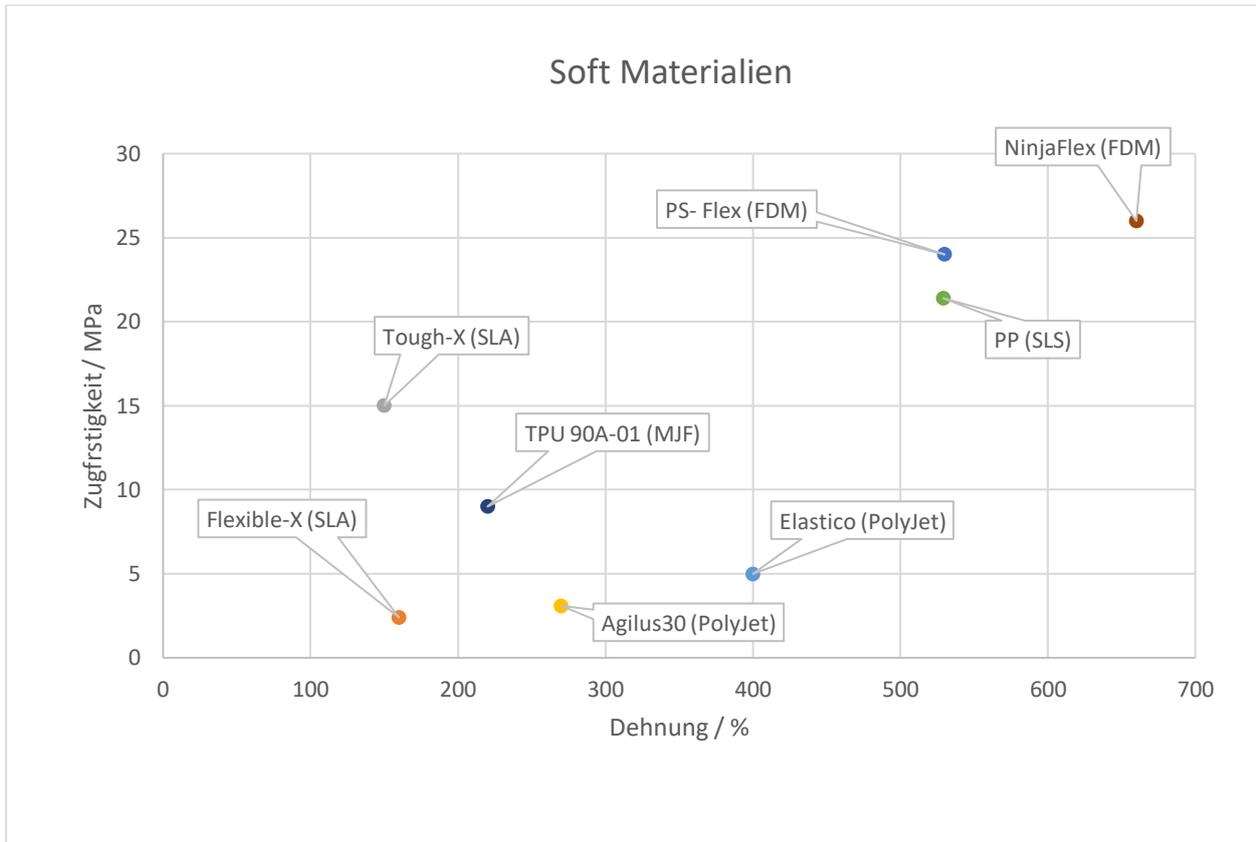


Abb. 53: Soft Materialien, Quelle: Eigene Darstellung.

Im obigen Diagramm sind all jene Materialien zu finden welche mindestens 100% Bruchdehnung aufweisen. Hierbei ist es wieder erstrebenswert ein Material zu wählen, das in der rechten oberen Ecke zu finden ist. Wie beim vorherigen Diagramm ist dieses Diagramm als erste Richtung für die Auswahl zu betrachten. Das Diagramm zeigt, dass es Materialien im FDM- Bereich gibt, die in diesem Diagramm sehr gut abschneiden. In diesem Diagramm spiegelt sich wider, dass im SLA/DLP- Bereich die Materialauswahl für flexible Materialien begrenzter ist als in den anderen Verfahren.

### 4.1.1 Passive Federelemente

In diesem Abschnitt geht es um ein passives Spannelement, welches die Greifkraft eines Greifers erzeugen soll. Dies kann beispielsweise verschiedene Weisen erfolgen, beispielsweise durch ein integriertes Federelement im Greifer oder der Greiferaufbau selbst wird hierfür eingesetzt. Da hier die Vielfalt und die Ausprägungen sehr weit reichen können, wird in diesem Abschnitt auf ein Beispiel gesetzt, wie eine solche Variante umgesetzt werden kann.

#### 4.1.1.1 Konzipierung eines passiven Spannelementes anhand eines Beispiels

Dieses Beispiel soll aufzeigen, wie ein integriertes passives Element bei einem additiv gefertigten Greifer aussehen kann. In diesem konkreten Fall ist ein Greiforgan angestrebt, das durch die Kraft des Federlements eine Greifkraft ausübt und gleichzeitig das Greiforgan zurückstellt. Dabei steht klar die Auslegung des Federelements und des Scharniers im Vordergrund. Restliche Elemente, wie der Greiferfinger selbst, werden im Beispiel als gegeben hingenommen.

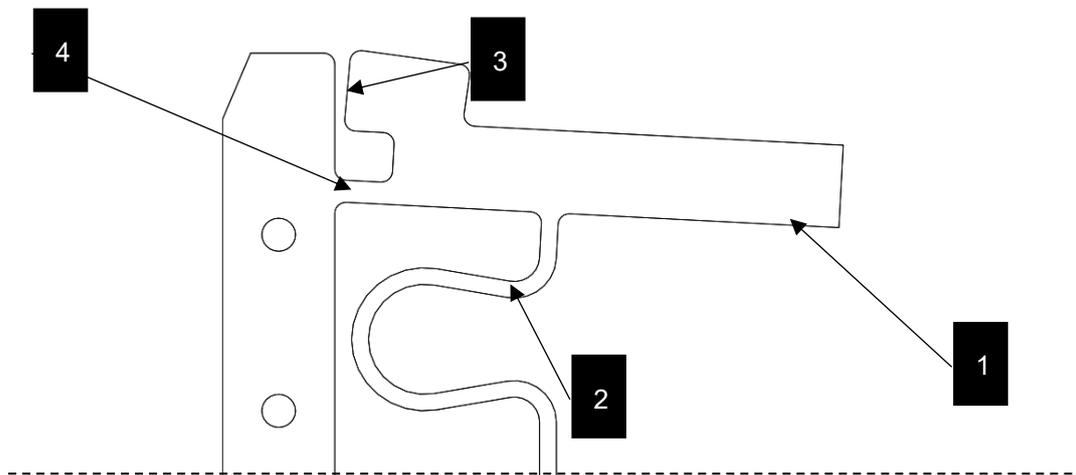


Abb. 54: Erster Modellentwurf als Grundlage (Winkelgreifer m. gedruckter Aktorik): Quelle: Eigene Darstellung.

Der dargestellte Greifer (Abb. 54) stellt den ersten Entwurf dar, welcher als Simulationsmodell für die Auslegung dienen wird. Der Entwurf stellt genau die Hälfte des Endproduktes dar, die strichlierte Linie stellt die Symmetrielinie dar. (1) stellt die Greiffläche des Fingers dar, der durch das gedruckte Scharnier (4) gelagert wird. (3) bildet einen Endschlag für den später hinzugefügten Aktor des Greifers. Das passive Federelement (2) sorgt im fertigen Zustand für die Greifkraft, die vom Aktor zum Öffnen überwunden werden muss.

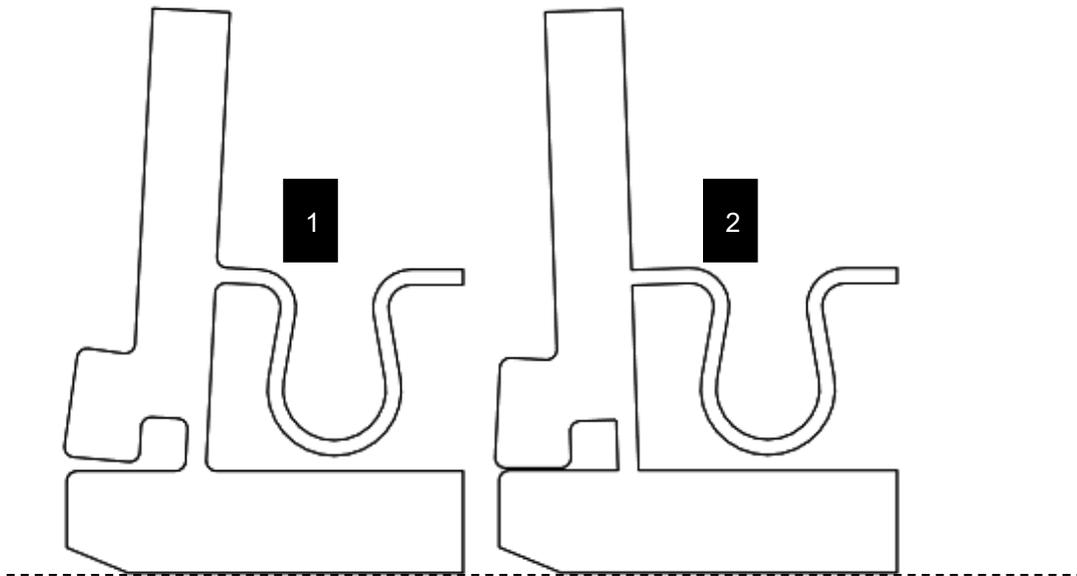


Abb. 55: Greifer mit gedruckter Aktorik: Offen und vorgespannt, Quelle: Eigene Darstellung.

Die vorhergehende Abbildung (Abb. 55) zeigt die angestrebten Positionen für die offene Stellung (2) und für die vorgespannte Stellung (1). Für die offene Stellung ist ein Winkel von  $93^\circ$  zur Linie vorgesehen. Die vorgespannte Stellung ist auch die Stellung in der, der Aktor auch gedrückt wird. Die eigentliche Greifstellung ist bei  $90^\circ$  vorgesehen. Die Vorspannung ist so groß zu wählen, sodass bei der  $90^\circ$ -Stellung eine Normalkraft von 20 N auf das Greifobjekt ausgeübt wird.

Um die benötigte Kraft zu ermitteln, wird das vorhandene Teil vom Simulationsprogramm vernetzt. Für die Vernetzung wird ein Tetraeder-Netz mit einer Elementgröße von 2 mm gewählt. Dieses Netz bildet die Grundlage für die nachfolgende Berechnung der einzelnen Knotenverschiebungen. Das Modell ist in der vorgespannten Stellung vernetzt.

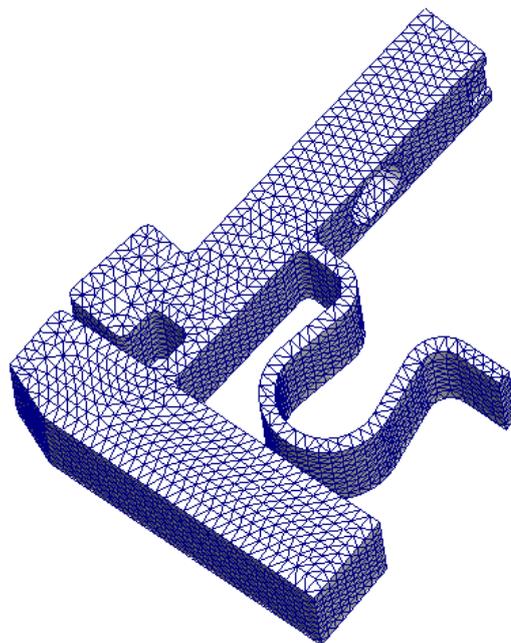


Abb. 56: Vernetzung des Greifermodells, Quelle: Eigene Darstellung.

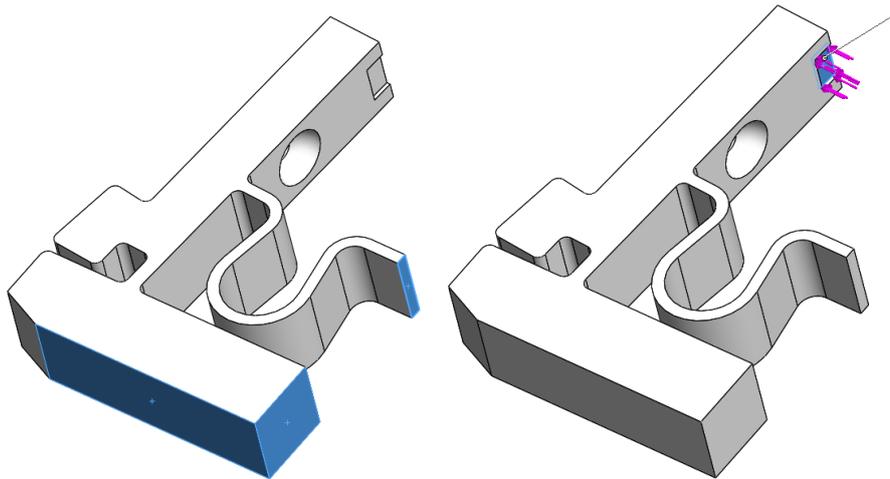


Abb. 57: Fixierte Flächen und Kraft, Quelle: Eigene Darstellung.

Die beiden blauen Flächen sind fixiert, die magentafarbenen Pfeile stellen die Kraft (20 N) dar die einwirkt. Durch diese Kräfteinwirkung sollte der Greifer in 90°- Stellung sein. Wenn dies gegeben ist wird das Greifobjekt mit der errechneten Greifkraft gegriffen. Um dies zu erreichen kann die Länge des Greiferfingers verlängert oder verkürzt werden oder die Materialstärke des Federelements modifiziert werden. Wenn noch keine Orientierungswerte oder Erfahrungswerte hinsichtlich einer solchen Geometrie verfügbar ist, muss dieser Schritt so lange ausgeführt werden bis man den gewünschten Wert in Annäherung erreicht.

Da große Verformungen am Modell zu erwarten und erwünscht sind, wird das Modell mit einer nichtlinearen Simulation berechnet.

Simulationsergebnisse Feder/ Greifkraft:

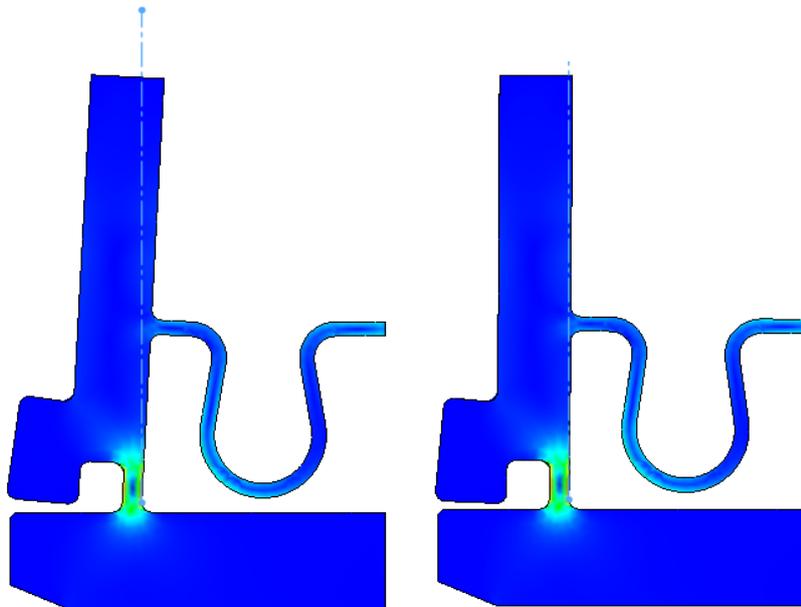


Abb. 58: Ausgangsform und verformtes Resultat, Quelle: Eigene Darstellung.

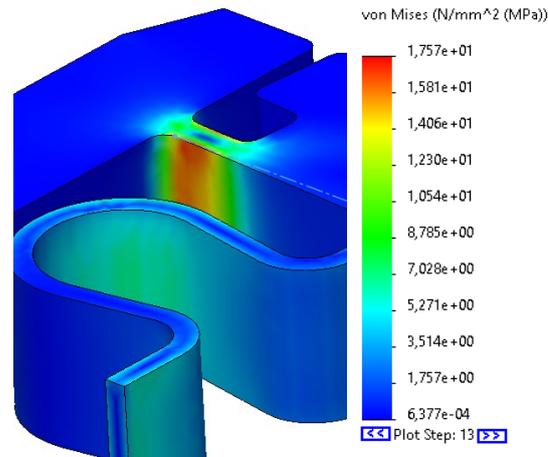


Abb. 59: Belastete Zonen im Bereich Filmscharnier und Feder, Quelle: Eigene Darstellung.

Nun ist die Feder richtig ausgelegt und es muss die benötigte Öffnungskraft berechnet werden. In der Abb. 58 kann man die Ausgangsstellung und die Greifstellung erkennen. Es ist eine Kraft von 20 N notwendig, um die Greifstellung zu erreichen. Sollte benötigte Kraft darunter liegen muss man die Feder entsprechend anpassen, damit die gewünschte Greifkraft erreicht wird. Gleichzeitig muss darauf geachtet werden, dass weder das Filmscharnier oder die Feder zu hoch belastet sind und die Festigkeit des Materials übersteigt.

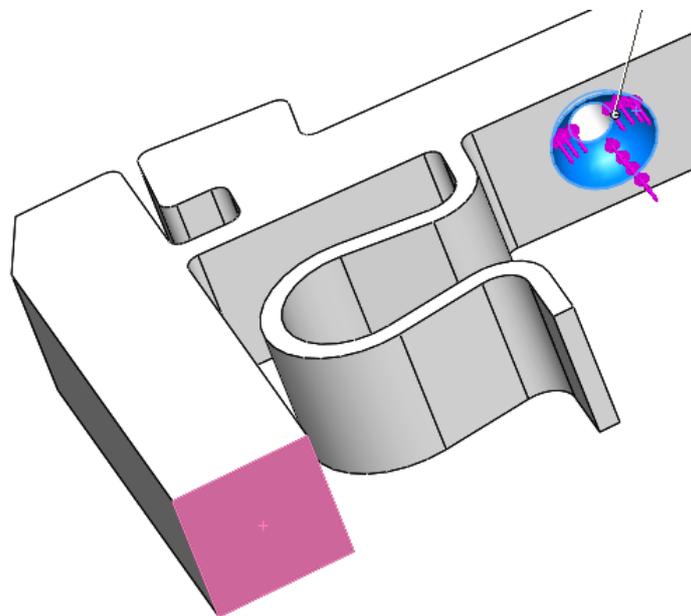


Abb. 60: Angriffsfläche für den Aktor, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Kraft muss ermittelt werden, sodass der Greifer geöffnet werden kann. Da die Aktorik näher an der Feder ist, muss die Kraft des Aktors dementsprechend größer sein. Daher kann hierbei der Abstand zur

Feder verändert werden oder die Kraft verändert werden, um das entsprechende Ergebnis zu erreichen. In diesem Fall wird eine Kraft von mind. 100 N benötigt, um den Greifer entsprechend zu öffnen.

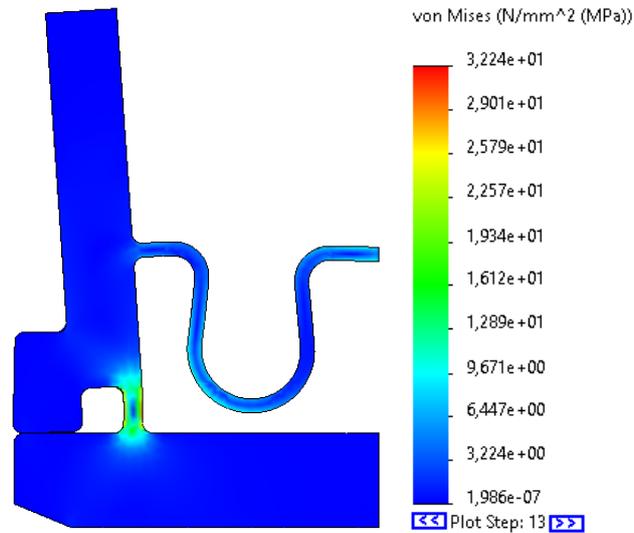


Abb. 61: Ergebnisse Simulation für Öffnung des Greifers: Quelle: Eigene Darstellung.

In der Abb. 61 ist die Simulation der geöffneten Stellung zu sehen. Die Kraft musste in diesem Fall auf 100 N erhöht werden, damit der Greifer sich bis zum Anschlag öffnet. Dabei wird das Filmscharnier mit bis zu 33 N / mm<sup>2</sup> belastet und es muss darauf geachtet werden, dass man sich innerhalb der Festigkeitsgrenzen des Materials befindet.

#### 4.1.1.2 Umsetzung mit dem 3D Drucker

Da es sich hier um einen FDM- Druck handelt muss darauf geachtet werden, dass die belasteten Elemente mit 100 % Füllung gedruckt werden. Ansonsten stimmen die gedruckten Ergebnisse nicht mit den simulierten Ergebnissen überein. Deshalb muss man die einzelnen Elemente im CAD schon vorher unterteilen. Dann werden die Körper mit derselben Abhängigkeit zum Ursprung als STL exportiert und in die Teile in die Slicer- Software importiert. In diesem Fall wurde SolidWorks als CAD Programm genutzt und CURA als Slicer- Software.

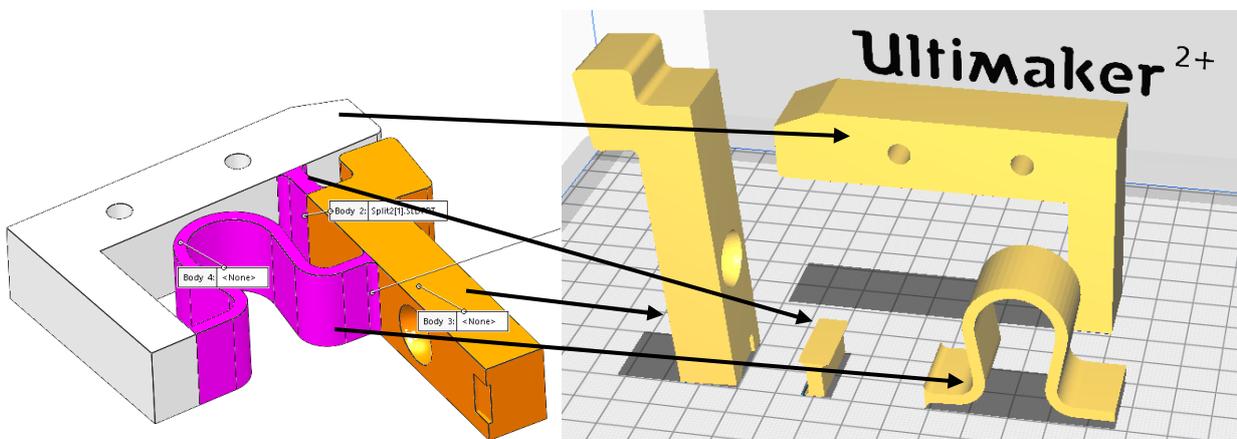


Abb. 62: Exportieren als Multikörper- Teil, Quelle: Eigene Darstellung.

Nachdem die Modelle im Slicer sind, müssen diese bezüglich der Infill- Option separat definiert werden. CURA unterstützt diese Option und es wird für das Federerelement 100 % Füllung definiert. Nachdem die zwei Objekte definiert sind, werden diese mit „Merge Models“ Befehl in Abhängigkeit ihres Ursprungs zusammengefügt. Die im Vorhinein eingestellten Settings bleiben erhalten.

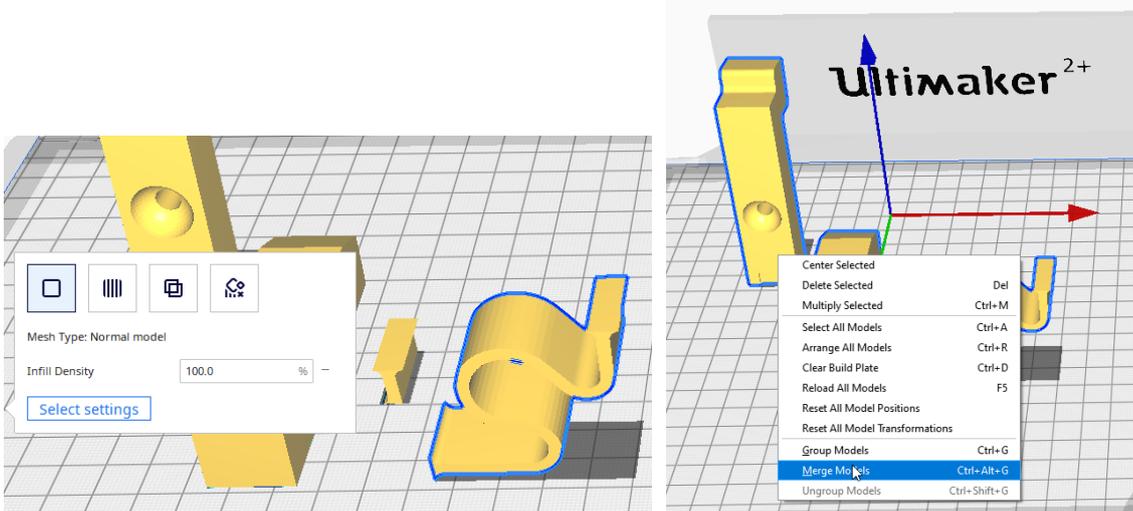


Abb. 63: Definition Füllung und Modell wieder zusammenfügen, Quelle: Eigene Darstellung.

Wichtig ist es bei der Exportierung der STL- Files aus SolidWorks zu wissen, dass die Option „**Do not translate STL output data to positive space**“ angewählt ist. Ansonsten kann es sein, dass der Ursprung der STL- Datei verschoben wird und das Teil findet nicht mehr wie vorgesehen zusammenfindet.

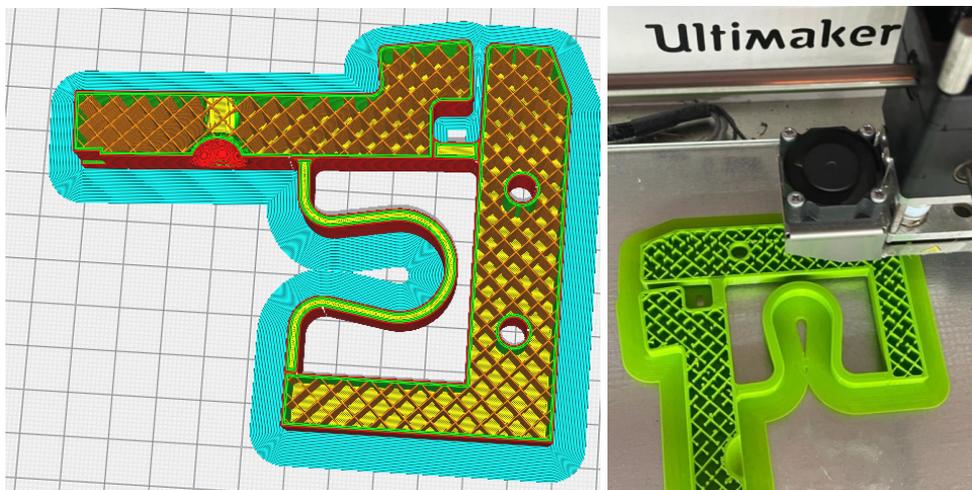


Abb. 64: Mutikörper- Part mit verschiedenen Füllungen, Quelle: Eigene Darstellung.

Bei Verwendung des Multimaterialdrucks in Cura, läuft dieser Workflow identisch ab. Der einzige Unterschied ist, dass zusätzlich noch ein anderer Extruder für den Körper ausgewählt werden muss, bevor die Teile durch „Marge Models“ verschmolzen werden.

Eine derartige Lösung wird nachfolgend im Zuge einer Demolösung umgesetzt und in ein funktionsfähiges Greifsystem integriert.

### 4.1.1.3 Fazit passive Elemente

Passive Elemente können in sehr großer Vielfalt in 3D- gedruckten Lösungen integriert werden. Diese passiven Elemente gibt es aber nicht erst seit Einführung und Verbreitung additiver Fertigungstechniken. Vor allem im Bereich der funktionalen Kunststoffteile werden solche Elemente integriert. Ein Beispiel ist hierfür die oft verwendeten Schnellverschlüsse zum Einclippen. Diese Technik wird sehr oft verwendet, um Kunststoffteile zu befestigen. Im oben ausgeführten Exempel wird die Biegsamkeit des Kunststoffes ausgenutzt, um den Greifer das Greiferorgan in Ausgangsstellung zurückzustellen und um eine gewisse Greifkraft auf das Objekt auszuüben. Diese Kraft wird über ein Federelement ausgeübt, welches rund ausgeformt ist und deswegen die Kraft und die Dehnung sehr gut aufnehmen kann. Solche Elemente können für Fail- Safe- Funktionen in additiv gefertigten Robotergreifern genutzt werden.

### 4.1.2 Gedruckter Faltenbalg- Aktor

Ein Aktor dieser Art muss genug Steifigkeit besitzen, um den Druck standhalten zu können und ausreichend Dehnung aufweisen, um einen gewissen Weg zurückzulegen. Zusätzlich soll dieser hermetisch dicht sein, um keine Druckluft entweichen zu lassen. Wie in der Schnittansicht dargestellt, wird die Luft über die Öffnung eingeströmt und der Aktor dadurch betätigt. Es ist vorgesehen, dass sich dieser in Längsrichtung ausdehnt. Solange der Aktor unter Druck steht, ist dieser ausgedehnt, sobald diese entweicht, geht dieser wieder in Ausgangsstellung zurück.

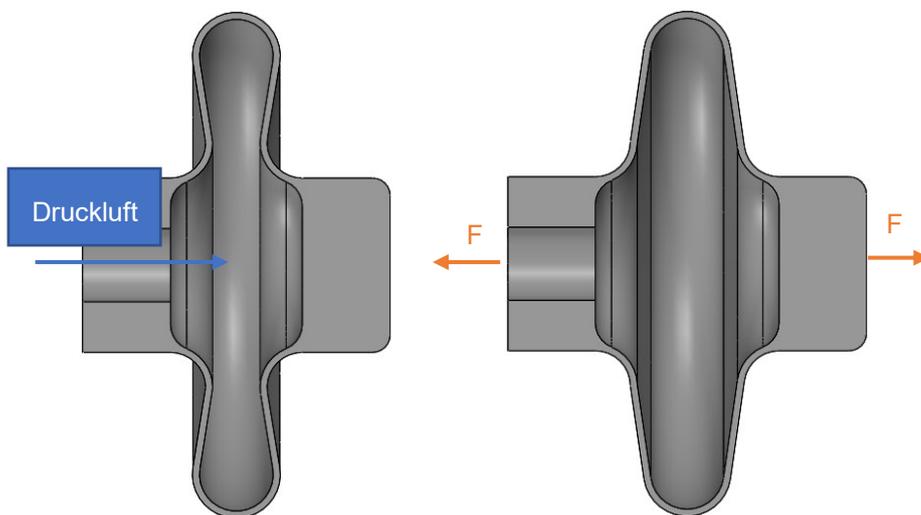


Abb. 65: Faltenbalgfunktion anhand eines ersten Entwurfes, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Geometrie des Faltenbalgs ist so gewählt, dass diese in eher kleingebaute und kompakte Greifanwendungen passen, zum Beispiel in eine spätere Umsetzung.

#### Überlegung zur Materialauswahl und Verfahrensauswahl:

Der Aktor sollte möglichst dicht und möglichst isotrope Eigenschaften aufweisen. Daher ist das FDM-Druckverfahren für diese Anwendung am wenigsten geeignet. Besondere Dichtheit bei 3D Drucken kann das SLA /DLP- Verfahren aufweisen und das Verfahren ist nahezu Richtungsunabhängig, bezüglich der

Festigkeit. Aber auch das MJF- und das SLS- Verfahren sind für die Herstellung dieses Aktors geeignet. Als Material sollte ein „toughes“ ausgewählt werden. Der Aktor sollte hohen Belastungen standhalten, dehnbar sein und möglichst verformungsfrei in seine Ausgangsstellung zurückgehen.

Um erste Aussagen über das Verhalten des Aktors zu bekommen, wird dieser entsprechend simuliert. In diesem Fall wird das Tough 2000 Material für die Simulation herangezogen. Zu diesem Zweck wird die Stress-/ Strain- Kurve des Materials in das Simulationsprogramm übertragen, mit welcher in weiterer Folge der Faltenbalg- Aktor simuliert und ausgelegt wird. Das Material besitzt eine maximale Zugfestigkeit von 46 N/mm<sup>2</sup> und eine Bruchdehnung von 48 %. In der X- Achse ist die Dehnung zu erkennen und in der Y- Achse ist die Festigkeit in N/mm<sup>2</sup> aufgetragen.

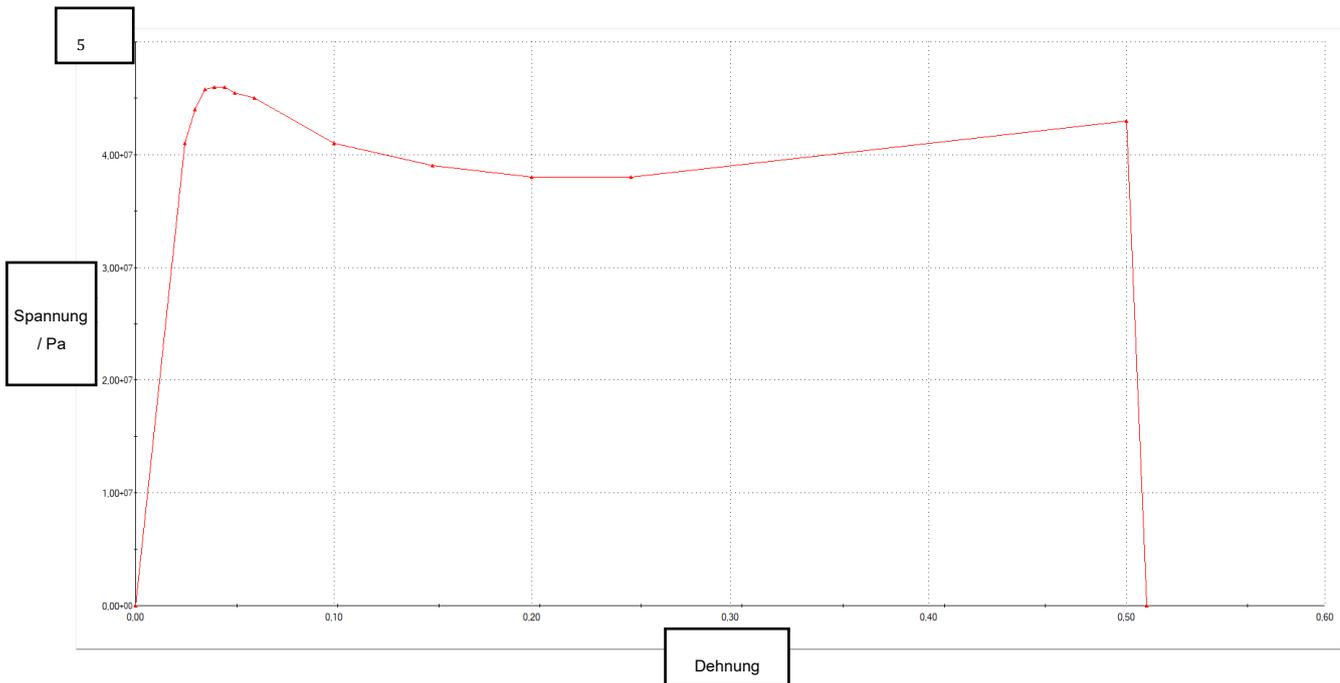


Abb. 66: Festigkeits- Dehnungsdiagramm Formlabs Tough 2000, Quelle: Eigene Darstellung.

Basierend auf diesem Materialmodell (Abb. 66) wird der erste Entwurf des Faltenbalges, mit einer nichtlinearen elastischen Simulation geprüft. Eine erste Simulation soll Aufschluss über das Verhalten des Aktors geben. Dabei wird der Aktor entsprechend vernetzt und mit einem Innendruck von 6 bar beaufschlagt. 6 bar Druck wird gewählt, da diese Druckluftbereitstellung in vielen Fabriken in dieser Größenordnung bereitgestellt wird.

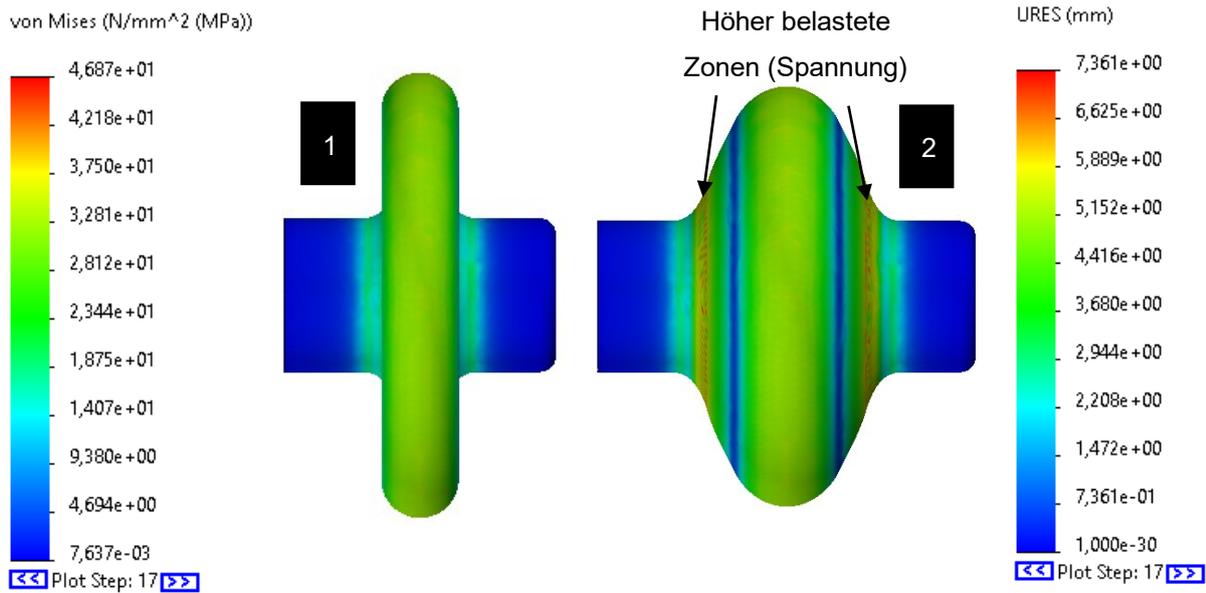


Abb. 67: Ausdehnung des Faltenbalgs bei 6 bar Innendruck, Quelle: Eigene Darstellung.

Wie auf der Abb. 67 zu erkennen ist, funktioniert der entworfene Faltenbalg wie erwartet. Wenn Druck angelegt wird, dehnt sich dieser entsprechend aus. Jedoch ergibt diese Simulation bereits 2 Erkenntnisse: Der Faltenbalg wird dem Druck nicht standhalten, wenn der Balg ohne festen Anschlag betrieben wird. Die zweite Erkenntnis ist, dass die Geometrie in den höher beanspruchten Stellen noch mal angepasst werden sollte, um die Belastung in diesen Zonen (rote Zonen im Bild) zu reduzieren. Als Optimierung wird ein runderes Design gewählt, um Spannungsspitzen entgegenzuwirken, wenn der Balg betätigt wird. Dabei wird folgende Formgebung im CAD erarbeitet:

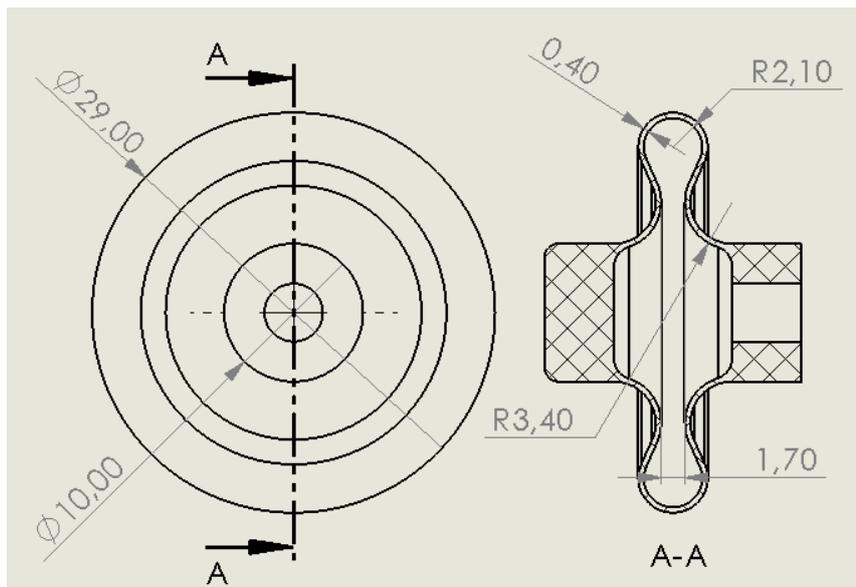


Abb. 68: Faltenbalg- Geometrie für Studie, Eigene Darstellung.

Ziele der Studie:

- Prüfung der maximalen Belastung bei verschiedenen Ausdehnungen und Wandstärken

Um die Grenzen der benötigten Wandstärke zu erfahren wird dieser Aktor mit verschiedenen Stärken simuliert. Da die minimale Wandstärke für das SLA- Verfahren 0,2 mm beträgt und man bis zu 0,2 mm Toleranzen berücksichtigen muss, wird die Simulationsreihe mit 0,4 mm Wandstärke starten und in 0,1 mm Schritten erhöht. Die Ausdehnung startet mit 1 mm und wird bis 5 mm definiert. Diese Simulationsreihe soll Aufschluss über die Grenzen des designten Aktors geben. Der Druck wird 6, 5 und 4 bar betragen. Die folgenden Ergebnisse geben Aufschluss über die Grenzen des simulierten Aktors.

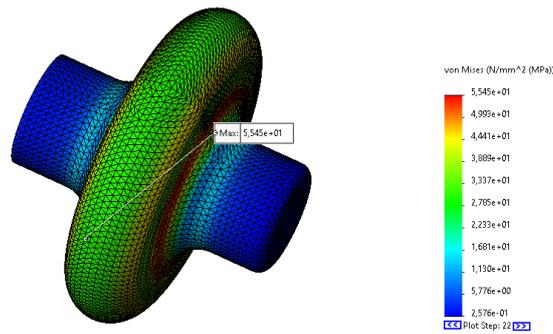


Abb. 69: Beispielbild Simulationsreihe Faltenbalg, Quelle: Eigene Darstellung.

Simulation 0,4 mm Wandstärke			Simulation 0,5 mm Wandstärke		
Hub / mm	Spannung Mises / N/mm <sup>2</sup>	Druck / bar	Hub / mm	Spannung Mises / N/mm <sup>2</sup>	Druck / bar
1	41,74	4	1	30,44	4
2	38,96	4	2	36,74	4
3	40,48	4	3	42,3	4
4	45,16	4	4	49,41	4
5	54,65	4	5	64,11	4
1	52,63	5	1	35,27	5
2	48,73	5	2	40,98	5
3	44,99	5	3	46	5
4	48,41	5	4	52,07	5
5	55,45	5	5	64,07	5
1	63,75	6	1	41,78	6
2	58,76	6	2	45,12	6
3	53,76	6	3	49,63	6
4	51,91	6	4	54,55	6
5	58,25	6	5	64,13	6

Tabelle 10: Auswertung Simulation Faltenbalg Teil 1, Quelle: Eigene Darstellung.

Simulation 0,6 mm Wandstärke			Simulation 0,7 mm Wandstärke			Simulation 0,8 mm Wandstärke		
Hub / mm	Spannung Mises / N/mm <sup>2</sup>	Druck / bar	Hub / mm	Spannung Mises / N/mm <sup>2</sup>	Druck / bar	Hub / mm	Spannung Mises / N/mm <sup>2</sup>	Druck / bar
1	29,2	4	1	29,09	4	1	30,25	4
2	38,51	4	2	41,21	4	2	44,52	4
3	47,24	4	3	52,93	4	3	54,41	4
4	55,58	4	4	62,84	4	4	64,82	4
5	68,97	4	5	71,89	4	5	71,4	4
1	33,34	5	1	32,65	5	1	32,58	5
2	42,16	5	2	44,36	5	2	46,58	5
3	50,44	5	3	55,18	5	3	56,04	5
4	56,51	5	4	63,17	5	4	64,05	5
5	69,33	5	5	71,23	5	5	70,79	5
1	37,43	6	1	36,18	6	1	35,66	6
2	45,78	6	2	47,08	6	2	48	6
3	53,07	6	3	57,3	6	3	57,6	6
4	58,24	6	4	64,95	6	4	65,22	6
5	69,95	6	5	70,72	6	5	71,27	6

Tabelle 11: Auswertung Simulation Faltenbalg Teil 2, Quelle: Eigene Darstellung.

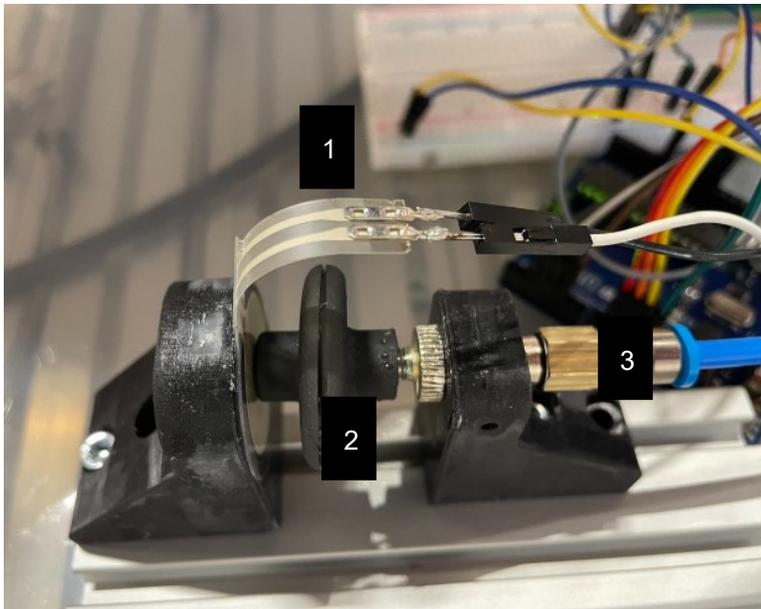
In den beiden Tabellen sind die jeweiligen Maximalbelastungen der Vergleichsspannungen eingetragen. Die jeweiligen Wandstärken belaufen sich auf 0,4 mm – 0,8 mm in 0,1 mm Schritten. Die jeweiligen Wandstärken sind mit den Hübem 1 mm – 5 mm simuliert. Zusätzlich sind alle Hübem und Wandstärken mit den Drücken 4 bar, 5 bar und 6 bar geprüft. Die rot markierten Werte liegen über der Bruchgrenze des Materials und die grün markierten Werte unter der definierten Bruchgrenze von 46 N/mm<sup>2</sup>. Die Simulationsreihe ergibt, dass der Arbeitsdruck bei maximal 4 bar angesiedelt sein sollte und die Hübem um die 2 mm betragen sollten.

Um die Ergebnisse validieren zu können, wird die verschiedenen Wandstärken mit dem entsprechenden Material ausgedruckt und in einem Testaufbau getestet. Dieser Testaufbau soll zeigen ob die Simulationsergebnisse der Realität nahekommen und wie viel Schaltspiele so ein Aktor aushält. Je nach praktischer Erkenntnis werden die Werte (Hub und Druck) für den Prüflauf adaptiert, da verschiedenartige Materialien getestet werden.

#### 4.1.2.1 Testaufbau Faltenbalg

Der Testaufbau wird mithilfe einer Mikrocontroller automatisiert durchgeführt. Dieser Testaufbau ist in Abb. 70 dargestellt. Hauptelemente des Testaufbaus sind ein Kraftsensor (1), Druckluftzufuhr (3) über ein Magnetventil (3/2- Wegeventil) und 2 Spannbocke, die den Faltenbalg (2) und den Sensor in Position halten. Gesteuert wird dieser Aufbau über einen Mikrocontroller (Arduino Uno) welcher über ein Relay das Magnetventil entsprechend ansteuert und die Kraftdaten (5) des Sensors auswertet und seriell an einen angeschlossenen PC übermitteln. Zusätzlich ist als Backup ein Display (4) am Mikrocontroller angeschlossen, welches die Werte in Echtzeit anzeigt. Die Daten (5) werden wie folgt angezeigt: Es wird der jeweilige Hub mitgezählt, wobei es mit den am Sensor angekommenen Hübem verglichen wird

(Touches). „NO“ stellt die nichtangekommenen Hübe dar. → Nach einem Delta von 10 wird der Prüflauf automatisch abgebrochen. Der „Analog reading“- Wert stellt den analogen Wert der Kraft dar, welcher dann manuell in Newton umgerechnet wird. Der Faltenbalg wird bei jedem Hub 3 Sekunden lang mit dem Druck belastet und danach immer 1,5 Sekunden entlastet. Der Code für den Prüfstand befindet sich im Anhang.



```

Hub:366 Touches: 366 NO: 0 --> Analog reading = 856
Hub:367 Touches: 367 NO: 0 --> Analog reading = 856
Hub:368 Touches: 368 NO: 0 --> Analog reading = 856
Hub:369 Touches: 369 NO: 0 --> Analog reading = 856
Hub:370 Touches: 370 NO: 0 --> Analog reading = 856
    
```

5



Abb. 70: Schematischer Aufbau des Testaufbaus für den Faltenbalg, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Testung der Faltenbälge hat gezeigt, dass auch größere Geometrien getestet werden müssen, da manche Materialien und Druckverfahren mit den kleinen Geometrien (Nr.1) nicht machbar waren. Diese Geometrien sind nachfolgend in Abbildungen dargestellt.

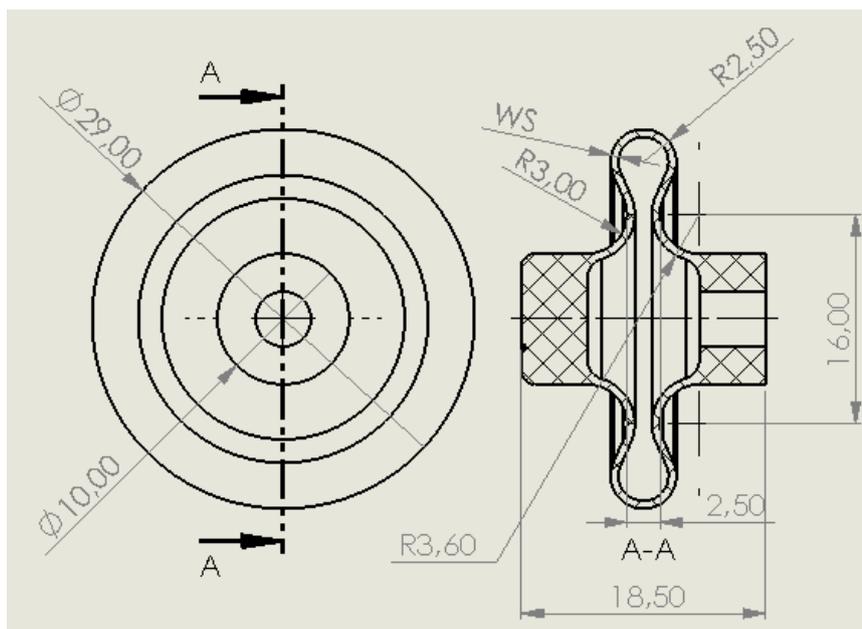


Abb. 71: Faltenbalg Geometrie Nr. 1, Quelle: Eigene Darstellung.

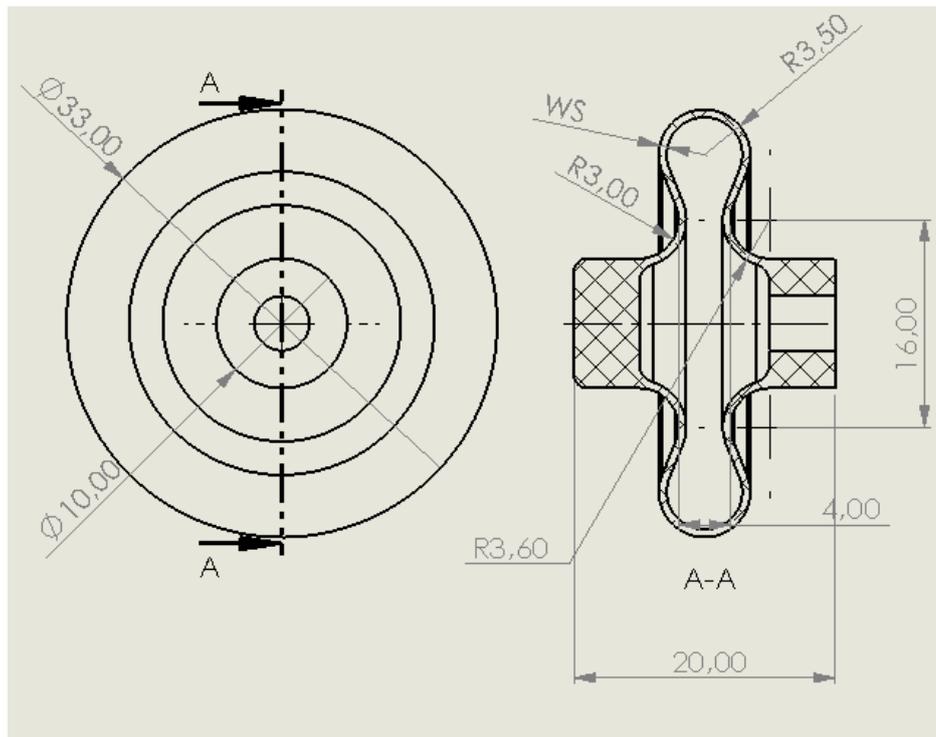


Abb. 72: Faltenbalg Geometrie Nr. 2, Quelle: Eigene Darstellung.

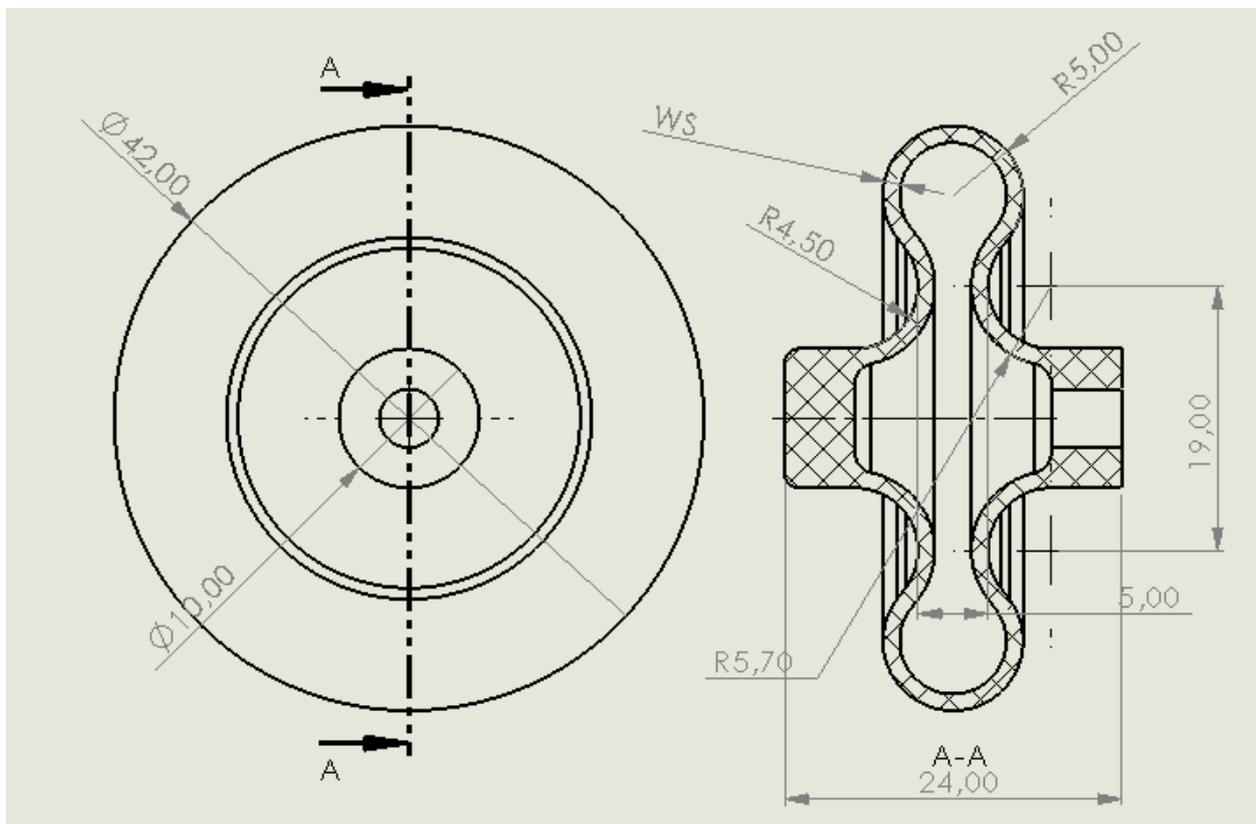


Abb. 73: Faltenbalg Geometrie Nr. 3, Quelle: Eigene Darstellung.

#### 4.1.2.2 Auswertung der getesteten Faltenbälge

Die designten Faltenbälge werden nachfolgend in einem realen Testaufbau bezüglich Funktionalität und Zuverlässigkeit getestet. Verwendet wird dazu der Testaufbau, wie im vorigen Unterkapitel beschrieben.

##### Ergebnisse für den Faltenbalg mit SLA- Verfahren:

Wandstärke (WS)	Anzahl Zyklen	Hub / mm	Druck / bar	Ø Kraft /N	Bemerkung	Material	Geometrie
0,4	--	--	--	--	Wandstärke im SLA-Verfahren nicht umsetzbar	--	Nr. 1
0,6	10492	1	4	50	Nach 2000 Hüben fast vollständige Längung	Tough 2000	Nr. 1
0,6	16852	1	2	10	Nach 5360 Hüben fast vollständige Längung	Tough 2000	Nr. 1
0,8	--	--	--	--	Druck zu deformiert für Test	Tough 2000	Nr. 1
0,8	--	--	--	--	Druck zu deformiert für Test	Tough 1500	Nr. 1
1	>9935	2	3	20	Resthub 0,5 mm	Tough 1500	Nr. 2
1,2	>17113	1	3	15	Resthub 0,7 mm	Tough 1500	Nr. 3

Tabelle 12: Auswertung getestete Faltenbälge SLA- Verfahren, Quelle: Eigene Darstellung.

**Verfahren:** SLA

**Maschine:** Form 3 (Labor Campus 02)

**Material:** Tough 2000, Tough 1500

**Geometrie des Faltenbalgs:** Nr. 1, Nr. 2, Nr. 3; WS = Wandstärke

**Fazit:**

Die kleinen Geometrien haben sich im SLA- Verfahren als sehr schwierig zu drucken erwiesen. Die kleine Geometrie hat nach dem Curing- Prozess immer Deformationen aufgewiesen, so war beim Testen auch nur ein kleiner Hub von 1 mm möglich. Die größeren Geometrien (Nr. 2, Nr. 3) haben bessere Druckergebnisse erzielt und auch die Tests sind besser verlaufen. Jedoch ist der Memory- Effekt auf die Testteile groß und wirken sich nachteilig auf eine Greifanwendung aus. Das Material Tough 1500 ist etwas

besser, weist jedoch auch einen Memory- Effekt auf. Die kleinen Geometrien sind mit diesem Verfahren nur schwer umsetzbar.

**Ergebnisse für den Faltenbalg mit DLP- Verfahren:**

Wandstärke (WS)	Anzahl Zyklen	Hub / mm	Druck / bar	Ø Kraft /N	Bemerkung	Material	Geometrie
0,4	>35538	1	2	20	0,5 mm Resthub	FF Strong Resin Black	Nr. 1
0,6	30168	1	2	25	Bei 30000 Hüben 0,3 mm Resthub	FF Strong Resin Black	Nr. 1
0,6	1	1	3	--	gebrochen	FF Strong Resin Black	Nr. 1
0,6	>30168	1	2	30	0,3 mm Resthub am Ende	FF Strong Resin Black	Nr. 1
1	>7435	1	3		0,5 mm Resthub	FF Strong Resin Black	Nr. 2
1,2	>18280	1	3	35	0,7 mm Resthub	FF Strong Resin Black	Nr. 3
1,2	5452	1	4	70	gebrochen	FF Strong Resin Black	Nr. 3
0,4	850	2	2	--	Abbruch bei starker Deformation	Liqcreate Tough- X	Nr. 1
0,6	7750	2	2	15	Abbruch bei starker Deformation	Liqcreate Tough- X	Nr. 1
0,8	1100	2	3	10	Abbruch bei starker Deformation	Liqcreate Tough- X	Nr. 1
1	>10625	2	2	15	Kein Resthub vorhanden	Liqcreate Tough- X	Nr. 2
1,2	11676	2	2	20	Ab 90 Hüben vollständige Längung	Liqcreate Tough- X	Nr. 3

0,4	66	2	2	--	Bruch	Liqcreate Clear Impact	Nr. 1
0,8	1	2	3	--	Bruch	Liqcreate Clear Impact	Nr. 1
1	>13650	2	3	30	Resthub 0,6 mm	Liqcreate Clear Impact	Nr. 2
1,2	>13740	2	2	20	Resthub 0,6 mm	Liqcreate Clear Impact	Nr. 3
1,2	5300	3	3	50	Resthub 1 mm	Liqcreate Clear Impact	Nr. 3

Tabelle 13: Auswertung getestete Faltenbälge DLP- Verfahren, Quelle: Eigene Darstellung.

**Verfahren:** DLP

**Maschine:** Anycubic Photon Mono X

**Material:** Form Futura Strong Resin Black (Engineering LCD Series), Liqcreate Clear Impact, Liqcreate Tough- X

**Geometrie des Faltenbalgs:** Nr. 1, Nr. 2, Nr. 3

**Fazit:**

Die Druckergebnisse sind auch bei den kleinen Geometrien gelungen (Nr. 1), anders als beim SLA- Druck. Jedoch schneiden die kleinen Geometrien um einiges schlechter ab als die 2 größeren Geometrien. Von den 3 getesteten Materialien schneidet das Liqcreate Clear Impact am besten ab, wenn man Zyklenzahl kombiniert mit verfügbarem Hub kombiniert betrachtet. Das eher weiche Tough- X Material schneidet hier am schlechtesten ab, da es den größten Memory- Effekt aufweist. Das eher harte Material von Form Futura ist vom Memory- Effekt besser als die anderen Bälge, jedoch ist der Hub weitaus begrenzter und anfälliger zu brechen, da es wenig Dehnung aufweist.

**Ergebnisse für den Faltenbalg mit MJF- Verfahren:**

Wandstärke (WS)	Anzahl Zyklen	Hub / mm	Druck / bar	Ø Kraft /N	Bemerkung	Material	Geometrie
0,6	--	--	--	--	Druck nicht machbar	PA 12	Nr. 1
0,8	>16070	2	2	10	Resthub 1,6 mm	PA 12	Nr. 1
1	>10660	2	3	10	Resthub 1,3 mm	PA 12	Nr. 2

Tabelle 14: Auswertung getestete Faltenbälge MJF- Verfahren, Quelle: Eigene Darstellung.

**Verfahren:** MJF

**Maschine:** HP MultiJet Fusion

**Material:** TPU

**Geometrie des Faltenbalgs:** Nr. 1, Nr. 2

**Fazit:**

Die Faltenbälge aus dem 3D Drucker von HP stellen eine klar bessere Alternative zu den beiden Stereolithografie- Verfahren dar. Mit diesem Verfahren gelingt auch die kleine Geometrie Nr. 1 wesentlich besser. Vor allem bezüglich des Memory- Effektes, ist dieses Verfahren und Material am besten, bezüglich der bisherigen Tests.

**Ergebnisse für den Faltenbalg mit SLS- Verfahren:**

Wandstärke (WS)	Anzahl Zyklen	Hub / mm	Druck / bar	Ø Kraft /N	Bemerkung	Material	Geometrie
0,6	--	--	--	--	Druck nicht machbar	PP	Nr. 1
0,8	>18240	1	2,5	15	Resthub 1 mm	PP	Nr. 1
1,2	>11134	2	2	10	Resthub 1 mm	PP	Nr. 3

Tabelle 15: Auswertung getestete Faltenbälge SLS- Verfahren, Quelle: Eigene Darstellung.

**Verfahren:** SLS

**Maschine:** unbekannt (Materialise- Dienstleistung)

**Material:** PP

**Geometrie des Faltenbalgs:** Nr. 1, Nr. 3

**Fazit:**

Das Verfahren stellt sich gleich wie das MJF- Verfahren als sehr geeignet für diesen Aktor heraus. Jedoch weist das Polypropylen einen größeren Memory- Effekt auf als das zuvor getestete PA 12 mit dem MJF- Verfahren. Es gäbe jedoch auch sehr gute Alternativen mit Nylon, die ähnlich gute Effekte erzielen würde, wie das MJF- Verfahren.

**4.1.2.3 Fazit Teillösung Faltenbalg- Aktor**

Im Zuge dieser Teillösungen wurden mehr als 40 verschiedene Faltenbalgaktoren mit drei verschiedenen Geometrien gedruckt und getestet. Die Bälge, welche mit den beiden Stereolithografie- Verfahren gedruckt wurden, haben vor allem mit der kleinen Geometrie schlecht abgeschnitten. Mit den größeren Geometrien wurde dies besser, jedoch waren alle Lösungen von einem Memory- Effekt betroffen. Mit den beiden pulverbasierten Verfahren (MJF, SLS) war dies deutlich besser und die kleinen Geometrien sind auch wesentlich besser gelungen. Testteile mit dem FDM- Druck wurden im Zuge der Testreihe versucht zu drucken, jedoch sind diese in den 3 verfügbaren Geometrieformen nicht gelungen.

### 4.1.3 Soft- Robotic- Innengreifer

Soft Robotic Lösungen können sehr verschiedenartig ausgeprägt sein. Es geht im Wesentlichen darum einen Greiferfinger oder ein Greiforgan, so zu verformen, sodass ein Greifobjekt sicher gegriffen werden kann. Deswegen wird hier als Teillösung ein bestimmtes Beispiel aufgegriffen und untersucht. Für die Teillösung wird ein Soft- Robotic- Element definiert, welches ein rotationssymmetrisches Teil innen aufnehmen kann.

Untersucht werden verschiedene Lösungsansätze, mit welchem das Teil sicher gegriffen werden kann. Die Ansätze werden dann auf Nutzbarkeit und Zuverlässigkeit geprüft und miteinander verglichen. Der hauptsächliche Unterschied besteht in der verschiedenartigen Drucktechnologie. Es werden Lösungen mit dem FDM- Druck, MultiFusionJet, SLA/ DLP- Druck und dem SLS- Druck realisiert und geprüft.

#### 4.1.3.1 Geometrieerzeugung

Für die Erzeugung der Geometrie wird SolidWorks benützt. Die Geometrie ist im Wesentlichen ein hohler rotationssymmetrischer Körper, der bei Beaufschlagung von Luftdruck die Form ändert (Körper wird aufgebläht). Dadurch schmiegt sich der Körper an die Innenkontur des Greifobjekts an und hält dieses dadurch kraftschlüssig. Dieser Greifer wäre somit ein mögliches 3D gedrucktes Pendant zu den mechanischen Innengreifern, die im Kapitel 2.1.3.5 beschrieben wurden.

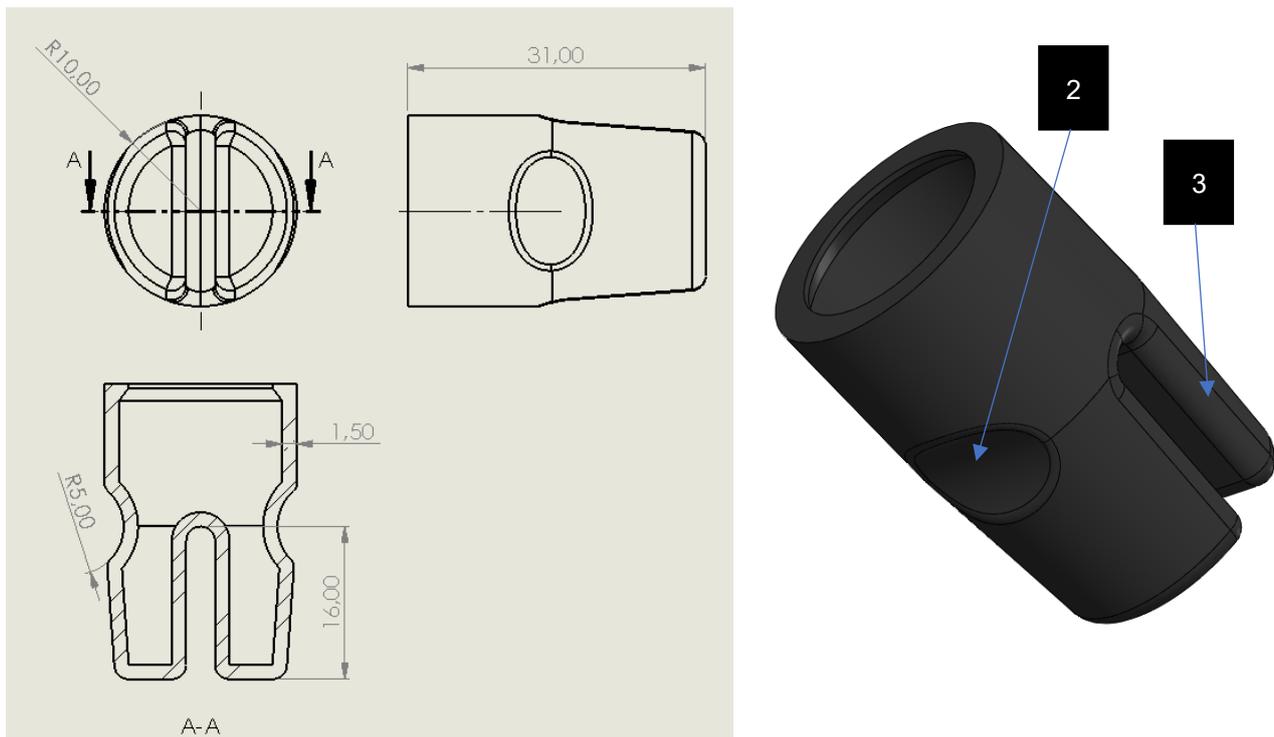


Abb. 74: Geometrie Soft- Robotic Innengreifer, Quelle: Eigene Darstellung.

Der hohle zylindrische Grundaufbau, mündet in zwei unterteilte Greiforgane (3) die durch einen Schlitz getrennt werden. Diese sollen durch den beaufschlagten Druck auseinanderklappen. Begünstigt wird das durch die runden Einbuchtungen (2), die jeweils seitlich angebracht sind.

Diese Geometrie bildet die Grundlage, für die nachfolgende FEM- Simulation der soften Innengreifer. Die Simulation wird für die zwei Drucktechnologien separat durchgeführt. Bevor die Simulation durchgeführt werden kann, muss ein geeignetes Materialmodell ausgewählt werden.

#### 4.1.3.2 Materialauswahl Soft- Robotic Greifer

Die Wahl fällt auf elastische Materialien, die eine hohe Bruchdehnung aufweisen. Mit der FDM- Drucktechnologie bieten sich hier TPU- Materialien an, wie zum Beispiel das Ninjaflex- Filament. Dieses Material ist ein druckbares thermoplastisches Polyurethan und weist laut Datenblatt bis zu 660 % Bruchdehnung auf. Dieses Material ist bereits im Soft- Robotics- Bereich getestet und es gibt bereits validierte Simulationsdaten<sup>101</sup>.

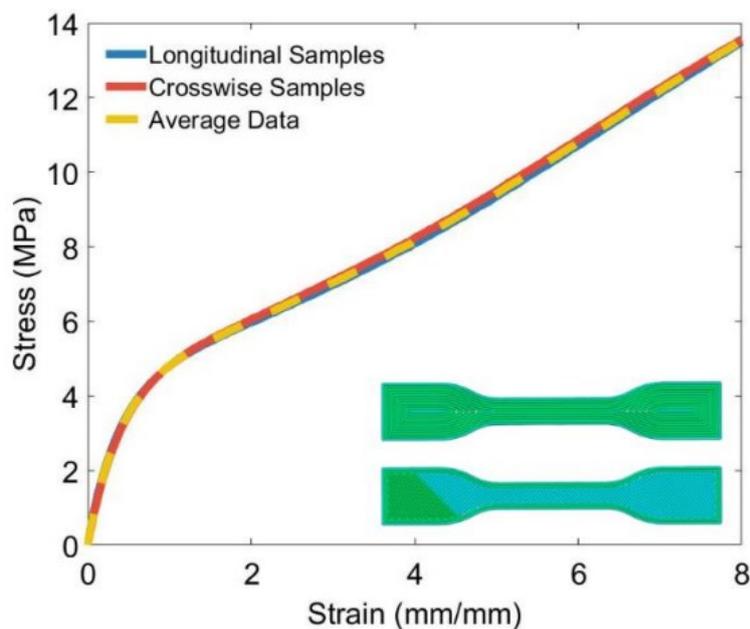


Abb. 75: Festigkeits- Dehnungs- Diagramm NinjaFlex, Quelle: Tawk/Alici (2020), S. 4.

#### Simulationssoftware:

Als FE- Simulationssoftware wird Ansys verwendet. Dabei wird die statisch- mechanische Analyse verwendet und die Geometrie vom CAD- System importiert. Da hierbei hyperelastische Materialien verwendet werden, müssen diese manuell im System definiert werden, da nur sehr wenige derartige Materialien in der Standardbibliothek vorhanden sind. Die genauen Parameter werden im nachfolgenden Kapitel beschrieben.

<sup>101</sup> Vgl. Tawk/Alici (2020), S. 3.

### 4.1.3.3 Simulation Soft- Robotic Innengreifer TPU

Als erstes wird das Material in der Bibliothek der Simulationssoftware definiert. Dazu wird eine hyperelastische Materialvorlage verwendet. Dann werden bei diesem die uniaxialen Versuchsdaten eingegeben. Als Materialmodell wird das Mooney- Rivlin- Modell verwendet. Laut Charbel Tawk passt das folgende Modell am besten zum NinjaFlex- Material.

Hyper-Elastic Material Model	Material Constant	Value (Unit)
Five-parameter Mooney-Rivlin	C10	-0.233 (MPa)
	C01	2.562 (MPa)
	C20	0.116 (MPa)
	C11	-0.561 (MPa)
	C02	0.900 (MPa)
	Incompressibility Parameter D1	0.000 MPa <sup>-1</sup>

Abb. 76: Mooney- Rivlin- Parameter NinjaFlex, Quelle: Tawk/Alici (2020), S. 7.

Nach der Materialzuweisung wird die Geometrie mit einem Netz bestehend aus Tetraedern abgebildet. Die Option für Nichtlineare- Mechanik wird aktiviert, sowie die maximale Netzgröße definiert. Die Netzgröße wird sorgfältig gewählt und auf ein konvergentes Ergebnis geachtet, sodass das Ergebnis nicht netzabhängig ist. Die Analyseinstellungen müssen auf große Verformung eingestellt werden, um das nichtlineare Material zu simulieren. Für die Simulation werden 20 „Substeps“ definiert, da sich der Druck nicht in einem Simulationsschritt vollständig entfalten soll. An der Oberseite wird das Modell fixiert und die Innenfläche des Soft- Elements mit dem entsprechenden Druck beaufschlagt.

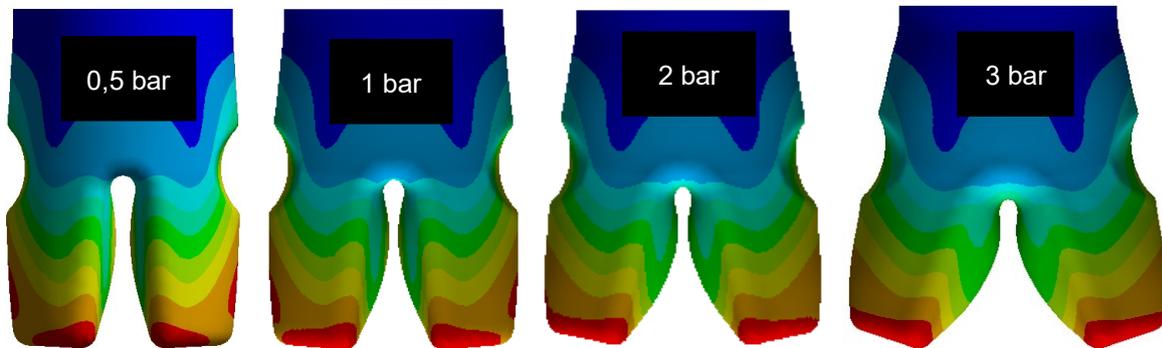


Abb. 77: Simulierte Verformung NinjaFlex- Innengreifer, Quelle: Eigene Darstellung

Auf der oberen Abbildung sind die Simulationsergebnisse für den Soft- Robotic Innengreifer zu sehen. Von links nach rechts kann man die ansteigende Verformung über den steigenden Druck beobachten. Konkrete Maximalwerte sind in der nachfolgenden Tabelle dargestellt.

Nr	Druck	Max. Gesamtverformung	Max. Vergleichdehnung	Max. Vergleichsspannung
1	0,5 bar	1,2 mm	0,68 %	0,8 MPa
2	1	2,23 mm	13 %	1,72 MPa

## Teillösungen

3	2	4,32 mm	27 %	3,43 MPa
4	3	6,38 mm	38 %	5,02 MPa

Tabelle 16: Ergebnisse NinjaFlex Innengreifer, Quelle: Eigene Darstellung.

In weiterer Folge werden mit dem FDM- Verfahren Versuchsteile gedruckt, um die Simulation zu validieren und erste Ergebnisse abzuleiten. Danach kann man Schlüsse ziehen, die Geometrie optimieren und mit anderen Verfahren (SLS, MJF, DLP) Versuchsteile produzieren.

### 4.1.3.4 Erster Versuch Soft- Robotic Innengreifer

Das genaue Bezeichnung für das verwendete TPU- Material lautet: [NinjaTek 3DNF0229005](#)

Material	<a href="#">NinjaTek 3DNF0229005</a>
Zugfestigkeit	26 MPa
Zugmodul	12 MPa
Bruchdehnung	660 %
Härte	85 Shore A

Tabelle 17: Materialwerte NinjaFlex, Quelle: NinjaTek, Online-Quelle [10.Okttober.2021].

Die Probe für den Versuch ist mit einem Ultimaker 2+ FDM- Drucker mit den entsprechenden Einstellungen gedruckt.

Dieser Versuchsaufbau wird dazu verwendet, um die Simulation zu validieren und die Zuverlässigkeit des Innengreifers zu prüfen. Dazu wird der Innengreifer den simulierten Versuchen entsprechend mit Druckluft versorgt.

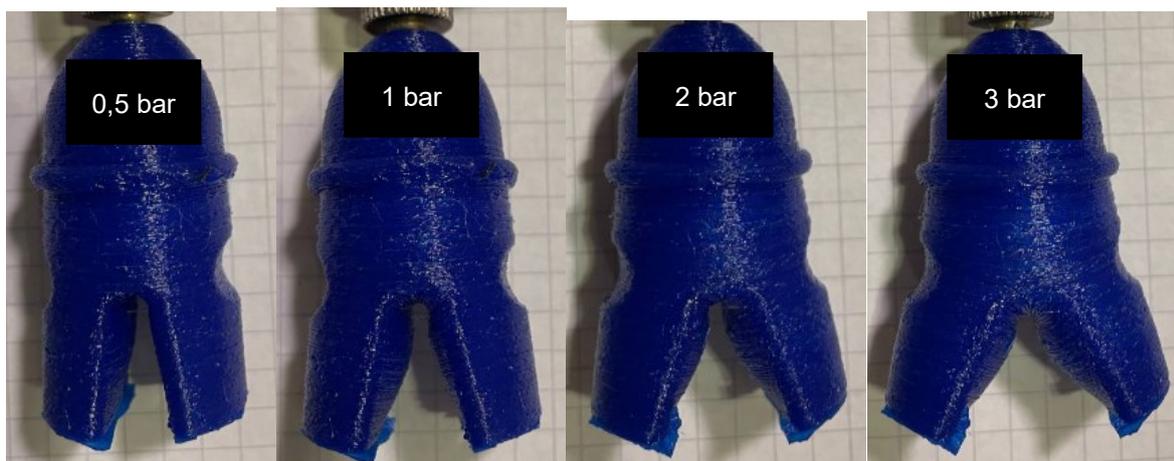


Abb. 78: Reale Verformung Soft- Robotic- Innengreifer (Versuch 1), Quelle: Eigene Darstellung.

Die Abb. 78 zeigt die tatsächliche Verformung der simulierten Innengreifer. Zusätzlich zu den simulierten Modellen hat die Probe noch ein Oberteil, wo der Pneumatikanschluss befestigt werden kann. Beim Testen der Proben hat sich herausgestellt, dass diese nicht dicht sind. Der Druck fällt nach wenigen

Sekunden wieder ab. Die Dichtheit reicht aber dazu aus, dass der Druck zu einem definierten Wert aufgebaut werden kann. Das heißt mit beaufschlagter Dauerluft sind die Innengreifer funktionsfähig, jedoch entweicht während dem Greifprozess kontinuierlich Luft und ist deshalb ineffizient und unsicher.

Durch Tauchen in ein wasserbasierendes Imprägniermittel (NanoSeal, medacom) ist der Innengreifer dicht und druckstabil. Laut Hersteller dringt das Mittel aufgrund der Kapillarkwirkung in die Poren ein und versiegelt das Material dauerelastisch. Der Innengreifer wurde 10 min in der Flüssigkeit getaucht und anschließend wurde der Soft- Robotic- Greifer 24 Stunden bei ca. 24 Grad Celsius getrocknet.



Abb. 79: Erfolg durch Abdichtung mit einem Imprägniermittel, Quelle: Eigene Darstellung.

Auf der Abb. 79 ist das verwendete Imprägniermittel, ein Verdichter mit der Displayanzeige (bar) und der angeschlossene Soft- Robotic- Innengreifer aus dem Versuch 1. Der Greifer konnte nach der Imprägnier-Behandlung den Druck über mehrere Minuten stabil halten.

### 4.1.3.5 Zweiter Versuch Soft- Robotic- Innengreifer

Das Material für den zweiten Versuchsdruck ist etwas härter als das erste TPU- Material. Da keine Simulationsdaten für dieses Material existieren, wird dieses direkt im 3D- Druck umgesetzt. Die genaue Bezeichnung dieses Materials lautet: PS-FLEX-285-0500-BK. Dieses wird von der Firma PrimaSelect™ hergestellt.

Material	PS-FLEX-285-0500-BK
Zugfestigkeit	24 MPa
Zugmodul	95 MPa
Bruchdehnung	530 %
Härte	45 Shore D

Tabelle 18: Materialwerte PrimaSelect, Quelle: PrimaCreator, Online-Quelle [12.Oktober.2021].

Die nachfolgende Probe für den Versuch ist mit einem Ultimaker 2+ FDM- Drucker mit entsprechenden Einstellungen gedruckt. Diese Lösung zeigt ein wesentlich steiferes Verhalten, welches auf das höhere Zugmodul und die größere Härte zurückzuführen ist. Die 45 Shore D- Härte entspricht ca. 90 Shore A und ist damit um einiges härter als das Pendant aus dem TPU NinjaFlex.



Abb. 80: Reale Verformung Soft- Robotic- Innengreifer (Versuch 2), Quelle: Eigene Darstellung.

Wie in der oberen Abbildung zu erkennen ist, dehnt sich das Material um einiges weniger aus. Jedoch ist das Material dicht und das Druckergebnis ist um einiges isotroper hinsichtlich der Verbindung der einzelnen Druckschichten. Das Ergebnis lässt sich problemlos bis 6 bar belasten. Der Druck entweicht bei dieser Lösung sehr langsam und erweist sich als vielversprechend.

Im Anschluss wird der Innengreifer nochmal überarbeitet und nochmal angepasst, um die Funktionalität zu optimieren. Dabei wird der Fokus auf die Scharnierfunktion der Greiforgane gelegt. Mit der optimierten Geometrie werden dann Prüfteile in einem Prüfstand mit SLS- Teilen, MJF- Teilen und FDM- Teilen getestet. Diese Ergebnisse werden dann entsprechend aufgezeichnet und in Tabellen dargestellt.

#### 4.1.3.6 Geometrieoptimierung

Die Simulation hat gezeigt, dass die höchstbelasteten Zonen in der Teilung zwischen den beiden Greiforganen sind. Daher ist anzunehmen, dass bei schwelender Dauerbelastung, der Greifer hier ehesten reißen würde. Infolgedessen wird die Geometrie in diesem Bereich optimiert, indem man mit einer runderen Design dem entgegenwirkt. Die Gegenüberstellung ist auf Abb. 82 abgebildet.

Die Optimierung der Geometrie hat folgendes ergeben:

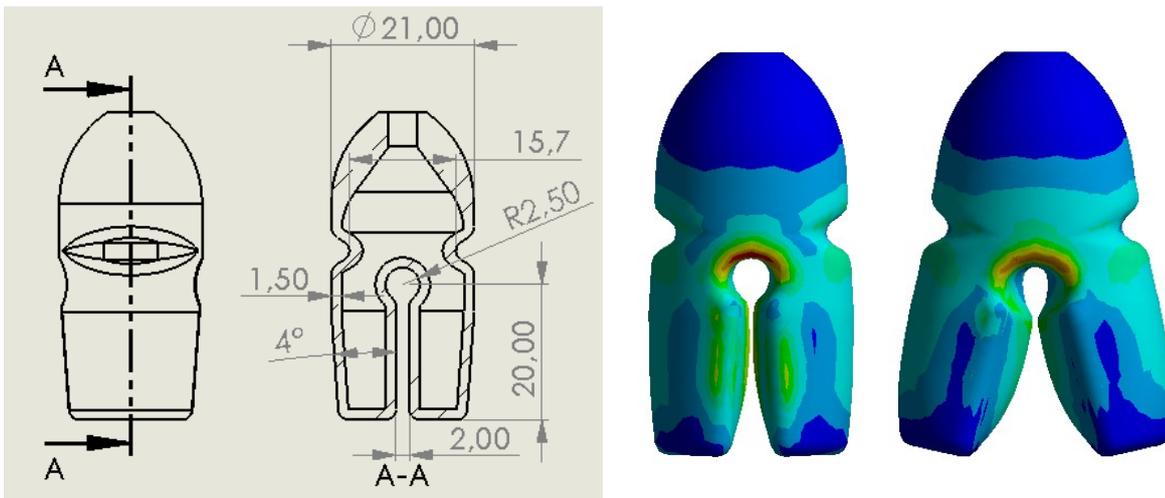


Abb. 81: Optimierte Geometrie Soft- Innengreifer, Quelle: Eigene Darstellung.

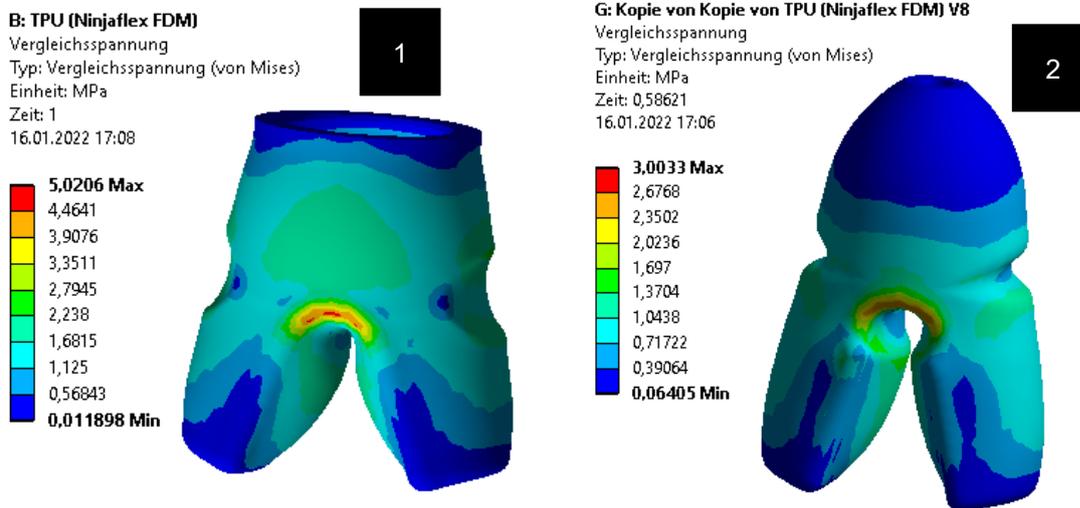


Abb. 82: Vergleich der Vergleichsspannung zwischen ersten Versuch und optimierter Geometrie, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Geometrie der nachfolgenden Prüfteile ist in der Abb. 81 mit den wichtigsten Abmessungen dargestellt. Die optimierte Geometrie ergibt bei der Simulation verbesserte Werte im Gegensatz zum ersten Entwurf, wie auf der Abb. 82 zu sehen ist. Auf der linken Bildhälfte ist der erste Versuch zu sehen und auf der rechten die optimierte Version. Die optimierte Version ist die Grundlage für die folgenden Prüflinge.

#### 4.1.3.7 Prüfaufbau für die einzelnen Soft- Innengreifer Prüflinge

Der Prüfaufbau ist ähnlich wie bei den Faltenbälgen aufgebaut. Hauptbestandteil des Prüfaufbaus sind ein Kraftsensor, Druckluftzufuhr und ein Mikrocontroller zur Automatisierung des Prüfablaufes. Die Daten werden über eine Verbindung zu einem PC seriell übermittelt und aufgezeichnet.

Auf der Abb. 83 ist der Prüfaufbau für die Soft- Robotic- Innengreifer abgebildet. Der Innengreifer (1) wird mit einem Kraftsensor auf Anschläge überprüft. Dieser Sensor wird von einem Arduino Uno Mikrocontroller-Board (4) ausgewertet. Neben einer seriellen Verbindung zu einem PC ist noch ein Display als Backup angeschlossen. Das Programm ist identisch zum Faltenbalg- Testaufbau.

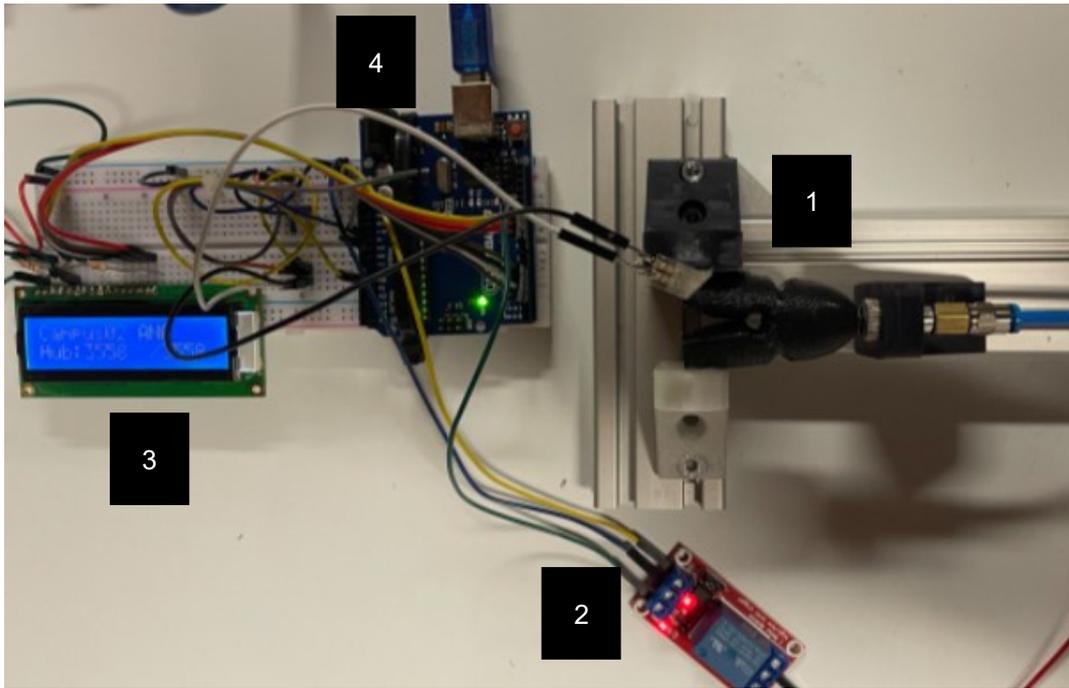


Abb. 83: Prüfaufbau Soft- Robotic- Innengreifer, Quelle: Eigene Darstellung.

#### 4.1.3.8 Prüfergebnisse für die einzelnen Soft- Innengreifer Prüflinge

Prüfling Nr.	Anzahl Zyklen	Druck / bar	Technologie	Maschine	Material	WS** / mm
1	>14419	6	FDM	UM 2+	PS- Flex	1,5
2	>18506	5	FDM*	UM 2+	NinjaFlex	2
3	--	10	SLS	k. A.	PP	1,5
4	>16500	5	MJF	HP MJF	TPU 90A-01	1,5
5	450	1,5	DLP	Anycubic Photon Mono X	Liqcreate Flexible- X	2

Tabelle 19: Ergebnisse Innengreifer, Quelle: Eigene Darstellung.

\*Wurde vor Testlauf imprägniert (NanoSeal)

\*\* Wandstärke des Innengreifers

#### 4.1.3.9 Fazit der Teillösung Soft- Robotic- Innengreifer

Die Teillösung wird zunächst mit einem ersten Entwurf eines solchen Innengreifers gestartet. Dabei wird der Entwurf mit einer FE- Analyse analysiert und mit ersten Druckproben validiert. Dabei hat sich herausgestellt, dass die Verformung des Innengreifers mit der Simulation korreliert, jedoch das TPU-Material von NinjaFlex nicht hermetisch dicht ist. Somit tritt kontinuierlich verdichtete Luft aus dem Aktor aus und kann ein Greifobjekt nur greifen, wenn dieser permanent mit Druck beaufschlagt wird. Ein alternatives FDM- Material ergibt hier wesentlich bessere Ergebnisse: PS-FLEX-285-0500-BK. Nach ersten Validierungs-versuchen wird die Geometrie optimiert und nachfolgend mit drei verschiedenen Technologien und Materialien geprüft. Die Ergebnisse und der Prüfaufbau sind im obigen Kapitel entsprechend dargestellt. Wenn bei den Ergebnissen ein größer als Zeichen angegeben wird, ist der Testlauf nach der angegebenen Anzahl beendet. Jedoch ist davon auszugehen, dass diese Greifer noch länger der Belastung standgehalten hätten. Die beiden getesteten FDM- Lösungen haben sehr gut funktioniert. Das Material PS- Flex hat nach dem Test einen sichtbaren Memory- Effekt aufgewiesen. Das NinjaFlex war bezüglich des Memory- Effekts das bessere Material. Das TPU aus dem MJF- Drucker hat ebenfalls sehr gut abgeschnitten. Es besteht eine große Anzahl an Zyklen und weist keinen störenden Memory- Effekt auf. Das Polypropylen aus dem SLS- Drucker hat sich für diese Anwendung als viel zu steif erwiesen. Dieses hat auch nach 10 bar Druckeinstellung kaum eine Bewegung aufgewiesen und ist daher nicht tauglich für diese Anwendung. Der Greifer aus dem DLP- Drucker hat sich als sehr flexibel und dehnbar erwiesen, jedoch ist dieses nicht sehr lang haltbar. Bereits nach 450 Zyklen ist der Greifer undicht. Als empfehlenswert für diesen Greifern haben sich die pulverbasierten Druckverfahren und das FDM- Druckverfahren mit TPU ähnlichen Materialien herausgestellt.

## 4.2 Teillösungen Sensorik

Die Teillösungen der Sensorik zeigen auf wie in Verbindung mit additiver Fertigung, solche optimal in einen 3D- gedruckten Greifer implementiert werden kann. Dieser Abschnitt behandelt zwei verschiedene Lösungsansätze: Zum einen wird im ersten Abschnitt der Einsatz von stromleitenden 3D- Druck Material in Greiferlösungen erarbeitet und beschreiben. Da ein solches Material überwiegend im FDM- Bereich als Filament erhältlich ist, wird auch die Lösung dahingehend verlaufen. Die zweite Teillösung stellt ein Dünnschicht- Drucksensor dar, welcher in Greiferfinger oder anderen kraftsensitiven Stellen untergebracht sein kann.

### 4.2.1 Elektrisch leitfähiges Filament

Dieser Abschnitt stellt den ersten Abschnitt der Sensor- Teillösungen dar. In dieser Teillösung geht es um einen druckbaren Werkstoff, der stromleitend ist. Die Recherche hat ergeben, dass es einige elektrisch leitfähig Werkstoffe gibt, die 3D- druckbar sind. Diese recherchierten Werkstoffe sind ausschließlich für das FDM- Verfahren in Filament- Form erwerbbar. Die meisten stromleitfähigen Filamente sind für ESD- Anwendungen vorgesehen und haben einen relativ hohen spezifischen Widerstand. Ein sehr geeignetes Filament für Sensoranwendungen stellt die [Firma Proto- Pasta](#) her: Das [Electrically- Conductive- PLA](#) ist

für simple elektrische Schaltungen und Touch- Anwendungen geeignet. Dieses PLA- Material ist ein Verbundwerkstoff, der Kohlenstoffpartikel beinhaltet, um elektrischen Strom leiten zu können.

Dabei ist PLA ein thermoplastisches teilkristallines Polymer, welches beim FDM- Verfahren weit verbreitet ist. Die Kohlenstoffpartikel werden aus unvollständigen Verbrennungen von Erdölvarianten gewonnen und sind derzeit aufgrund der Vielseitigkeit einer der häufigsten verwendeten Nanopartikel für die Eigenschaftsverbesserung von Gummi und Polymeren.<sup>102</sup>

Polymere haben normalerweise dielektrische Eigenschaften aufgrund ihrer Polymermatrix im inneren. Somit hängt die Stromleitfähigkeit direkt von der Verteilung der Kohlenstoffpartikel im Filament ab. Wie in der schematischen Darstellung von Abb. 84 gezeigt, die Leitung des elektrischen Stroms und daher der spezifische Widerstand des Materials hängt von der Bildung von CB-Aggregaten ab, die elektrische Pfade innerhalb des Verbundmaterials bilden. Diese elektrischen Pfade werden auf zwei Ebenen gebildet: 1) auf der Ebene des Filaments, wodurch eine elektrische Leitung entlang der Richtung des Filaments bereitgestellt wird; 2) auf der Ebene zwischen den Filamenten, wodurch eine elektrische Leitung zwischen verschiedenen Filamenten bereitgestellt wird. Diese Merkmale und die Unterschiede zwischen der Ausbildung von elektrischen Pfaden innerhalb und zwischen den Filamenten bestimmen somit die Eignung des leitfähigen Verbundmaterials und den Einfluss der Druckrichtung.<sup>103</sup>

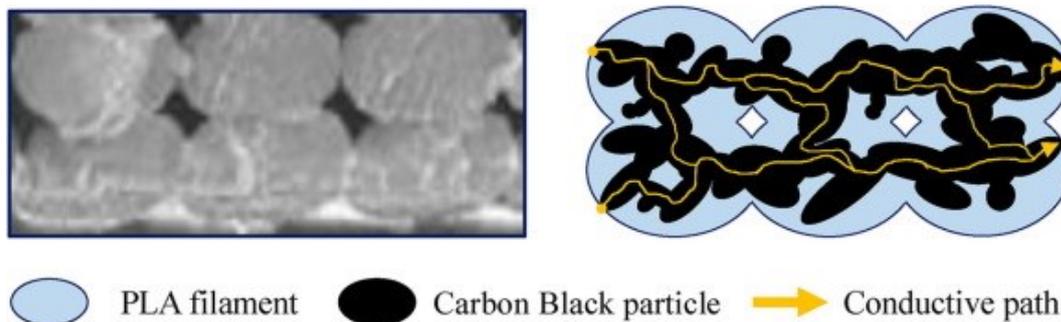


Abb. 84: Aufbau leitfähiges Filament, Quelle: Tirado-Garcia/Garcia-Gonzalez/Garzon-Hernandez/Rusinek/Robles/Martinez-Tarifa/Arias (2021), Online-Quelle [12.September .2021], S. 3.

Dabei spielt die Ausrichtung des Drucks eine Rolle. Denn der Widerstand des gedruckten Filaments verändert sich mit der Ausrichtung. Im normalen Winkel ( $90^\circ$ ) zu den Druckschichten ist dieser am höchsten und entlang der Schichten ist dieser am niedrigsten. Aus diesem Grund werden Testblöcke ausgedruckt und bezüglich des Widerstandes gemessen.

Zu diesem Zweck werden verschiedene Messproben gedruckt, um das Material charakterisieren zu können. Die Messblöcke werden eine Querschnittsbreite von 3 mm bis 8 mm aufweisen. Diese werden in unterschiedlichen Längen gemessen, da die Länge auch einen Einfluss auf den elektrischen Widerstand hat. Die Messproben und der Messvorgang werden nachfolgend dargestellt.

<sup>102</sup> Vgl. Tirado-Garcia/Garcia-Gonzalez/Garzon-Hernandez/Rusinek/Robles/Martinez-Tarifa/Arias (2021), Online-Quelle [12.September .2021], S. 2.

<sup>103</sup> Vgl. Tirado-Garcia/Garcia-Gonzalez/Garzon-Hernandez/Rusinek/Robles/Martinez-Tarifa/Arias (2021), Online-Quelle [12.September .2021], S. 3.

Laut Datenblatt (befindet sich im Anhang) ist der spezifische Widerstand mit 30 Ohm – cm entlang der Schichten festgelegt und gegen die Schichten mit 115 Ohm – cm festgelegt. Dabei soll ein 10 cm langes Filament mit dem Durchmesser 1,75 mm einen Widerstand von 2 – 3 Kiloohm aufweisen und ein Filament mit 2,85 mm Durchmesser und der Länge von 10 cm 800 – 1200 Kiloohm aufweisen.

#### 4.2.1.1 Messung ungedrucktes Filament

In diesem Unterabschnitt werden Filament- Stücke von der Rolle in unterschiedlichen Längen abgeschnitten und der elektrische Widerstand gemessen.

Nr.	Länge / mm	Querschnitt /mm	Widerstand / $\Omega$
1	10	$\varnothing$ 1,75	830
2	20	$\varnothing$ 1,75	1150
3	30	$\varnothing$ 1,75	1540
4	40	$\varnothing$ 1,75	2170
5	50	$\varnothing$ 1,75	2650
6	60	$\varnothing$ 1,75	2945
7	70	$\varnothing$ 1,75	3060
8	80	$\varnothing$ 1,75	3630
9	90	$\varnothing$ 1,75	4550
10	100	$\varnothing$ 1,75	4620

Tabelle 20: Messergebnisse ungedrucktes Filament, Quelle: Eigene Darstellung.

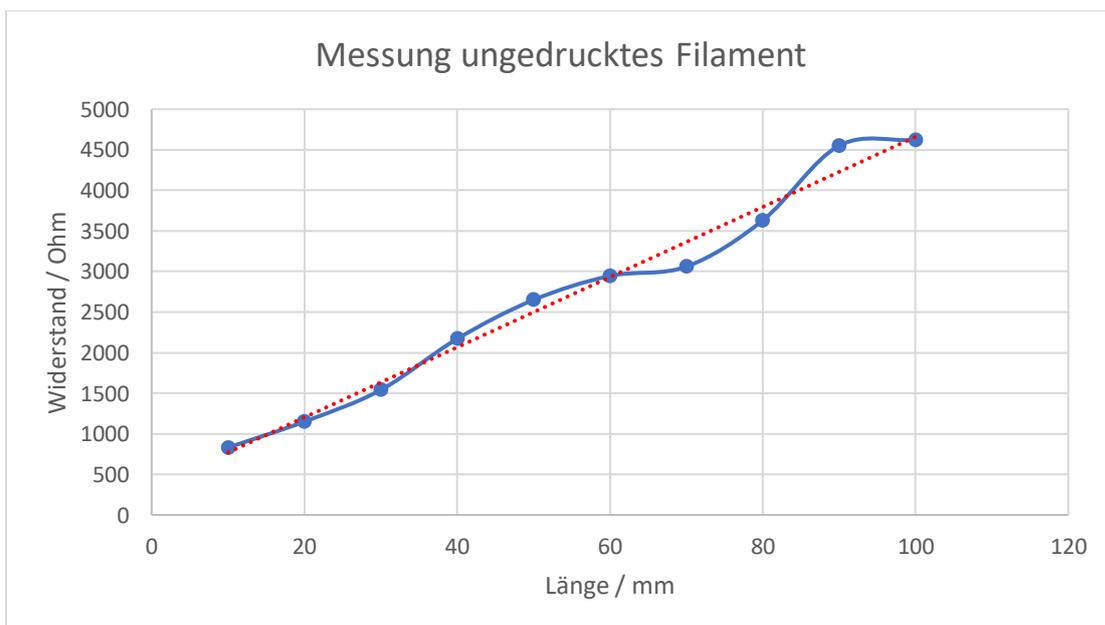


Abb. 85: Diagramm Messung ungedrucktes Filament, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Messung wird mit einem Multimeter- Messgerät bei 25 °C durchgeführt. Für die Messung wird ein Teilstück des Filaments abgeschnitten und in ein Steckbrett eingelegt. Das Lineal in der Abb. 86 dient zum Anlegen der Elektroden auf das entsprechende Maß.



Abb. 86: Messung ungedrucktes Filament, Quelle: Eigene Darstellung.

Nach dieser Messung ist klar, dass das Filament fähig ist elektrischen Strom zu leiten. Jedoch ist dieses Filament nicht als Leiter anzusehen, sondern als ein elektrischer Widerstand. Am Diagramm von Abb. 85 ist zu erkennen, dass je mehr Länge der elektrische Strom durchfließen muss, desto mehr Widerstand auftritt. Der Anstieg des Widerstandes verläuft dabei in etwa linear, wenn man auf die rote Trendlinie achtet. Mit ansteigender Messlänge des Filaments steigt aber auch die Toleranz der gemessenen Werte. Das heißt die Messung verfügt mit ansteigender Länge, über immer weniger Wiederholgenauigkeit.

Die nachfolgenden Messungen werden mit tatsächlich gedruckten Proben durchgeführt. Die Proben besitzen dabei einen quadratischen Querschnitt und haben entlang des Querschnitts Vertiefungen für die Elektroden des Messgerätes (Multimeter- Messgerät). Diese Vertiefungen entsprechen den einzelnen vorgesehenen Messlängen.



Abb. 87: Messprobe ProtoPasta, Quelle: Eigene Darstellung

#### 4.2.1.2 Messung gedrucktes Filament entlang der Schichten

Nr.	Länge / mm	Querschnitt /mm	Widerstand / $\Omega$						
1	10	■ 3	240	■ 5	180	■ 7	162	■ 9	145
2	20	■ 3	393	■ 5	257	■ 7	220	■ 9	209
3	30	■ 3	550	■ 5	323	■ 7	266	■ 9	236
4	40	■ 3	737	■ 5	406	■ 7	308	■ 9	273
5	50	■ 3	898	■ 5	485	■ 7	359	■ 9	301
6	60	■ 3	1051	■ 5	562	■ 7	407	■ 9	323

Tabelle 21: Ergebnisse Messung entlang der Schichten, Eigene Darstellung.

Die Tabelle 21 zeigt die gemessenen Werte für gedruckte Messproben, wenn die Stromrichtung entlang der gedruckten Fasern zeigt.

#### 4.2.1.3 Messung gedrucktes Filament entgegen den Schichten (90°)

Nr.	Länge / mm	Querschnitt /mm	Widerstand / $\Omega$						
1	10	■ 3	351	■ 5	172	■ 7	158	■ 9	200
2	20	■ 3	528	■ 5	280	■ 7	227	■ 9	241
3	30	■ 3	750	■ 5	381	■ 7	280	■ 9	280
4	40	■ 3	979	■ 5	483	■ 7	350	■ 9	345
5	50	■ 3	1206	■ 5	600	■ 7	414	■ 9	416
6	60	■ 3	1450	■ 5	712	■ 7	479	■ 9	431

Tabelle 22: Ergebnisse Messung entgegen den Schichten, Eigene Darstellung.

#### 4.2.1.4 Messung schräg gedrucktes Filament (45°)

Nr.	Länge / mm	Querschnitt /mm	Widerstand / $\Omega$						
1	10	■ 3	290	■ 5	230	■ 7	175	■ 9	225

2	20	■ 3	485	■ 5	340	■ 7	245	■ 9	250
3	30	■ 3	695	■ 5	440	■ 7	330	■ 9	298
4	40	■ 3	915	■ 5	530	■ 7	390	■ 9	365
5	50	■ 3	1130	■ 5	620	■ 7	455	■ 9	415
6	60	■ 3	1350	■ 5	728	■ 7	520	■ 9	445

Tabelle 23: Ergebnisse Messung schräg gedrucktes Filament, Eigene Darstellung.

**Fazit der Messungen:**

Die Messungen haben gezeigt, dass mit der anwachsenden Länge des Filaments der Widerstand steigt, wie beim ungedruckten Filament zuvor. Jedoch spielt die Anisotropie des FDM- Druckes eine Rolle für die Leitfähigkeit der Proben. Veranschaulicht wird das in im nachfolgenden Diagramm. Dabei ist zu erkennen, dass der günstigste Fall für die Stromrichtung entlang der Schichten ist. Die Stromrichtung 45° entgegen den Schichten oder 90° entgegen den Schichten stellt jedes Mal einen Offset zum Ersteren dar. Weiters wäre zu bemerken, dass die Steigerung des Widerstandes bei den flach gedruckten Proben niedriger ausfällt als bei den anderen zwei Proben, wo die Steigung sich ähnlicher ist.

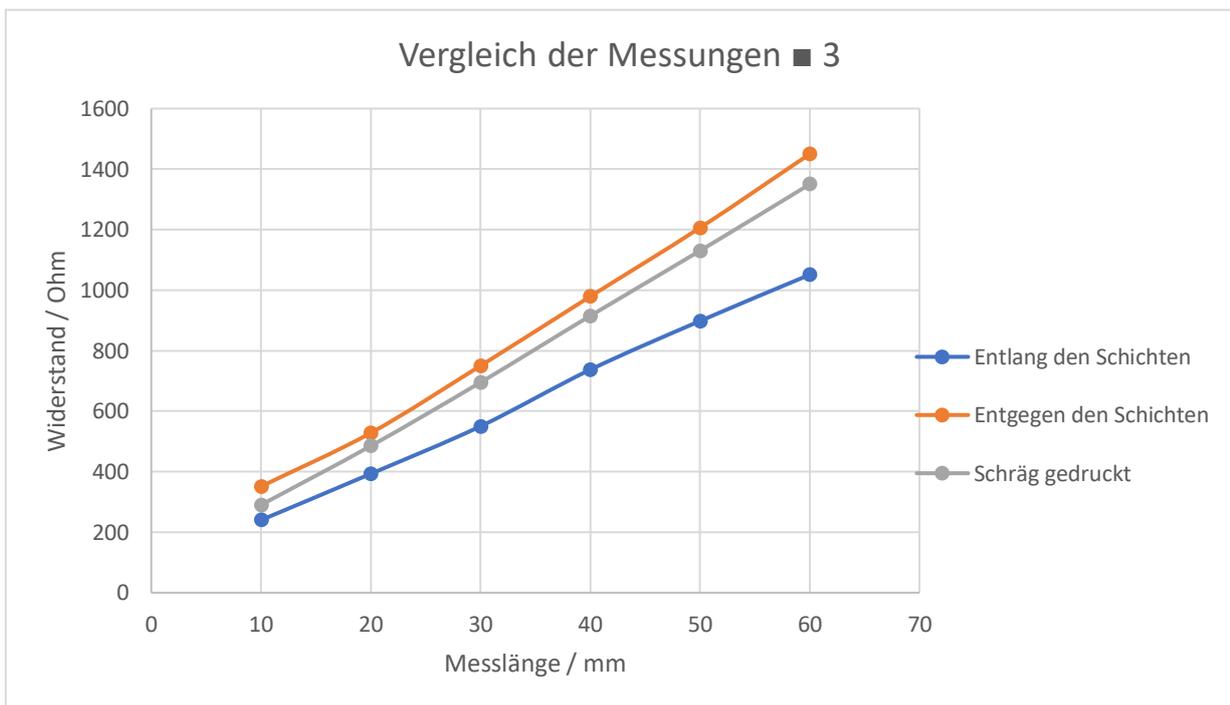


Abb. 88: Vergleich der Messungen am ProtoPasta Filament (Anisotropie), Quelle: Eigene Darstellung.

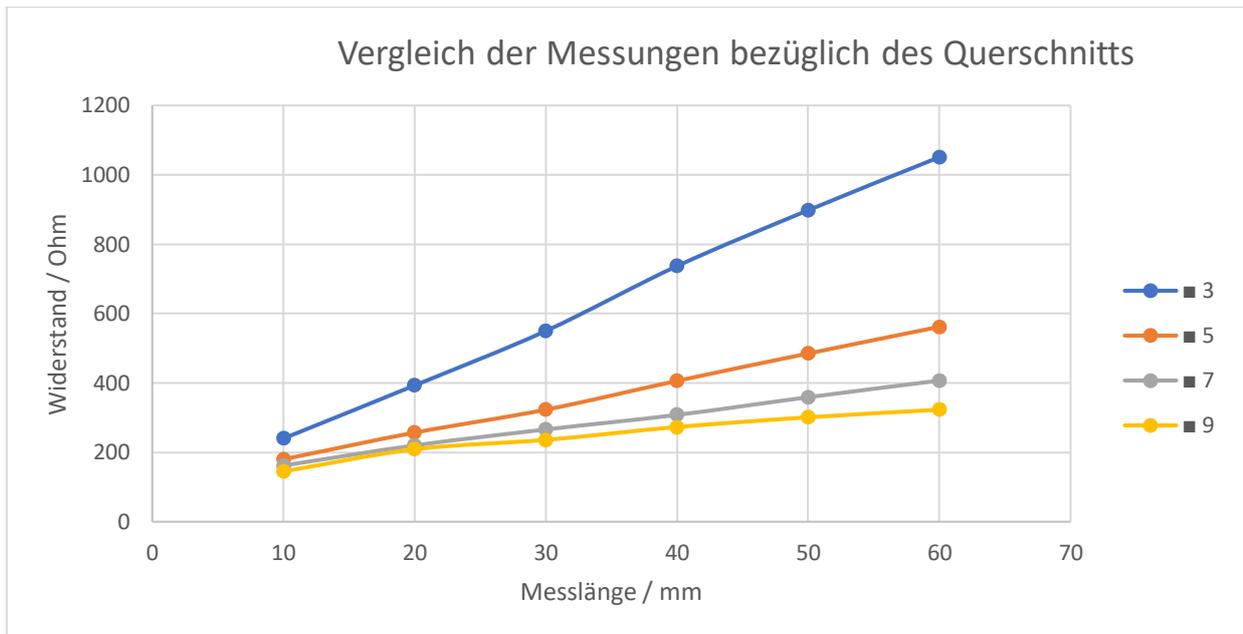


Abb. 89: Vergleich der Messungen anhand des Querschnittes, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Abb. 89 zeigt den Vergleich der Querschnitte bei den flach gedruckten Proben. Das gezeigte Diagramm zeigt, je größer der Querschnitt ist, desto kleiner wird der Widerstandsanstieg über die Länge des Leiters. Am Ausgangspunkt starten die Kennlinien mit kleineren Offset- Werten und der Offset zwischen den Kennlinien steigt mit wachsender Länge.

#### 4.2.1.5 Beispiel für den Einsatz am 3D- Druck Robotergreifer

Es wird anhand eines Beispiels geklärt, wie die Anbindung der benötigten Medien an die Robotersteuerung aussehen kann. Im Falle des gezeigten Beispiels wird ein Kontakt über zwei Leitungen geschaltet und dadurch das Signal an den Roboter ausgegeben. Die naheliegendste Lösung wäre mit 2 Drähten direkt auf die Robotersteuerung zu gehen und dadurch das Signal durchzuschalten. An der Robotersteuerung müssen am Eingangswiderstand jedoch 18,6 V abfallen damit das Signal den digitalen Input schaltet. Da das gedruckte Filament je nach Gestaltung und Ausformung am Roboter einen eher großen Widerstand darstellt, wird der Großteil der Spannung am Sensor selbst und nicht an der Robotersteuerung abfallen. Daher muss eine Lösung gefunden werden, um das Signal durchzuschalten.

Für die Realisierung dieser Anwendung wird ein Mikrocontroller D1 mini und Optokoppler verwendet. Der D1 Mini wertet das Signal aus und der Optokoppler überträgt galvanisch getrennt das Signal zur Robotersteuerung. Da die Robotersteuerung eine Spannungsversorgung mit 24 V zur Verfügung stellt, muss diese zur Versorgung des Mikrocontrollers auf unter 10 Volt geregelt werden.

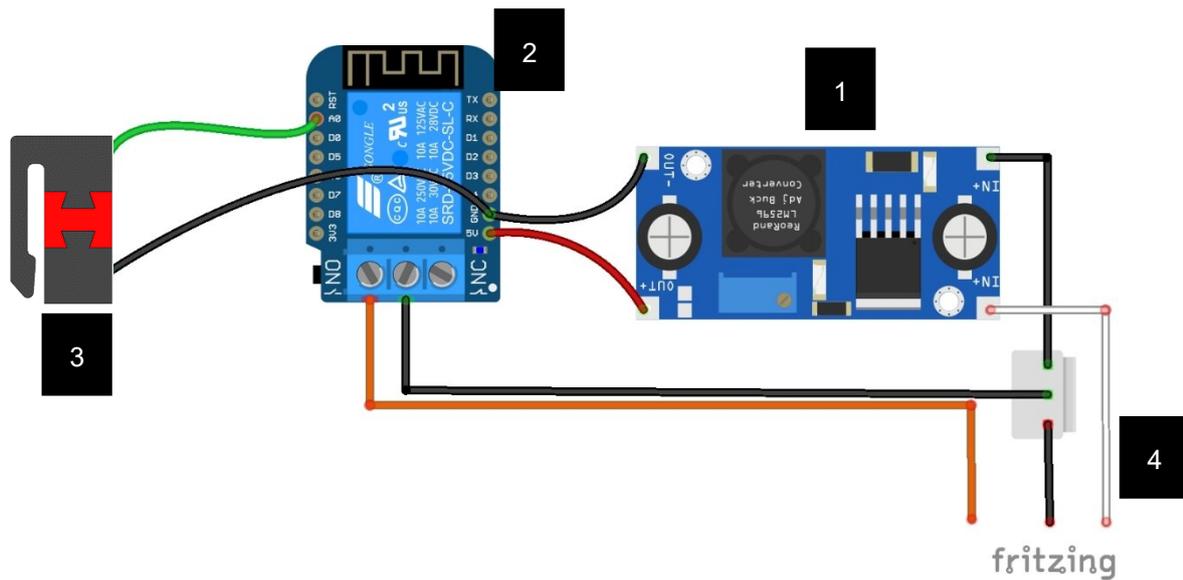


Abb. 90: Schema Sensorauswertung, Quelle: Eigene Darstellung.

Auf der oberen Abbildung ist der Spannungsregler (1) zu erkennen. Dieser sorgt dafür, dass die 24 V DC Spannung der Robotersteuerung auf 5 V Versorgungsspannung für den Mikrocontroller (2) reduziert wird. Auf dem Mikrocontroller (D1 mini) ist ein Optokoppler- Modul aufgelötet, welches das Schaltsignal an die Robotersteuerung schaltet. Der Sensor mit dem leitenden Filament (3) ist auf der linken Bildseite zu erkennen. Dieser wird analog ausgewertet, um einen gewissen Spannungsbereich für ein sicheres Schaltsignal abzudecken. Da der Sensor selbst durch den Werkstoff einiges an Widerstand aufweist (je nach Ausführung und Größe) benötigt man hier keinen eigenen Vorwiderstand. Der Sensor und die Auswertung wird über 3 Drähte (4) versorgt und wird in weiterer Folge in einem entsprechenden Sensor/ Aktor- Buchse münden. Über diese kann man den Sensor an die Robotersteuerung, mit in der industriellen Automatisierung üblichen Sensorleitungen, anschließen.

Eine solche Lösung mit einer Kontaktschaltung, wird nachfolgend im Zuge einer Demolösung umgesetzt und präsentiert.

## 4.2.2 Integrierter Dünnsfilm- Drucksensor

Diese Teillösung zeigt anhand eines Beispiels wie die Integration eines Dünnsfilm- Drucksensors bei einem additiv gefertigten Roboter Greifer aussehen kann. In diesem Beispiel wird ein Drucksensor des Typs FSR (Force Sensing Resistor™) 402 verwendet.

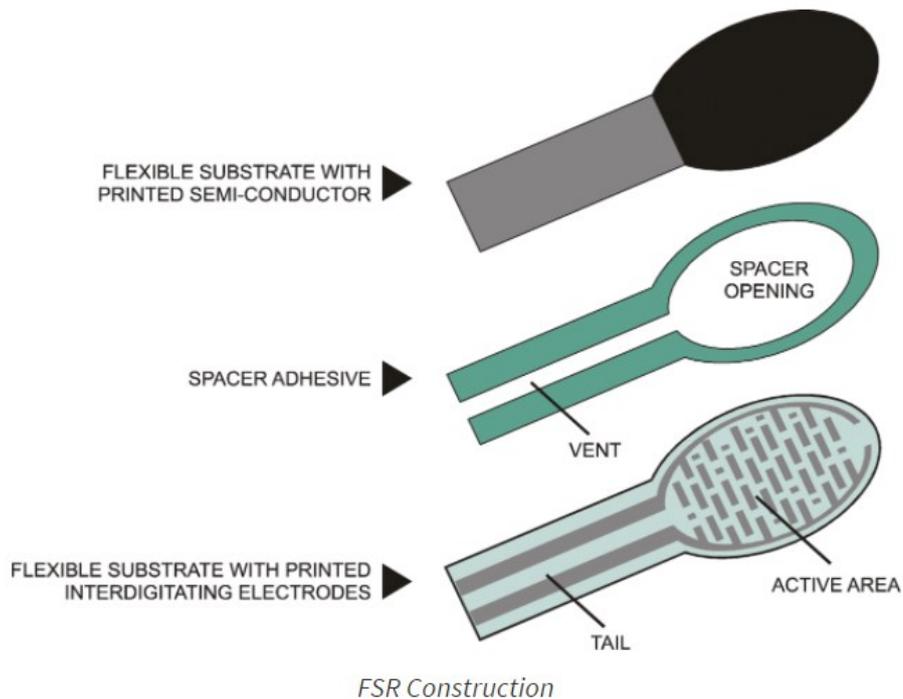


Abb. 91: Aufbau eines FSR- Sensors, Quelle: makerguides.com, Online-Quelle [30.Oktober.2021].

Dieser Sensortyp ist sehr flexibel und sehr dünn gebaut. Dadurch lässt sich dieses Element sehr gut in eine Greiferfinger- Struktur einbetten. Jedoch ist dieser Sensor ein analoges Element und kann deswegen nicht ohne weiteres direkt an die Robotersteuerung angeschlossen werden.

Der Sensor gibt je nach Druck auf die Sensorfläche (Active Area) einen anderen Widerstandswert aus. Wenn der Druck gleich null ist, gibt der Sensor einen sehr hohen Widerstand aus, wenn der Druck steigt, wird der Widerstandswert immer niedriger. Das nachfolgende Diagramm gibt Aufschluss über das Verhalten des FSR 402 Sensors.

Der Sensor ist optimiert für die Benützung durch Menschen in elektronischen Geräten, medizinischen Systemen und für die Verwendung in industriellen Robotik- Anwendungen. Die Auslösekraft des Sensors beläuft sich auf 0,1 N und hat eine Bandbreite von 0,1 N bis 100 N. Die Wiederholgenauigkeit ist mit +/- 2% angegeben. Bei Nichtbelastung des Sensors ergibt sich ein Widerstand von 10 Megaohm.<sup>104</sup>

<sup>104</sup> Interlink Electronics, Online-Quelle [17..September.2021], S. 1f.

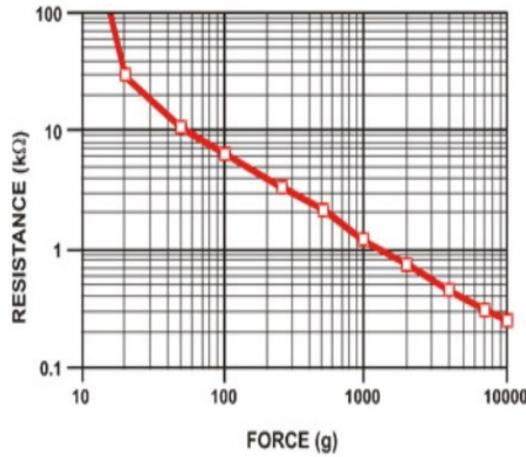


Abb. 92: Kraft- Widerstands Diagramm FSR 402, Quelle: Interlink Electronics, Online-Quelle [17..September.2021], S. 1.

Um den Sensor zuverlässig einsetzen zu können, wird ein Spannungsteiler eingesetzt. Die ausgegebene Spannung wird folgendermaßen beschrieben.

$$U_{AUS} = \frac{R * U}{R + R_{FSR}} \quad (4.1)$$

R ..... Referenzwiderstand für den Spannungsteiler

U ..... Spannungsquelle

R<sub>FSR</sub> ..... Veränderlicher Widerstand des FSR 402

Die nachfolgende Abbildung gibt Aufschluss über die elektrische Schaltung, welche nötig ist, um den Sensor zu realisieren. Dabei ist U die Spannung, welche von der Spannungsquelle angelegt wird. Der Widerstand R<sub>FSR</sub> ist stellt den Sensor FSR 402 dar. Der Widerstand R stellt die Referenz für die Messung dar. In der Abb. 94 ist der Verlauf der Kräfte aufgetragen über die Ausgangsspannung U<sub>AUS</sub>. Dabei ist der Verlauf abhängig von der gewählten Größe des Referenzwiderstandes. Der 10 k Ω- Widerstand stellt die beste und linearste Variante dar, wenn man die gesamte Bandbreite des Sensors nutzen möchte.

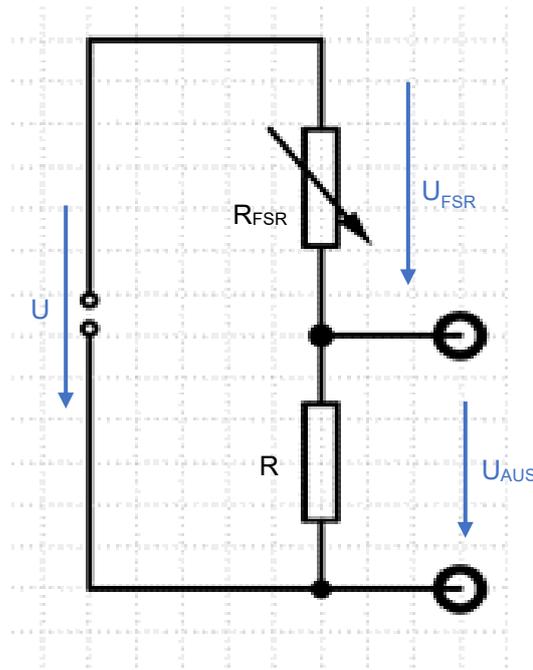


Abb. 93: Schaltung FSR Signal messen, Quelle: Eigene Darstellung.

Wie in der Abb. 93 zu sehen ist, wird bei der Implementierung des Sensors das Ausgangssignal des Referenzwiderstandes gemessen. Naturgemäß eines Spannungsteilers teilt sich die Spannung zwischen den zwei Widerständen auf. Je nach Größe des verstellbaren Widerstandes  $R_{FSR}$  ändert sich der Spannungsabfall am Referenzwiderstand  $R$ . Je größer der Spannungsabfall bei  $R$  wird, desto kleiner wird der Widerstandswert beim  $R_{FSR}$ .

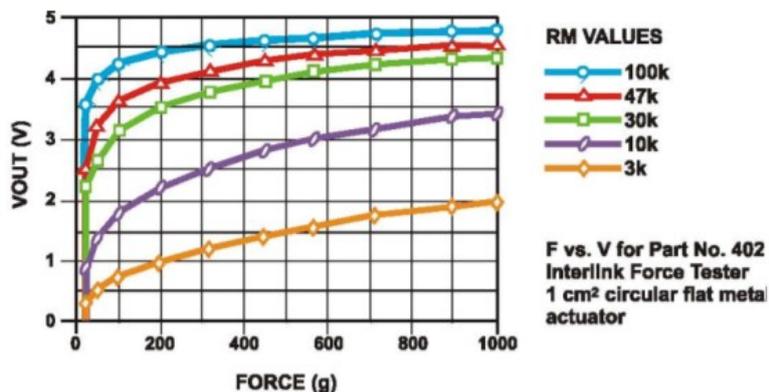


Abb. 94: Spannungs- Kraftverlauf im Spannungsteiler (FSR 402), Quelle: Interlink Electronics, Online-Quelle [17..September.2021]

Die Implementierung des Sensors direkt in die Robotersteuerung wäre möglich, durch die Übergabe des Analogwertes in die analogen Eingänge der Robotersteuerung. Dadurch könnte man den entsprechenden Wert abfragen und damit weiterarbeiten. Jedoch ändert sich je nach Hersteller des Roboters und deren verwendeten Steuerungssystemen die Herangehensweise. Damit ist dies immer mit einigen Aufwand verbunden und im Vergleich zu am Markt erhältlichen Sensorsystemen sehr aufwändig. Daher wird das Sensorsystem so ausgelegt, sodass dies ein eigenständiges System ist und der Robotersteuerung ein binäres Signal übergibt. Das heißt konkret: Wenn Greifer mit der am Sensor kalibrierten Kraft greift, dann

schaltet ein entsprechendes Element durch und das Signal kommt beim Roboter an. Wenn das Signal nicht entsprechend geschaltet wird, dann schaltet das Element nicht durch.

#### 4.2.2.1 Realisierung der Sensorschaltung mit einem Mikrocontroller

Für die Realisierung der Schaltung wird eine Mikrocontrollerschaltung angestrebt. Durch den Einsatz des Mikrocontrollers hat man die Möglichkeit den Sensor auf die benötigte Kraft zu kalibrieren und dadurch unabhängig vom Robotersystem zu sein. Das folgende Schema zeigt den Aufbau des Sensorsystems.

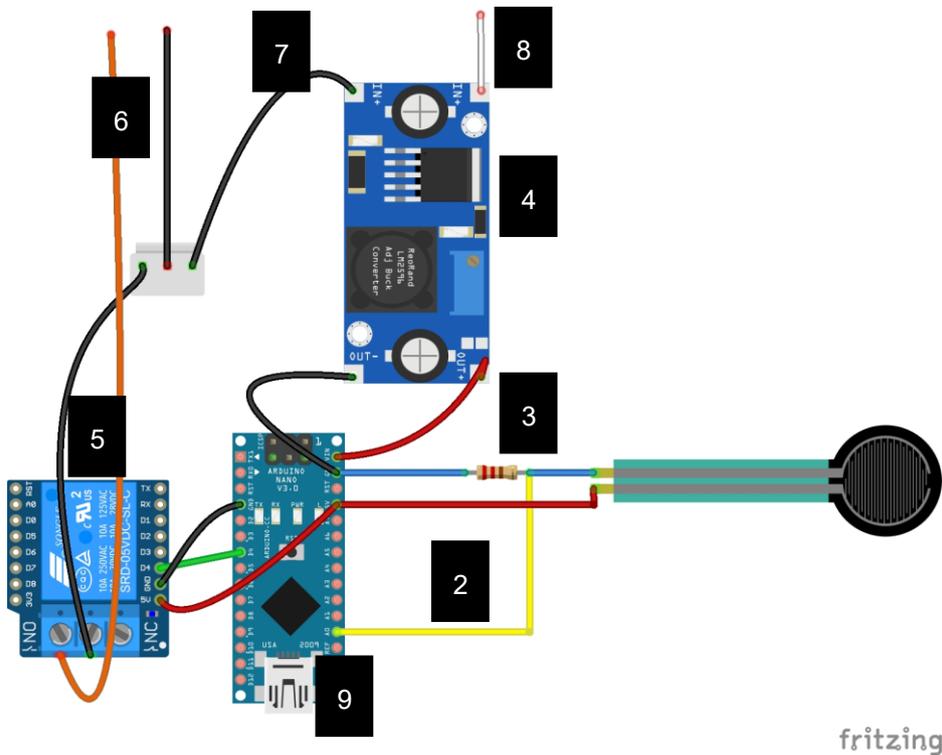


Abb. 95: Schema des FSR- Sensors für den Robotergrifer, Quelle: Eigene Darstellung.

Auf der Abb. 95 ist der FSR (1) zu erkennen der über den Referenzwiderstand (3) an mit der Spannungsversorgung und Analogeingang des Mikrocontrollers (2) verbunden ist. Der Spannungsregler (4) sorgt dafür, dass die 24 V Spannung des Roboters auf die erforderlichen 5 V für den Mikrocontroller geregelt wird. Das Relais (5) wird bei der kalibrierten Kraft durchgeschaltet und die Robotersteuerung erhält das Signal. Die orange dargestellte Leitung (6) stellt den Digital Input für die Robotersteuerung dar. Die Leitung (7) stellt den 0 V (Masse) der Robotersteuerung dar. Die Leitung (8) stellt die Spannungsversorgung 24 V der Robotersteuerung dar. Der Micro- USB (9) ist für die Kalibrierung des Sensors vorgesehen.

#### **Beispiel für einen additiv gefertigten Druckschalter:**

Der FSR- Sensor wird durch einen Betätiger entsprechend ausgelöst. Dies wird in diesem Fall durch ein Soft- Robotic- Element aus dem 3D- Drucker umgesetzt. Dieses Element ist mit dem 3D- Drucker hergestellt mit einem TPU- Basismaterial (wie beim Soft- Robotic- Innengreifer). Zu diesem Zweck wird der FSR- Sensor in einen knappen Zwischenraum des Betätigers eingeführt. Durch Beaufschlagung des Drucks dehnt sich der Betätiger entsprechend aus und übt eine Kraft auf die aktive Fläche des Sensors aus. Dieser wird dann entsprechend, wie vorher beschrieben, ausgewertet.

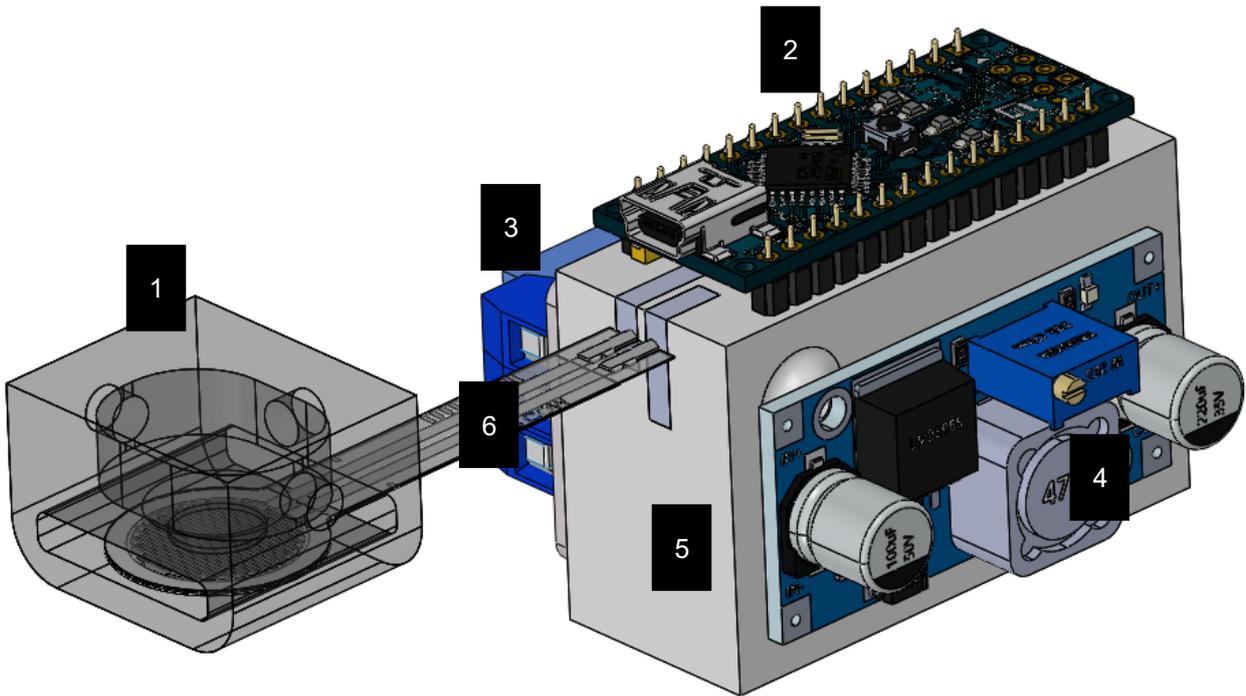


Abb. 96: Umsetzung eines Druckschalters, Quelle: Eigene Darstellung.

Auf der oberen Abbildung ist eine umgesetzte Version eines Sensors zu sehen, welcher mit dem 3D-Drucker umgesetzt wird. Der Betätiger (1) ist aus TPU gedruckt, welcher den FSR- Sensor (6) betätigt. Der FSR- Sensor ist direkt mit einem gedruckten Steckbrett (5) verbunden auf welchem der Mikrocontroller (2), der Spannungsregler (4) und der Optokoppler (3) sitzen. Das Steckbrett besitzt aus ProtoPasta (Electrically Conductive PLA) gedruckte Bahnen, sodass der Sensor direkt an dem Steckbrett angeschlossen werden kann. Der Optokoppler und der Spannungsregler werden direkt mit dem Mikrocontroller verbunden, da der Widerstand durch das leitende Filament zu groß werden würde, um den Controller sicher zu betreiben.

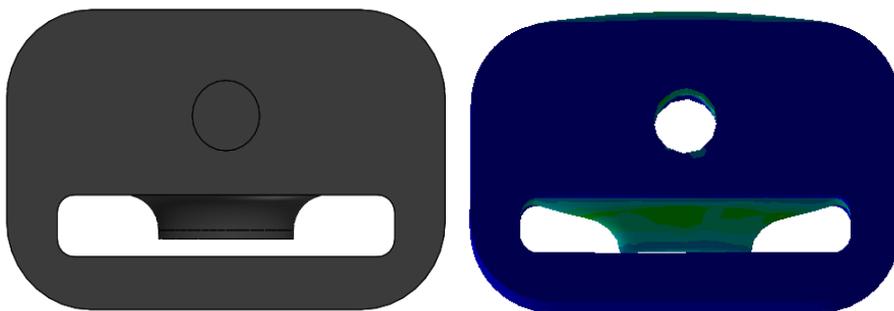


Abb. 97: Verformung des Betätigers durch Druckluft, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Abb. 97 zeigt die Verformung (FE- Simulation) des Betätigers, wenn Druckluft in den Betätiger eindringt. Durch die Belastung wird dieser ausgedehnt und es entsteht eine Kraft, die auf den FSR- Sensor einwirkt, da dieser im Schlitz angebracht ist.

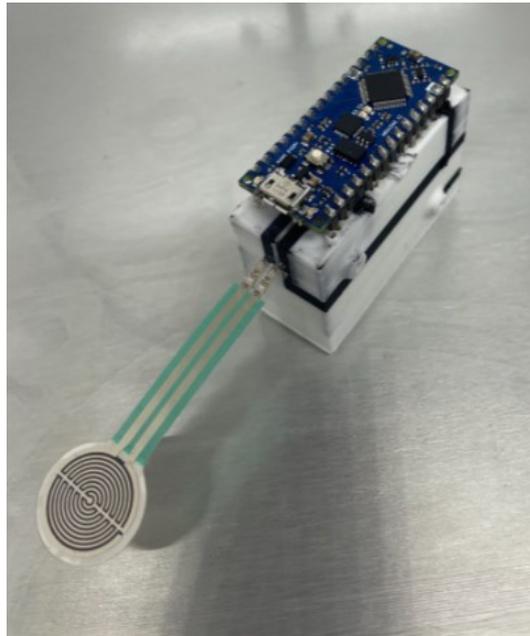


Abb. 98: Umsetzung des Steckbretts im Multimaterialdruck, Quelle: Eigene Darstellung.

Auf der Abb. 98 ist die Umsetzung des gedruckten Steckbretts zu sehen. Dieses wurde im Multimaterial-Verfahren mit einem Ultimaker S5 umgesetzt. Das isolierende Material ist durch Tough PLA und das elektrisch leitfähige Material ist durch das ProtoPasta realisiert. Ein Test hat ergeben, dass der Sensor mit dem leitenden Material funktioniert, aber die übrige Peripherie (Optokoppler und Spannungsregler) besser durch normale Leitungen mit dem Mikrocontroller verbunden werden. Beim Betrieb nur mit den leitenden Bahnen, ohne Verbindungen durch Leitungen, ist der Mikrocontroller unterversorgt und neigt zu Fehlfunktionen.

Das anschließende Kapitel orientiert sich an den erarbeitenden Teillösungen und daraus werden umsetzbare Demoanwendungen konzipiert.

## 5 UMSETZUNG DER DEMOANWENDUNGEN ANHAND DER TEILLÖSUNGEN

In dieser Masterarbeit ist vorgesehen, die Lösungen nicht nur auf theoretischer Ebene umzusetzen, sondern auch tatsächlich eine bestimmte Greifanwendung mit additiv hergestellten Endeffektoren zu realisieren. Dazu wird eine im Robotic- Labor des Campus 02 vorhandene Anwendung, durch 3D-gedruckte Elemente ersetzt und anhand dieses Beispiels die Lösung mit generativ hergestellten Teilen vor Augen geführt. Dadurch hat man einen sehr guten Vergleich zum bestehenden konventionellen System.

### 5.1 Zu handhabende Steckerhülse

Beim handzuhabenden Bauteil handelt es sich um eine Steckerhülse. Diese Steckerhülse ist aus einem Zinkdruckguss gefertigt. Die relevanten Daten für die nachfolgende Handhabungsaufgabe sind auf der nachfolgenden Abbildung dargestellt. Daraus geht hervor, dass die Steckerhülse 45 g wiegt und etwa 56 mm lang ist. Der relevante Durchmesser, an dem das Bauteil innen gegriffen wird, hat ein Maß von 21 mm. Die Messungen wurden mit einer im Haushalt üblichen Waage und einem digitalen Messschieber durchgeführt.



Abb. 99: Zu handhabende Steckerhülse, Quelle: Eigene Darstellung.

## 5.2 Zu handhabende Kleinladungsträger

Der Kleinladungsträger ist ein durch einen FDM- Druck speziell hergestellter Behälter, welcher exakt 12 Hülsen fassen kann. Er ist so ausgelegt, dass dieser optimal von einem Robotergreifsystem gegriffen werden kann und an die entsprechenden Positionen gehandhabt werden kann.

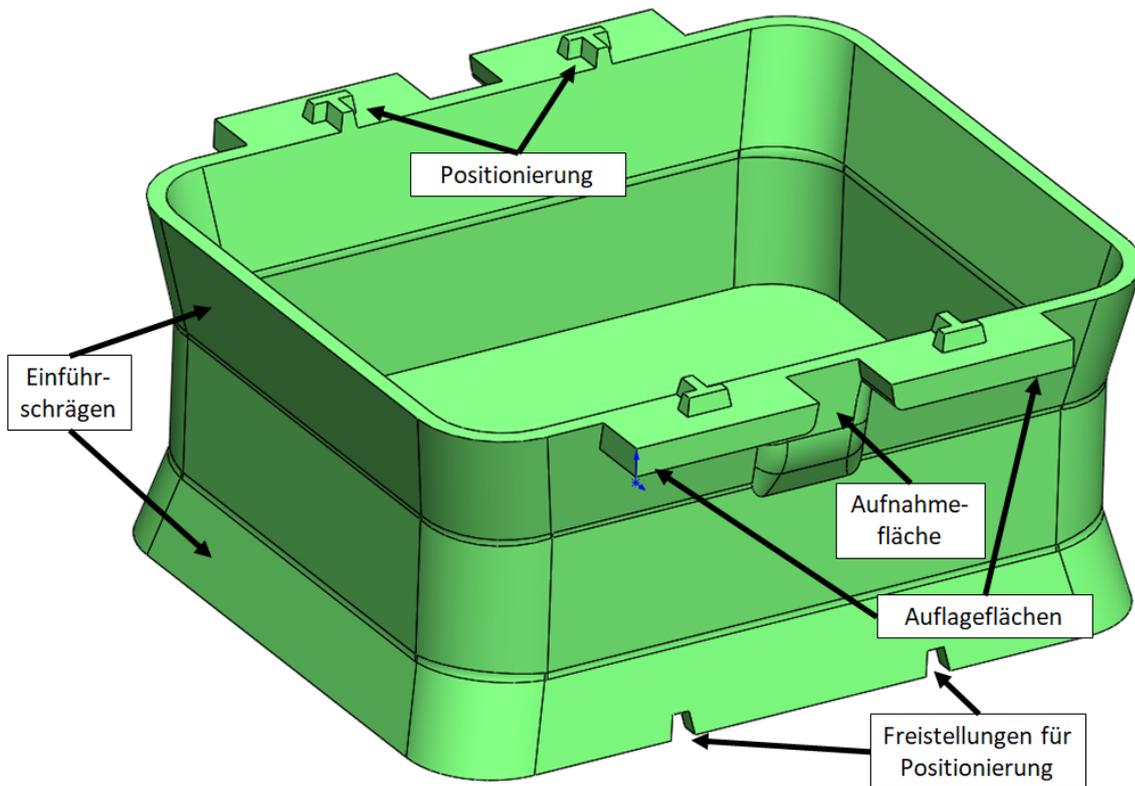


Abb. 100: Kleinladungsträger für die Steckerhülsen, Quelle: Eigene Darstellung.

Wie in der oberen Abbildung zu sehen ist, besitzt der Kleinladungsträger jeweils oben und unten Einführschrägen. Diese sind dafür vorgesehen, um das Behältnis im befüllten Zustand stapeln zu können und um die Befüllung mit den Steckerhülsen zu erleichtern. Für die Positionierung im gestapelten Zustand sind an der Oberseite der KLT vertikale Nasenelemente angebracht. An den langen Seiten sind jeweils 4 horizontale Auflageflächen vorgesehen, um den gegriffenen KLT am Durchrutschen zu hindern. Dadurch wird ein formschlüssiges Feature neben dem Kraftschluss hinzugefügt. Für den Kraftschluss sind, jeweils an den langen Seiten des Behälters, glatte Aufnahmeflächen angebracht. An der Unterseite sind zusätzlich vier Freistellungen für die Positionierung eingearbeitet, welche bei Stapelung in die Nasen des darauf liegenden KLT eingreifen.

### 5.2.1 Umsetzung einer Lösung aus dem 3D Drucker für den KLT- Greifer

Dieses Unterkapitel beschreibt eine Demoanwendung, welche die Teillösungen mit dem Faltenbalg als Aktor und das leitende Filament als Sensor implementiert. Zusätzlich wird ein passives Element als Greiferaktor integriert, das ebenfalls in den Teillösungen aufgegriffen wurde.

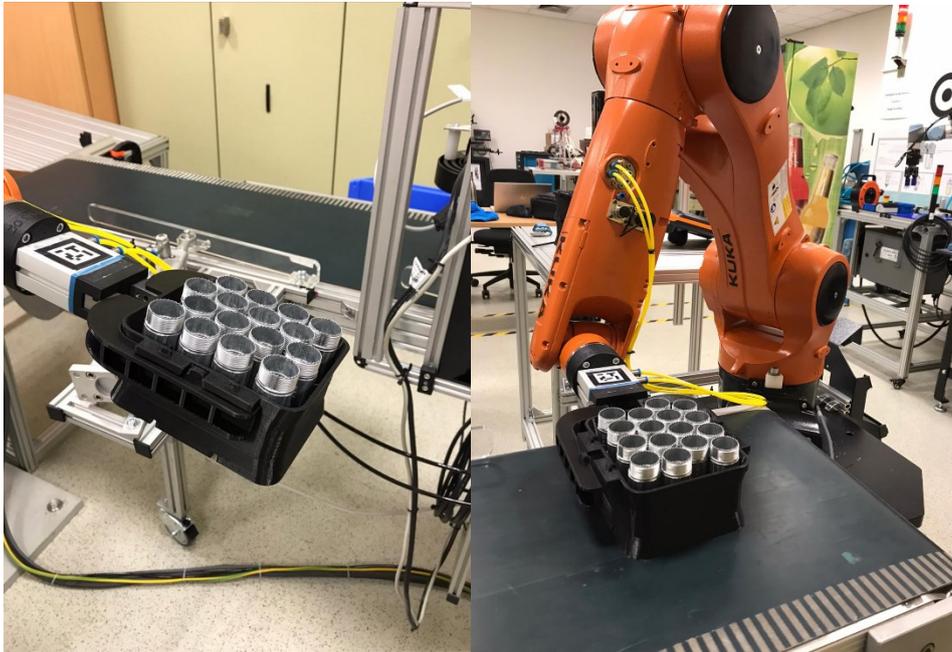


Abb. 101: Ist- Situation KLT- Greifer, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Situation vom KLT- Greifer ist in der oberen Abbildung dargestellt. Dies stellt die konventionelle Lösung dar. Diese besteht aus zwei Greiferfinger, welche an einem Parallelgreifer aus dem Hause Festo angebracht sind. Der Greifer ist so ausgeführt, sodass dieser den KLT untergreift und hauptsächlich formschlüssig greift.

Diese konventionelle Greiferlösung gilt es durch eine additiv gefertigte Lösung zu ersetzen. Dabei wird angestrebt alle benötigten Teile mit dem 3D- Drucker herzustellen. Eine zusätzliche Anforderung ist, einen Schnellwechselflansch (Schunk, SWA 005) aus dem Campus 02 Labor zu integrieren. Dieser wird nachfolgend gekennzeichnet.

Der Grundkörper des Greifers ist so konstruiert, sodass dieser im FDM- Druckverfahren herstellbar ist. In diesen Grundkörper wird ein passives Federelement implementiert, das die Haltekraft produziert. Als Aktor zum Öffnen wird der Faltenbalgaktor aus den Teillösungen herangezogen. Dieser wird mit entsprechend vielen Balgelementen erweitert, um den benötigten Weg abdecken zu können. Der Faltenbalgaktor ist so ausgelegt, dass dieser idealerweise mit dem SLA- Verfahren oder MJF/ SLS- Verfahren herstellbar ist. Als Sensorik wird ein FSR- Sensor (Greifer zu) und ein Kontaktschalter (Greifer offen) aus elektrisch leitendem Filament angestrebt.



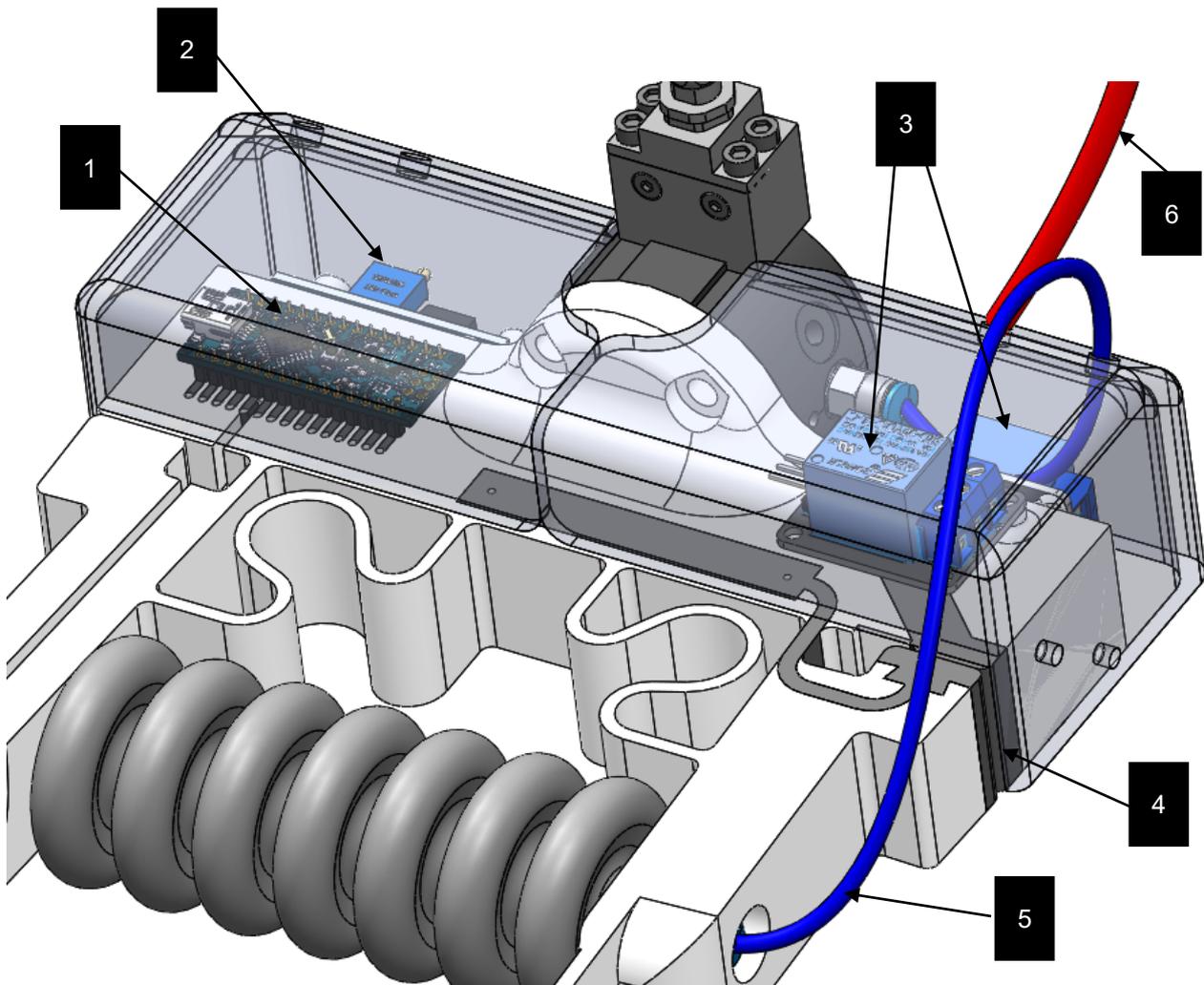


Abb. 103: Übersicht 2 Design KLT- Greifer, Quelle: Eigene Darstellung.

Auf der Abb. 103 ist eine 2. Übersicht für den Greifer dargestellt. Hierbei sieht man auf der linken Seite den Mikrocontroller (1) der die 2 analogen Signale vom FSR- Sensor und vom gedruckten Kontaktschalter (2) auswertet. Der Spannungsregler (2) sorgt dafür, dass die 24 Volt Spannung von der Robotersteuerung auf die benötigten 5 Volt für den Mikrocontroller reguliert wird. Die beiden Optokoppler (3) schalten das jeweilige Signal zur Robotersteuerung durch → Greifer offen und Greifer zu.

Die beiden Energieleitungen dienen dazu die pneumatische Energie und die elektrische Energie bzw. Signale vom Roboter zum Greifer durch zuschleifen. Die blau dargestellte Leitung ist ein Pneumatikschlauch  $\varnothing$  3 mm (5) und mündet im Faltenbalgaktor in einem Steckfitting. Die rot dargestellte Leitung ist ein 4- poliges Sensorkabel, welches den Mikrocontroller versorgt und die Signale der Optokoppler weiterleitet. Beide Energieleitungen sind mit dem Schnellwechseladapter SWA 005 von Schunk verbunden.

### Umsetzung des Greiferkörpers:

Der Greifer soll aus Tough PLA gedruckt werden, da die leitenden Bahnen aus dem ProtoPasta- Filament ebenfalls aus PLA sind. Damit binden sich die zwei Materialien im Multimaterialdruck sehr gut aneinander. Bevor der Greiferkörper gesliced wird, muss dieser nochmal einer Simulation unterzogen werden. Damit wird überprüft, ob dieser den Belastungen standhalten kann. Dafür wird der Greifer mit befüllter Box simuliert. Nach einer Prüfung im FE- Programm ist durch die passive Feder eine Kraft von ca. 5 Newton an der Greifstelle zu rechnen. Ab dieser Kraft ist die Vorspannung des Greifers überwunden und das Greiforgan steht normal zum Flansch.

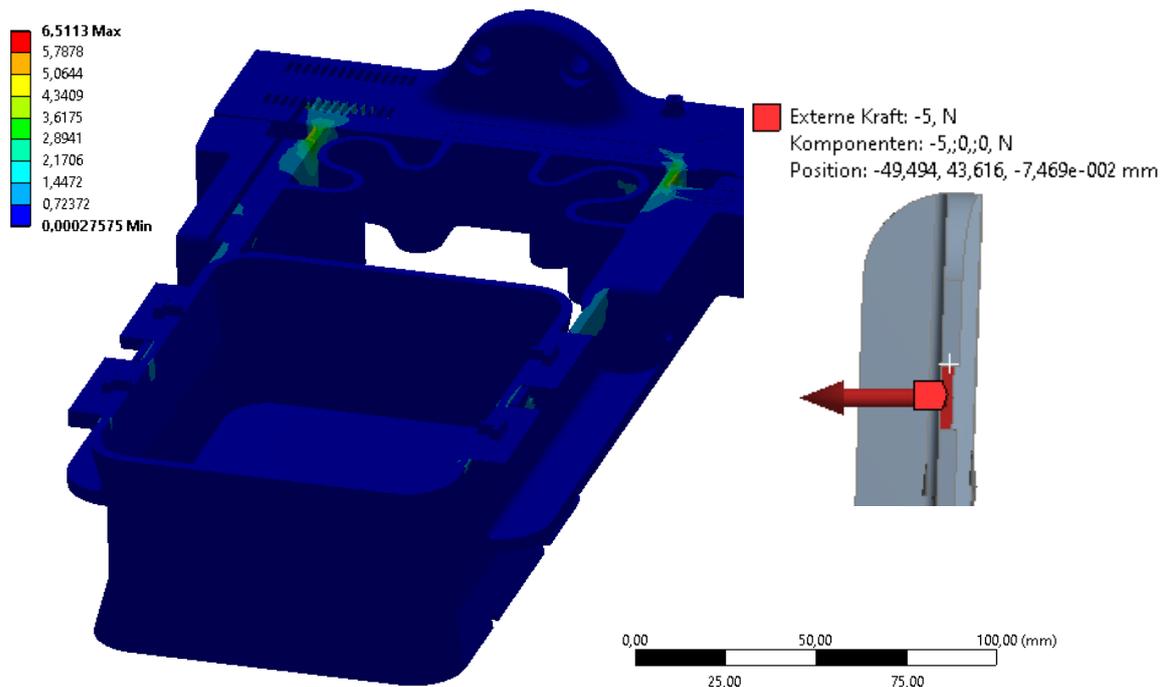


Abb. 104: Simulation des Greiferkörpers, Quelle: Eigene Darstellung.

Die obige Abbildung zeigt auf der linken Seite die statische Simulation des Greifers. Dazu wurde der Greifer am Flansch fixiert und mit den entsprechenden Kräften definiert. Die Simulation wurde mit der dreifachen Gewichtskraft der befüllten Box simuliert, um die Dynamik des Roboters mit zu berücksichtigen. Grundsätzlich ist der Greifer dazu ausgelegt, dass die Box immer waagrecht bewegt wird. Kopfüber kann mit diesem Greifersystem die Box nicht bewegt werden, da der Greifmechanismus dafür nicht ausgelegt ist.

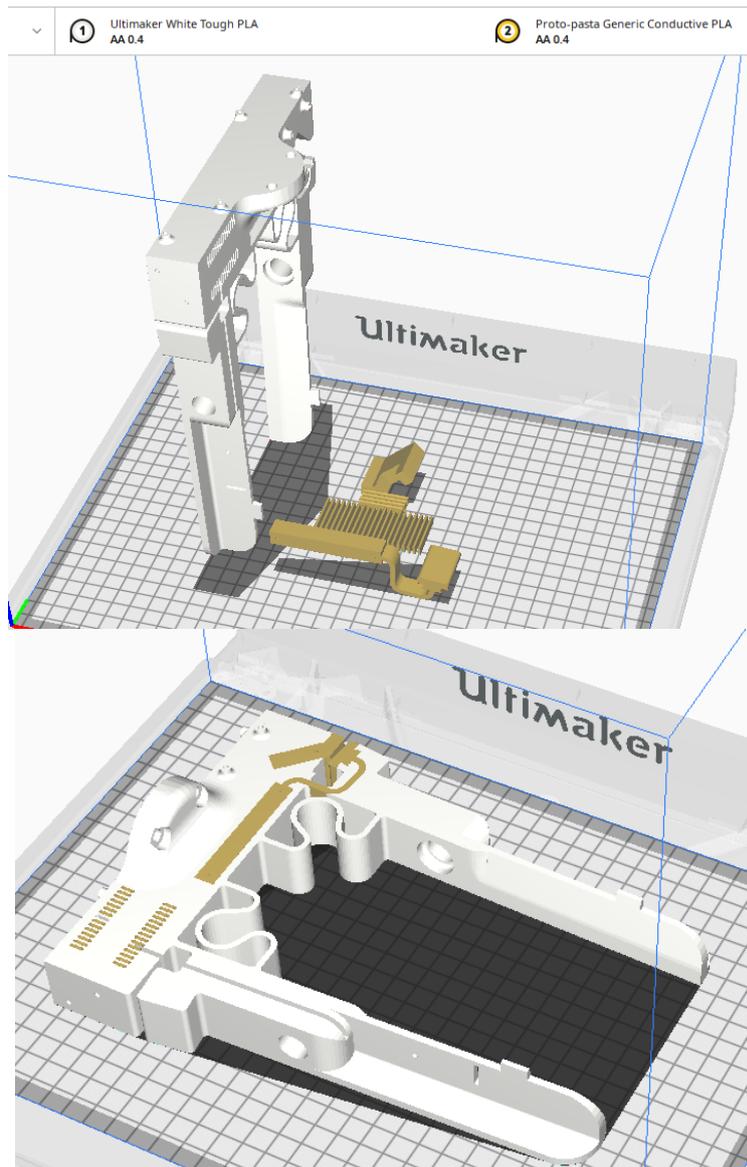


Abb. 105: Slicing des KLT- Greifers (Körper), Quelle: Eigene Darstellung.

Bevor der Greifer gedruckt werden kann, muss dieser gesliced werden. Das Slicen wird im Programm Cura von Ultimaker durchgeführt. Der Druck wird mit dem 3D- Drucker Ultimaker S5 durchgeführt. Da dies ein Multimaterialdruck ist müssen die einzelnen Körper aus dem CAD- Programm mit demselben Bezugspunkt als STL exportiert werden. Nach dem Import der Teile in Cura müssen diese dem richtigen Extruder zugeordnet werden. Die stromleitenden Teile werden mit 100 % Füllung dem Extruder mit dem ProtoPasta PLA zugeordnet. Der Greifkörper ohne die stromleitenden Teile wird dem Tough PLA zugeordnet. Bei diesem wird mit normaler Füllung (20- 30 %) gedruckt, jedoch wird die Wandstärke im Bereich des Filmscharniers und der Feder so angepasst, sodass diese voll ausgefüllt gedruckt werden.

### Umsetzung des Faltenbalgaktors:

Der Faltenbalgaktor wird aus den Teillösungen adaptiert. Bei der Umsetzung dieses Aktors wird die größere Geometrie (Nr. 3) aus den Teillösungen herangezogen, da diese Tests am besten ausfielen. Da der Memory- Effekt bei allen getesteten Teilen präsent war, wird noch eine gedruckte Spiralfeder in den Aktor selbst integriert. Das soll den Memory- Effekt zumindest hinauszögern. Da diese Feder nun integriert ist sind Umsetzungen mit dem SLA- Verfahren durch das benötigte Stützmaterial nur sehr schwer umsetzbar. Daher wird für die Herstellung des Aktors das SLS- Verfahren oder das MJF- Verfahren empfohlen. Auch das PolyJet- Verfahren bietet sich hier an, jedoch wurde dieses Verfahren in den Teillösungen nicht getestet. Der Aktor muss einen linearen Weg von 10,5 mm zurücklegen. Aus den Teillösungen hat sich ergeben, dass ein maximaler Weg von 2 mm pro Balg sinnvoll wäre. Die Geometrie des Greifers lässt ca. 7 Bälge hintereinander zu. Somit ergibt sich mit 7 Bälgen ein Weg von 1,5 mm maximalen Weg pro Balg.

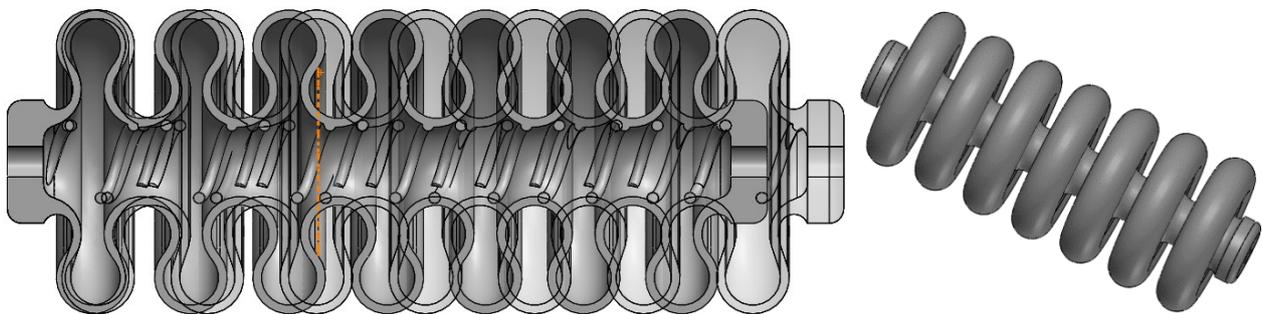


Abb. 106: Faltenbalgaktor für KLT- Greifer, Quelle: Eigene Darstellung.

Auf der Abb. 106 ist der Faltenbalgaktor im Schnitt zu sehen. Die transparente überlappende Darstellung entspricht der aktuierten Situation. Rechts davon ist eine dreidimensionale Darstellung des Balgs zu sehen.

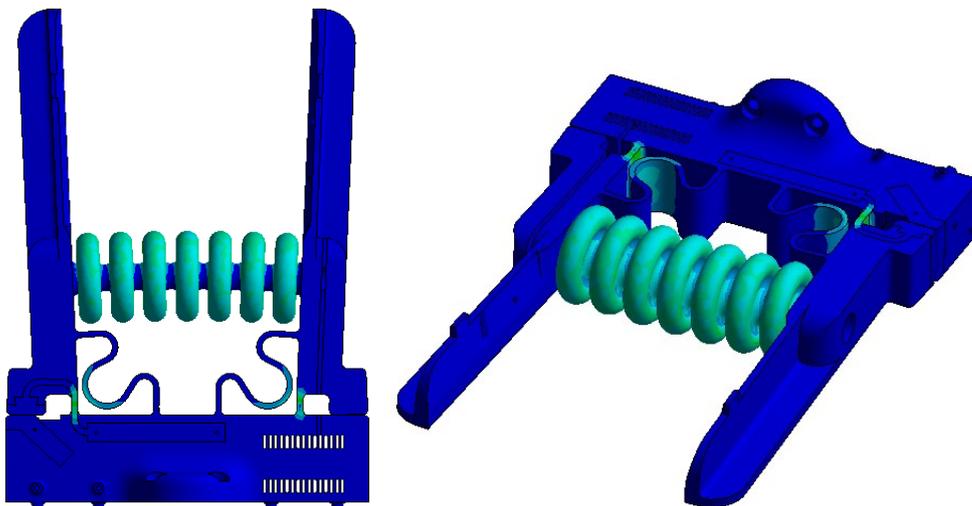


Abb. 107: Simulation des Faltenbalgs im Assembly, Quelle: Eigene Darstellung.

In der Abb. 107 wird der Faltenbalgaktor im eingebauten Zustand simuliert. Für den Greiferkörper ist PLA definiert und für den Balg ist PA (Nylon) definiert. Der Greifer ist am Flansch fixiert und mit dem Balg über eine reibungsfreie Fläche links und rechts kontaktiert. Für die Simulation ist der Balg mit 2 bar beaufschlagt. Wie man am Ergebnis sieht, reicht dieser Druck bereits aus, um den Greifer zu öffnen.

**Sensorische Umsetzung des Greifers:**

Auf der nachfolgenden Abbildung wird die elektrische Verbindung der Elektronikbauteile und die Anbindung zum Roboter dargestellt. Die Elektronik des Greifers wird mit der Robotersteuerung Kuka KRC4 verbunden. Die verfügbare Belegung über den Schnellwechseladpater ist am unteren Bild zu erkennen.

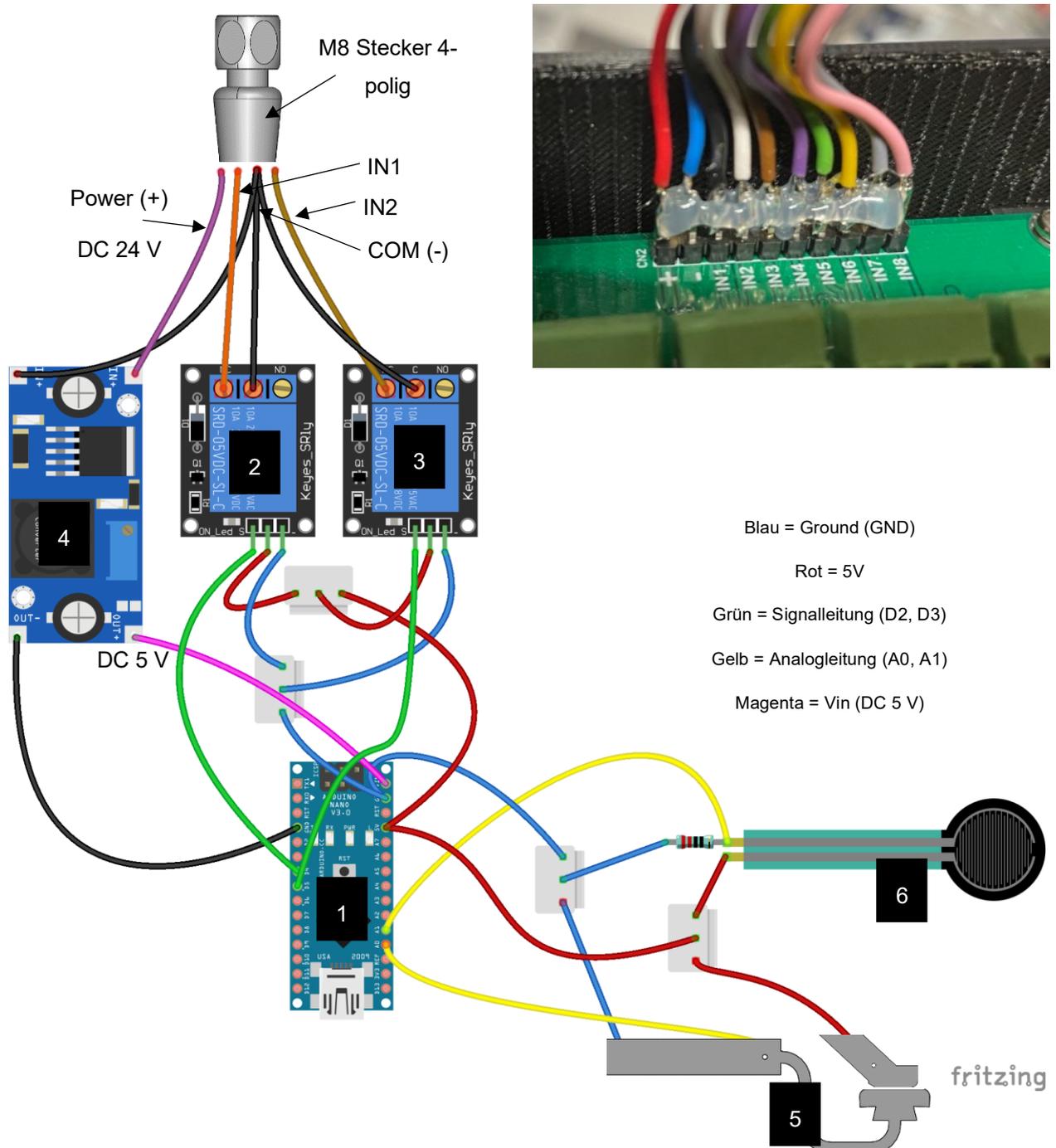


Abb. 108: Schematische Darstellung der Sensorik am KLT- Greifer, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Abb. 108 zeigt die vollständige Elektronik die nötig ist, um die Sensorik am KLT- Greifer umzusetzen. Das Herzstück ist die Auswerteeinheit, welcher der Mikrocontroller (1, Arduino Nano) darstellt. Dieser wertet die analogen Spannungswerte vom FSR (6) und vom gedruckten Kontaktschalter (5) aus. Die gelben

Leitungen stellen jeweils die Signalleitungen zum Mikrocontroller dar. Je nach programmierten Analogwert schaltet der Mikrocontroller die beiden Optokoppler durch, wenn der kalibrierte Wert anliegt. Die grün gefärbten Leitungen stellen die Signalverbindung vom Mikrocontroller zu den Optokopplern dar. Der erste Optokoppler (2) schaltet den IN1 Eingang der KRC4- Steuerung und der zweite Optokoppler (3) schaltet den IN2 Eingang der KRC4- Steuerung. Es ist vorgesehen die NO (Schließer) Anschlüsse an den Relais zu belegen. Der Spannungsregler (4) versorgt den Mikrocontroller mit der angemessenen Spannung von 5 Volt. Das 4- polige M8 Sensor kabel wird direkt mit der Schnellwechseinheit am Greifer verbunden.

Mit dieser Umsetzung des KLT- Greifers wird gezeigt, dass es möglich ist eine existierende konventionelle Greiferlösung, durch eine Lösung aus dem 3D- Drucker zu ersetzen. Der dargestellte Greifer bildet ein additiv gefertigtes Äquivalent zu einem Winkelgreifer, welcher einfachwirkend durch einen Pneumatikzylinder betrieben wird.

### **Fazit der Demo- Umsetzung:**

Die dargestellte Umsetzung zeigt, dass es möglich ist einen Robotergreifer durch ein additiv gefertigtes Äquivalent zu ersetzen. Dabei wird ein pneumatischer Zylinder durch einen gedruckten Faltenbalg ersetzt. Dieser hat die Aufgabe den Greifer zu öffnen. Zugemacht wird der Greifer passiv durch ein Federelement, welches zugleich als Fail- Safe- Sicherung angesehen werden kann. Der aus den Teillösungen adaptierte Faltenbalg fungiert dabei als Pneumatikzylinder- Ersatz. Bei diesem ist aber zu erwarten, dass dieser den gleichen Memory- Effekt erleidet, wie die Teillösungen. Deswegen ist in diesen noch eine Spiralfeder integriert, damit der Memory- Effekt hinauszögert wird. Gegebenenfalls muss der Balg noch durch eine Führung gestützt werden, damit dieser nicht zu sehr auslenkt.

Im nächsten Teilabschnitt wird wiederum ein konventionelles Innengreifersystem, durch ein additiv gefertigtes Äquivalent ersetzt.

## 5.3 Umsetzung einer Lösung aus dem 3D Drucker für den Hülsengreifer

In diesem Abschnitt geht es darum eine Umsetzung für eine Greiferanwendung zu präsentieren, welche zur Gänze mit dem 3D- Drucker hergestellt wird.

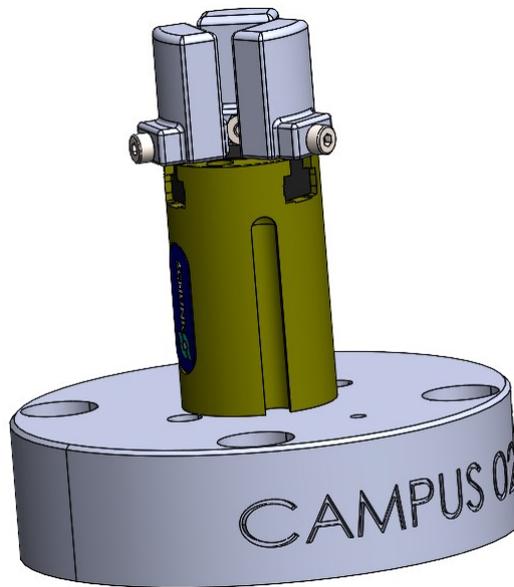
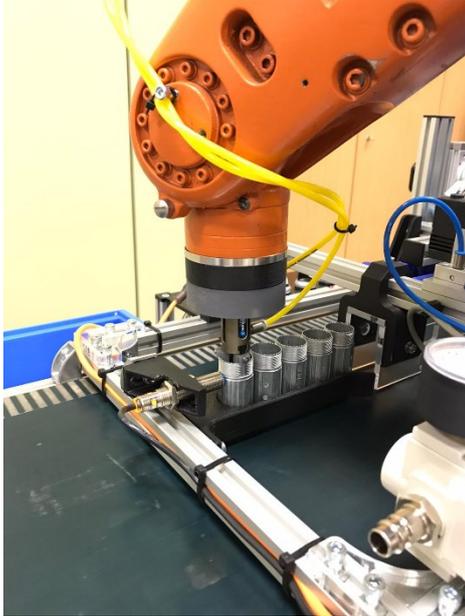


Abb. 109: Ist- Situation des Hülsengreifers, Quelle: Eigene Darstellung.

Der momentan eingesetzte Aktor ist ein Zentrischgreifer der in der Handhabungstechnik allseits bekannten Firma Schunk. Genau handelt es sich dabei um den Typ MPZ-20-IS und dieser erfüllt die Greifaufgabe ausreichend gut. Auch wenn es sich um einen Kleinteilegreifer handelt, belaufen sich die Anschaffungskosten auf mehreren hundert Euro pro Einheit. Die entsprechenden Greiferfinger, in diesem Fall dreifach in Kreisform angeordnet, wurden durch einen FDM- 3D Druck realisiert. Diesen Greifer gilt es im Rahmen der Demoanwendung, durch eine komplett additiv gefertigte Lösung zu ersetzen. Das heißt Aktorelemente sind in diesem Fall durch den 3D Druck realisiert. Beim Hülsengreifer wird zusätzlich noch eine konzeptionelle Modifikation zum bestehenden System eingebracht. Es werden anstatt nur einer Hülse aus dem Vereinzelungssystem, vier Hülsen in einer Linie zur gleichen Zeit aus der Bereitstellung entnommen.

### 5.3.1 Umsetzung einer Lösung aus dem 3D Drucker für den Hülsengreifer

Dieses Unterkapitel beschreibt die Erarbeitung einer Lösung, welcher den Anforderungen entsprechend als Mehrfachgreifer ausgeführt ist. Es wird angestrebt die Lösung in einem einzigen Druck herzustellen. Für die Erarbeitung dieser Lösung wird eine Teillösung in den Hülsengreifer integriert: Die Soft-Robotic-Innengreifer-Lösung. Das heißt es werden vier solcher Innengreifer im entsprechenden Abstand zueinander nebeneinandergesetzt und mit dem Grundkörper vereinigt.

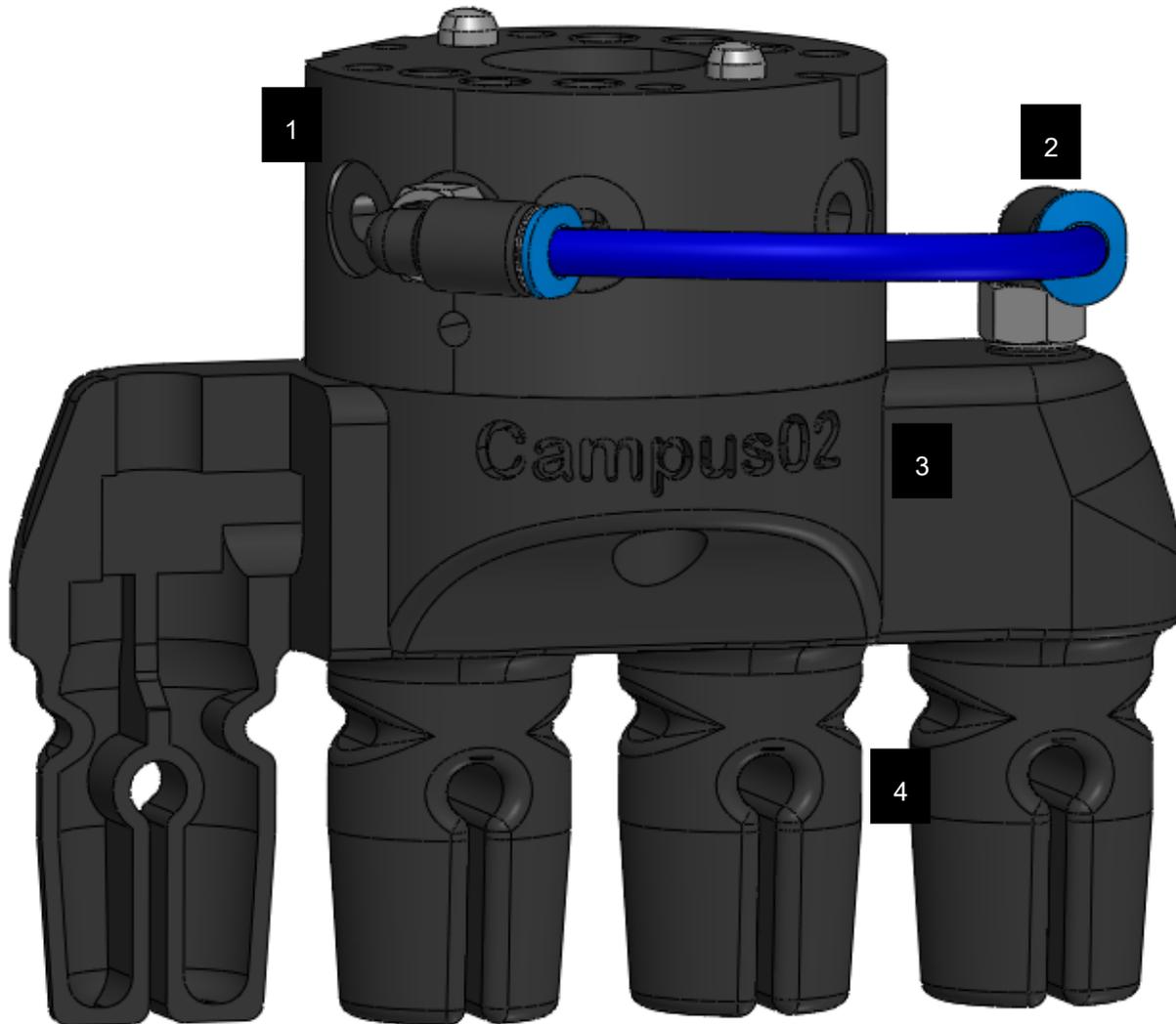


Abb. 110: Design Hülsengreifer mit Teilschnitt auf der linken Seite, Quelle: Eigene Darstellung.

Auf Abb. 110 ist das fertige Design des Hülsengreifers zu sehen. Dieser besteht im Wesentlichen aus den vier Greiforganen (4), die bereits in den Teillösungen erarbeitet sind. Diese Greiforgane sind in einem Stück mit dem Grundkörper des Greifers verbunden. Über den angeschraubten Schnellwechseladapter (1) SWA 005 ist der Roboter greifer mit dem Roboter verbunden. Die pneumatische Energie wird über einen pneumatisches Steckfitting (2) zugeführt und innerhalb des Greiferkörpers auf die einzelnen Greiforgane (4) aufgeteilt. Die Soft-Robotic-Innengreifer weisen das gleiche Design, wie die Teillösung nach der Geometrieoptimierung.

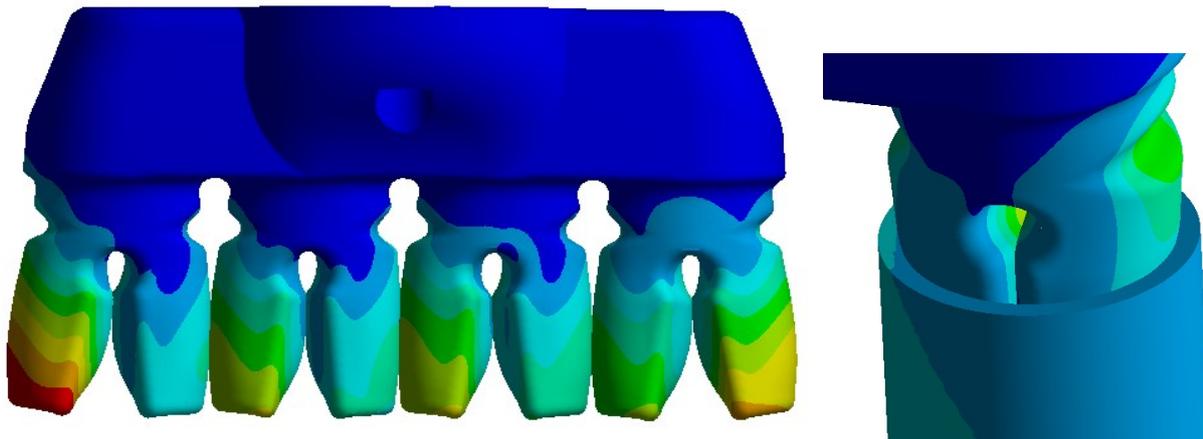


Abb. 111: Simulation des Hülsengreifers, Quelle: Eigene Darstellung.

Auf der oberen Abbildung ist der Hülsengreifer in betätigten Zustand zu sehen. In der linken Bildhälfte ist der Greifer im betätigten Zustand ohne Hülsen zu sehen und auf der rechten Seite ist ein Ausschnitt zu sehen, wie sich der Greifer verhält, wenn dieser die Hülse greift.

#### **Fazit der Demo- Umsetzung:**

Die dargestellte Lösung zeigt, dass es möglich ist, einen konventionellen Innengreifer durch eine additiv gefertigte Lösung zu ersetzen und diese zusätzlich zu erweitern. Mit der konventionellen Lösung wäre es schwierig gewesen die 4 Zentrischgreifer nebeneinander zu platzieren, da die aufgesetzten Finger miteinander kollidieren würden. Bei der 3D- Drucklösung ist dieses Problem von vornherein eliminiert, da die benötigte Greifmechanik und Greiforgane in einem Teil integriert sind. Daher kann man diese sehr leicht auf ein sehr kleines Maß zusammenrücken, ohne dadurch die Funktionsfähigkeit des Greifers zu verlieren. Ein weiterer Vorteil der 3D- Druck Lösung ist die bessere Anpassungsfähigkeit der Greiforgane an die Greifobjekte. Dadurch sind Variationen der Produkte bis zu einem gewissen Maß möglich. Da der Greifer aus einem weichen Material gefertigt ist, wäre dieser für eine Anwendung mit einem Cobot beispielsweise sehr geeignet. Allerdings ist durch das weichere Material eine geringere Wiederholgenauigkeit zu erwarten als bei der konventionellen Lösung.

Ein Testdruck mit dem FDM- Verfahren (NinjaFlex- Material) bringt jedoch keine zufriedenstellenden Ergebnisse. Dadurch, dass das Material mit dieser Technologie eher schwer zu parametrieren ist, ergeben sich während dem Druck Formfehler und Schönheitsfehler. Der Testdruck ergab Stringing (Fäden ziehen), Warping (Verformung durch Wärme) und lückenhafte Stellen. Daher wird für die Herstellung des Greifers ein anderes Verfahren als das FDM- Verfahren empfohlen: MJF-, SLA- und SLS- Verfahren sind für diese Herstellung des dargestellten Gesamtsystems besser geeignet. Bei diesem Verfahren muss jedoch darauf geachtet werden, dass das Pulver oder Resin aus dem Greifer vollständig entfernt werden kann.

## 6 SYSTEMBAUKASTEN FÜR ENDEFFEKTOREN AUS DEM 3D- DRUCKER

Dieses Kapitel stellt den Abschluss des praktischen Teils dar. Dieser soll eine Übersicht über die bisherigen praktischen Erzeugnisse zeigen. Dieser Systembaukasten wird in dieser Arbeit als erster Entwurf implementiert und eignet sich zur Erweiterung für etwaige nachfolgende Arbeiten. Der Baukasten ist in die Grundkategorien Aktoren und Sensoren unterteilt. Dabei sind zwei Kategorien in zwei Unterkategorien „Additiv hergestellt“ und „Integrierte Komponente“ aufgeteilt. Aus den Begriffen geht selbsterklärend hervor, dass erstere komplett durch 3D- Druck herstellbar sind und zweiteres eine externe integrierbare Komponente ist.

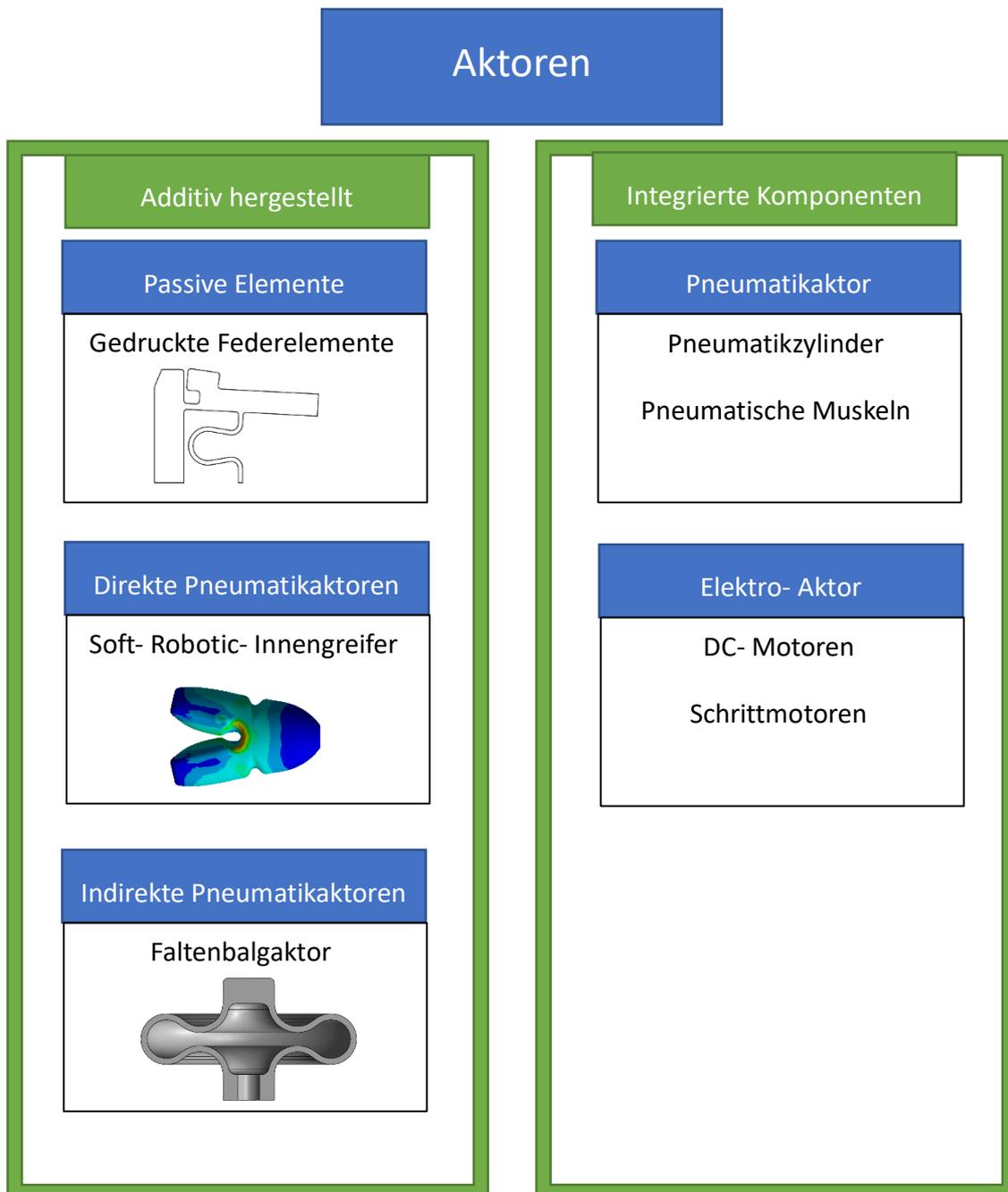


Abb. 112: Systembaukasten Aktorik, Quelle: Eigene Darstellung.

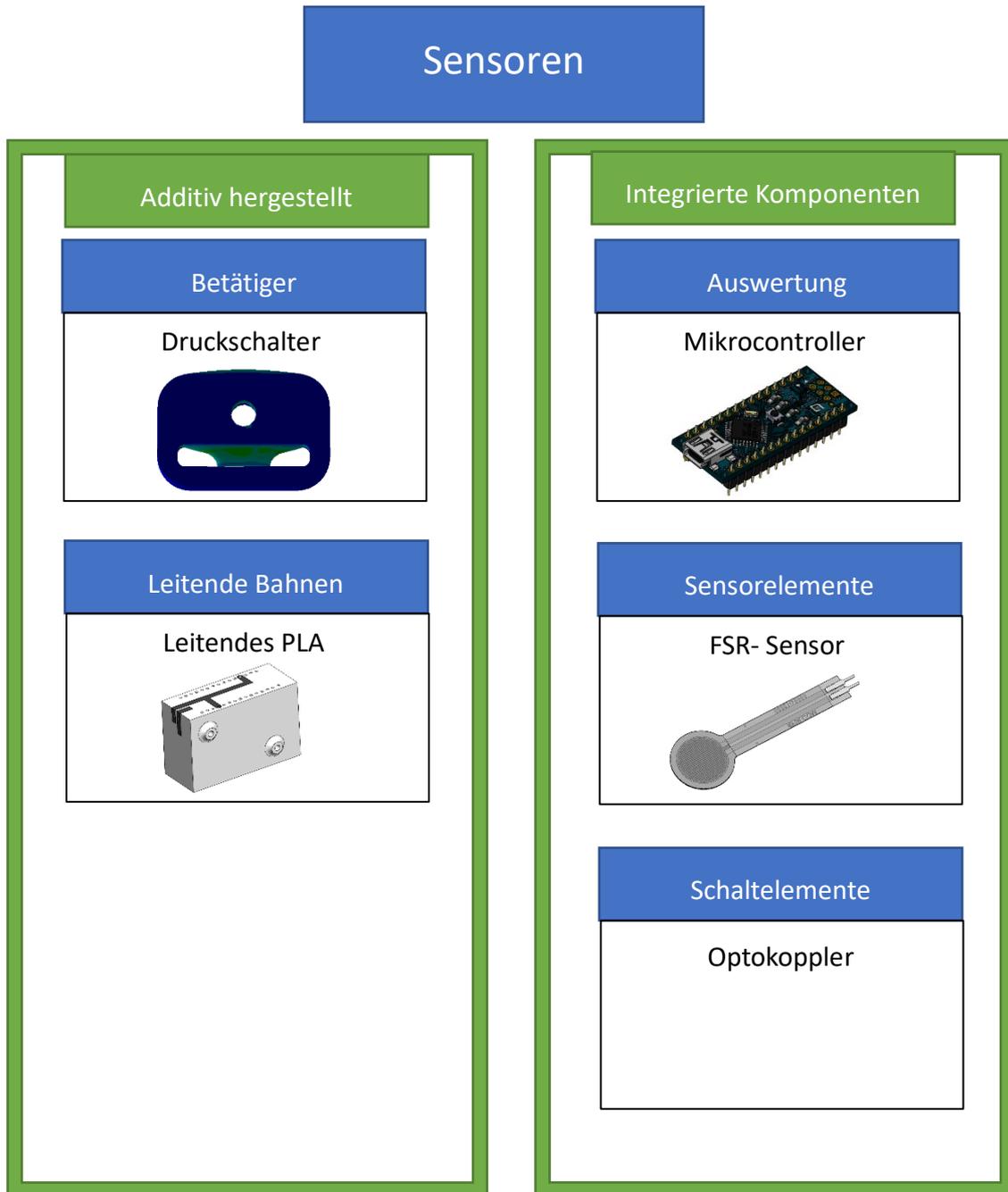


Abb. 113: Systembaukasten Sensoren, Quelle: Eigene Darstellung.

Die additiv hergestellten Lösungen sind in den Teillösungen<sup>105</sup> vorgestellt und beschrieben . Die integrierten Komponenten aus dem Sensor- Baukasten sind ebenfalls alle in den Teillösungen beschrieben. Die integrierten Komponenten<sup>106</sup> aus dem Aktor- Baukasten sind im theoretischen Teil für einen möglichen Einsatz beschrieben.

<sup>105</sup> Teillösungen S. 66.

<sup>106</sup> Geeignete Aktoren für 3D- Druck Robotergreifer S. 52.

## 7 FAZIT UND AUSBLICK

In der Arbeit wurde vordergründig zuerst der Stand der Technik erarbeitet. In diesem Kapitel sind konventionelle Greiferlösungen am Markt näher beleuchtet. Die Aktoren und die Sensoren dieser Greifer sind zu diesem Zweck in der Arbeit näher beschrieben. Es hat sich herausgestellt, dass sich konventionelle Greiferaktoren zumeist mechanischer Getriebe bedienen, um die nötige Klemmkraft zu erzeugen. Es gibt jedoch auch einige anhaftende Lösungen, wie zum Beispiel Vakuumgreifer, welche das Werkstück durch Unterdruck manipulieren können. Bei den Sensorlösungen werden zumeist die Klassiker der Automatisierungstechnik eingesetzt: induktive Näherungsschalter, Reed- Schalter oder optoelektronische Sensorlösungen, wie Reflektorlichtschranken und Lichttaster. Natürlich könnte man jedes erdenkliche Sensorsystem für einen Roboter als Bauteilabfrage einsetzen, jedoch kommen die beschriebenen Systeme sehr oft zum Einsatz.

Weiters wird im Stand der Technik ein neues Fertigungsparadigma behandelt: Additive Fertigung. Ganz im Gegensatz zu konventionellen Fertigungstechniken geht es hier nicht vordergründig darum Material abzutragen, um das gewünschte Werkstück zu erhalten. Vielmehr wird nur das Material Voxel für Voxel aufgetragen, sodass daraus das gewünschte Werkstück entsteht. Wie aus der Recherche hervorgegangen ist, sind in den letzten Jahren immer mehr additive Fertigungstechniken hervorgekommen. In dieser Masterarbeit sind die gängigsten Verfahren für die additive Herstellung von Kunststoff erarbeitet, da die einzelnen Lösungen dieser Arbeit auf Basis von Kunststoffen ausgeführt sind.

Da es für die Erarbeitung nachfolgender Lösungen von höchstem Interesse ist, dass man den fertigungstechnischen Restriktionen additiver Fertigung gerecht wird, gibt es ein Kapitel, das sich genau mit diesem Thema beschäftigt. Denn jedes Teil, welches per 3D- Druck hergestellt wird, sollte einen gewissen Workflow durchlaufen, um das Potenzial additiver Fertigung ausschöpfen zu können. Zuerst sollte dieses entsprechend entworfen werden, dann für die Anwendung ausgelegt werden und danach korrekt für die Umsetzung vorbereitet werden. Dabei werden die einzelnen Punkte für DfAM (Design for Additive Manufacturing) aufgegriffen und sind ausführlich dargestellt.

Im Anschluss daran sind Sensoren recherchiert, die bereits durch Einsatz von 3D- Druck Systemen hergestellt werden, oder direkt in additiv hergestellten Teilen eingesetzt sind. Dazu gehört der Verschleißsensor von Igus oder Dünnfilm- Drucksensoren, die durch die kompakte Bauweise günstig integrierbar sind. Im Anschluss daran wurden vom Autor auf dieselbe Weise verschiedene Aktoren recherchiert, welche geeignet sind in 3D- gedruckten Greifern verwendet zu werden. Besonders hervorstechen hier die zwei Lösungen, die komplett durch additive Fertigung hergestellt werden können: Der Faltenbalgaktor und Soft- Robotic- Greiferorgane.

Inspiziert von der Recherche wird in der Arbeit nun Bezug auf die Praxis genommen. Im Zuge der Arbeit ist definiert, dass zuerst Teillösungen erstellt werden, die dann in Demoanwendungen münden und damit entsprechend umgesetzt werden können. Bei den Teillösungen wird darauf geachtet, dass es nicht nur theoretisch erarbeitete Ergebnisse gibt, sondern dass diese durch reale Resultate untermauert, werden. Die beiden Aktorlösungen Faltenbalgaktor und Soft- Robotic- Innengreifer, wurden jeweils einem realen Testlauf unterzogen. Die Sensorlösungen sind ebenfalls mit echter Hardware umgesetzt und sind auf ihre Funktionalität geprüft.

Diese Arbeit hat gezeigt, welche Funktionen sich mit 3D- Druck in multifunktionale Teile integrieren lassen. Dabei ist es durch Multimaterialdruck möglich elektrischen Strom zu leiten und zum Beispiel lassen sich so Signale zu einer Robotersteuerung schalten. Dies wurde in der Arbeit durch das ProtoPasta PLA (Electrically Conductive) gezeigt. Im Teillösungs- Kapitel für Sensorik, werden gedruckte Proben bezüglich der elektrischen Leitfähigkeit gemessen. Das Ergebnis daraus ist, dass die gedruckten Bahnen des Materials als kontinuierliche anwachsende Widerstände anzusehen sind. Der Widerstandswert hängt von Querschnitt und Länge der gedruckten Bahnen ab. Dieses leitende Material wurde durch Multimaterialdruck im FDM- Verfahren als elektrisch leitende Bahnen mit einem Tough- PLA verarbeitet. In der Demoanwendung mit dem KLT- Greifer, ist ein entsprechendes Beispiel konzipiert. In Verbindung mit dem Dünnfilm- Drucksensor kann eine solche ProtoPasta- Bahn als Referenzwiderstand implementiert werden,

Durch druckbare TPU- Materialien lassen sich mittels pneumatischer Aktivierung Aktoren realisieren die vollständig durch additive Herstellung realisierbar sind. Insbesondere TPU- Materialien, die es für den FDM- Druck gibt, sind besonders widerstandsfähig und weisen eine besonders hohe Bruchdehnung auf. Ein Wermutstropfen bei der Verarbeitung mit FDM- Systemen, sind die Probleme mit der Dichtigkeit gegenüber Druckluft. Hier gibt es bezüglich der Anisotropie zwischen den einzelnen Schichten einiges an Luft nach oben. Mögliche Abhilfe für Undichtigkeiten stellen hier Nano- Seal- Mittel dar. Ein nahezu isotropes Verfahren hierzu wäre das SLA- Druckverfahren. Polymer- Harze, die durch Stereolithografie hergestellt werden, sind bei einem gelungenen Druck immer luftdicht. Dieses Verfahren hinkt aber bezüglich der Materialvielfalt und Widerstandsfähigkeit gegenüber dem FDM- Verfahren etwas hinterher. Weitere Druckverfahren die bessere isotrope Eigenschaften aufweisen sind das SLS- Verfahren und das MJF- Verfahren. Gute Potenziale birgt theoretisch auch das PolyJet- Verfahren, jedoch wurde dies im praktischen Teil der Arbeit nicht aufgegriffen. Die Kosten für ein PolyJet- Teil sind ca. dreifach so hoch, wie bei einem SLS- Teil oder MJF- Teil, bei Druckdienstleistern.

Ein wichtiger Punkt für die Arbeit sind auch Simulationen für den Entwurf der Aktoren. Durch Simulationen ist man in der Lage, während die Teile im CAD entstehen, in Iterationsschleifen die Teile so zu optimieren, sodass diese möglichst funktionsfähig sind. Jedoch hat man speziell im Kunststoffbereich Probleme adäquate Materialmodelle für die Simulationen zu finden. Eine lineare Simulation mit den Eckdaten des jeweiligen Datenblattes führt bei Kunststoffen selten zu akkuraten Ergebnissen, besonders wenn diese additiv hergestellt sind. Die Erfahrung hat gezeigt, dass solche Modelle am ehesten in wissenschaftlichen Berichten zu finden sind. Bei Herstellern dieser Werkstoffe bekommt man meist wenig Auskunft darüber.

Bei der additiven Fertigung von Robotergreifern kann man nach dem Stand der Technik Vorteile und Nachteile gegenüber konventionellen Versionen ausmachen. Ein großer Vorteil additiver Greifer ist die digitale Fertigungstechnik mit welchen die Teile gedruckt werden. Bereits auf Desktopdruckern ist es möglich ein entsprechendes Teil zu fertigen und zu testen. Das heißt der Weg zu einem funktionsfähigen Prototyp ist sehr kurz und zeitnah. Man kann innerhalb eines kurzen Zeitraumes einige Iterationsschleifen vollziehen und ist in der Entwicklung solcher Systeme sehr schnell. Bei herkömmlichen Greifersystemen braucht man hier schon um einiges länger, wenn man hier an gefräste und gehärtete Stahlteile denkt. Jedoch sieht ein additiv gefertigter Greifer komplett anders aus als ein konventionelles Pendant und die Grenzen sind hierbei auch anders einzuordnen. Da bei dieser Arbeit aber komplett auf Kunststoffe gesetzt

wurde, sind diese nicht 1:1 vergleichbar. Ein weiterer Vorteil bei additiv gefertigten Greifersystemen aus Kunststoff liegt an den vergleichsweise niedrigen Herstellungskosten. Die gezeigten Demoanwendungen liegen im zweistelligen Eurobereich (exklusive Entwicklungskosten) und diese haben noch Optimierungspotenzial. Solche Lösungen gehen daher klar in Richtung der Low- Cost- Robotics. Die Firma Iigus bietet zum Beispiel schon Fünffachs- Roboterlösungen an, welche auch Großteils aus Kunststoff hergestellt sind.



Abb. 114: Low- Cost- Roboter von Iigus, Quelle: igus® GmbH (2021), Online-Quelle [25.Oktober.2021].

Ausblickend kann man sagen, dass solche Systeme viel Potenzial für weiterführende Forschungen und Entwicklungen aufzeigen. Dadurch, dass man bei der additiven Fertigung mehr Freiheitsgrade zur Verfügung hat, werden auch die Lösungen vielfältiger. In der Arbeit sind dadurch nur ein sehr kleiner Teil von Greiferlösungen behandelt, da der Umfang sonst nicht mehr der Arbeit entspricht. Besonders im Bereich der Soft- Robotic ist hier noch einiges möglich und muss erforscht werden. Wenn in diesem Bereich die Zuverlässigkeit der Greifer so gesteigert wird, sodass diese mit industriellen Greifern vergleichbar sind, wird das Argument des viel früheren ROI schlagend, ähnlich wie bei Iigus- Low- Cost- Robotern. Ein weiteres großes Feld für Robotergreifer aus dem 3D Drucker, vor allem welche aus weichen Materialien gedruckt sind, stellen die Cobots dar. Bei der Interaktion zwischen Menschen und Roboter sind weiche Endeffektoren hinsichtlich der Sicherheitsaspekte sehr vorteilhaft.

Abschließend betrachtet stellt die Arbeit eine Grundlage für aufbauende Arbeiten dar, welche sich mit additiv gefertigten Endeffektoren und Soft- Robotic- Elementen beschäftigen. Die Masterarbeit gibt einen breiten Einblick in den Stand der Technik und dokumentiert einige entwickelte und getestete Lösungsansätze die verwertbar sind. Im Zuge einer aufbauenden Arbeit kann der begonnene Systembaukasten unter Umständen entsprechend erweitert werden.

## Literaturverzeichnis

### Gedruckte Werke (20)

- Adamek, Jürgen; Piwek, Volker (2019): *Additive Fertigung - 3D Druck*, Lit Verlag, Berlin
- Breuninger, Jannis; Becker, Ralf; Wolf, Andreas; Rommel, Steve; Verl, Alexander (2013): *Generative Fertigung mit Kunststoffen*, Springer Vieweg, Berlin- Heidelberg
- Ebel, Frank; Idler, Siegfried; Prede, Georg; Scholz, Dieter (2014): *Pneumatik - Elektropneumatik*, 2 Auflage, Bildungsverlag EINS GmbH, Köln
- Engelke, Hans- J. (2021): *Inventor 2022® 3D- Druck*, BoD - Books on Demand, Norderstedt
- Evans, Brian (2012): *Practical 3D printers: the science and art of 3D printing*, Apress
- Feldmann, Klaus; Schöppner, Volker; Spur, Günther (2014): *Handbuch Fügen, Handhaben, Montieren*, Carl Hanser Verlag, München
- Gebhardt, Andreas; Kessler, Julia; Schwarz, Alexander (2019): *Produktgestaltung für die Additive Fertigung*, Carl Hanser Verlag, Aachen
- Hesse, Stefan (2011): *Greifertechnik - Effektoren für Roboter und Automaten*, 1 Auflage, Carl Hanser Verlag, München
- Hesse, Stefan; Schnell, Gerhard (2014): , 6 Auflage, Springer Vieweg, Plauen
- Horsch, Florian (2014): *3D- Druck für alle - Der Do- it yourself Guide*, Carl Hanser Verlag, München
- Komorowsky, Robert (2014): *Generative Fertigungsverfahren - Untersuchung zur Auswahl eines 3D- Druck- Systems für die Herstellung kunststoffbasierter Prototypen*, Diplomica® Verlag GmbH, Hamburg
- Lachmayer, Roland; Lippert, Rene; Kaielerle, Stefan (2019): *Konstruktion für die additive Fertigung 2018*, Springer Vieweg, Berlin
- Laschi, Cecilia; Rossiter, Jonathan; Iida, Fumiya; Cianchetti, Matteo; Margheri, Laura (2017): *Soft Robotics: Trends, Applications and Challenges*, Springer International Publishing, Italien/ Großbritannien
- Monkman, Gareth ; Hesse, Stefan; Steinmann, Ralf; Schunk, Henrik (2007): *Robot Grippers*, Wiley- VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim
- Müller, Rainer; Franke, Jörg; Henrich, Dominik; Kuhlenkötter, Bernd; Raatz, Annika; Verl, Alexander (2019): *Handbuch Mensch- Roboter- Kollaboration*, Carl Hanser Verlag, München
- Redwood, Ben; Schöffner, Filemon; Garret, Brian (2017): *The 3D Printing Handbook*, Coers & Roest, Amsterdam
- Regtien, Paul P.L. (2012): *Sensors for Mechatronics*, 1 Auflage, Elsevier Inc., Hengelo
- Schmid, Manfred (2015): *Additive Fertigung mit Selektivem Lasersintern (SLS) - Prozess- und Werkstoffüberblick*, Springer Vieweg, Wiesbaden
- Schnell, Gerhard (1993): *Sensoren in der Automatisierungstechnik*, 2 Auflage, Springer Fachmedien Wiesbaden, Braunschweig/ Wiesbaden

Tränkle, Hans; Reindl, Leonhard (2015): *Sensortechnik, Handbuch für Praxis und Wirtschaft*, 2. Auflage, Springer Vieweg, Berlin Heidelberg

### **Wissenschaftliche Artikel (2)**

Rehberger, Matthias; Noll, Martin (2020): *DMS-Sensoren aus dem 3D-Druck mit Low-Power-Funk-Telemetrie*, in: *Elektronikpraxis*, 17/2020, Vogel Communications Group, S. 46-48

Tawk, Charbel; Alici, Gursel (2020): *Finite Element Modeling in the Design Process of 3D*

### **Patente (1)**

Becker, Ralf; Grzesiak, Andrej (2006): *Robter-Greifer*, EP1943064B1, Deutschland

### **Online-Quellen (63)**

3Dnatives SAS *3Dnatives SAS - Ihr Portal für den 3D Druck*

<https://www.3dnatives.com/de/typen-fdm-drucker-310520171/> [Stand: 10. Juni. 2021]

DruckWege GmbH *Druckwege 3D Printing*

<https://druckwege.de/home/technologie/fused-deposition-modelling-fdm> [Stand: 10. Juni. 2021]

igus GmbH *Intelligente 3D-Druck-Verschleißteile*

<https://www.igus.at/info/3d-druck-mit-integrierten-sensoren> [Stand: 10. Juli. 2021]

Schunk GmbH & Co. KG (2021): *EGN*

[https://schunk.com/at\\_de/greifsysteme/series/egn/](https://schunk.com/at_de/greifsysteme/series/egn/) [Stand: 30. Juli. 2021]

Schunk GmbH & Co. KG (2021): *PGN plus*

[https://schunk.com/at\\_de/greifsysteme/series/pgn-plus/](https://schunk.com/at_de/greifsysteme/series/pgn-plus/) [Stand: 30. Juli. 2021]

Zimmer Group GmbH *2-Backen-Radialgreifer*

<https://www.zimmer-group.com/de/technologien-komponenten/komponenten/handhabungstechnik/greifer/pneumatisch/2-backen-winkelgreifer/serie-gk#sectionalview> [Stand: 31. Juli. 2021]

Zimmer Group GmbH *2-Backen-Parallelgreifer*

<https://www.zimmer-group.com/de/technologien-komponenten/komponenten/handhabungstechnik/greifer/pneumatisch/2-backen-parallelgreifer/serie-gpp5000#sectionalview> [Stand: 31. Juli. 2021]

Zimmer Group GmbH *3-Backen-Zentrischgreifer*

<https://www.zimmer-group.com/de/technologien-komponenten/komponenten/handhabungstechnik/greifer/pneumatisch/3-backen-zentrischgreifer/serie-mgd800#sectionalview> [Stand: 31. Juli. 2021]

Zimmer Group GmbH *Innengreifer Serie LGS*

<https://www.zimmer-group.com/de/technologien-komponenten/komponenten/handhabungstechnik/greifer/pneumatisch/greifer-fuer-besondere-aufgaben/serie-lgs#sectionalview> [Stand: Juli. 2021. Juli]

FIPA GmbH *Magnetgreifer - elektrisch gesteuert*

[https://cdn.fipa.com/Product\\_Attachments/pdf/BDS\\_FIPA-MG35-70-Magnetgreifer.pdf](https://cdn.fipa.com/Product_Attachments/pdf/BDS_FIPA-MG35-70-Magnetgreifer.pdf) [Stand: 1.August.2021]

J. Schmalz GmbH *Auswahl der Sauggreifer*

<https://www.schmalz.com/de-at/vakuum-wissen/vakuumsystem-und-seine-bauteile/systemauslegung-berechnungsbeispiel/auswahl-der-sauggreifer/> [Stand: 1.August.2021]

J. Schmalz GmbH *Vakuum- Ejektoren*

<https://www.schmalz.com/de-at/vakuum-wissen/vakuumsystem-und-seine-bauteile/vakuum-erzeuger/vakuum-ejektoren/> [Stand: 1.August.2021]

Michael Junghanß *PolyJet® - Technologie*

<https://www.alphacam.de/kunststoff-3d-drucker/polyjet-3d-drucker/polyjet-technologie> [Stand: 3.August.2021]

3Faktur GmbH *Polyjet: Das Verfahren*

<https://3faktor.com/3d-druck-materialien-und-verfahren/mjm-polyjet-verfahren/#1481032374212-8f2613e9-984f> [Stand: 3.August.2021]

KUKA AG *Industrie 4.0*

<https://www.kuka.com/-/media/kuka-downloads/imported/9cb8e311bfd744b4b0eab25ca883f6d3/kukaindustrie40de.pdf?rev=30eaf7ba2d5a4deaaad98bdc06cd37469&hash=7D30CCCD60667FB6AC52759E4E542A2> [Stand: 24.August.2021]

International Organization for Standardization (2020): *ISO/ASTM 52915:2020*

<https://www.iso.org/standard/74640.html> [Stand: 24.August.2021]

KEYENCE International *Was ist ein Induktiver Sensor?*

<https://www.keyence.eu/dede/ss/products/sensor/sensorbasics/proximity/info/> [Stand: 25.August.2021]

Baumer Holding AG *Funktionsweise und Technologie von Lichtschranken und Lichttastern*

[https://www.baumer.com/de/de/service-support/funktionsweise/funktionsweise-und-technologie-von-lichtschranken-und-lichttastern/a/Know-how\\_Function\\_Lichtschranken-Lichttaster](https://www.baumer.com/de/de/service-support/funktionsweise/funktionsweise-und-technologie-von-lichtschranken-und-lichttastern/a/Know-how_Function_Lichtschranken-Lichttaster) [Stand: 25.August.2021]

Formlabs (2021): *Leitfaden zum 3D-Druck mit*

[https://3d.formlabs.com/rs/060-UIG-504/images/WP-DE-Leitfaden-zum-3D-Druck-mit-selektivem-Lasersintern-SLS.pdf?mkt\\_tok=MDYwLVVJRy01MDQAAAF\\_Jq\\_KQ6-nkSh0ls1XGs\\_9yFdl-Qgb92co-SaQBp7231-6yJITnwuE5XpZTEjZ-Rf5UkJD7aMSErZswx8hsb7tk9onEGdPx4RG9H\\_TVr6eihWfMk8](https://3d.formlabs.com/rs/060-UIG-504/images/WP-DE-Leitfaden-zum-3D-Druck-mit-selektivem-Lasersintern-SLS.pdf?mkt_tok=MDYwLVVJRy01MDQAAAF_Jq_KQ6-nkSh0ls1XGs_9yFdl-Qgb92co-SaQBp7231-6yJITnwuE5XpZTEjZ-Rf5UkJD7aMSErZswx8hsb7tk9onEGdPx4RG9H_TVr6eihWfMk8) [Stand: 27.August.2021]

Development Company, L.P. (2018): *Technical white paper: HP Multi Jet Fusion technology*

[https://images.marketingcontent.ext.hp.com/Web/HPMartech/%7B95dccb4d-3ade-4a53-bb5f-64a813e3b83e%7D\\_4AA5-5472ENW\\_Hires\\_\(WO\\_CM\).pdf?d\\_site=704062726&d\\_creative=3099&d\\_campaign=&d\\_dpuid=15098220&elqTrackId=723b3bb6fa7e41bc9f1f48de7c47eccb&elq=16afa90651834](https://images.marketingcontent.ext.hp.com/Web/HPMartech/%7B95dccb4d-3ade-4a53-bb5f-64a813e3b83e%7D_4AA5-5472ENW_Hires_(WO_CM).pdf?d_site=704062726&d_creative=3099&d_campaign=&d_dpuid=15098220&elqTrackId=723b3bb6fa7e41bc9f1f48de7c47eccb&elq=16afa90651834) [Stand: 27.August.2021]

HP Development Company, L.P. (2018): *Technical white paper: HP Multi Jet Fusion technology*  
[https://images.marketingcontent.ext.hp.com/Web/HPMartech/%7B95dccb4d-3ade-4a53-bb5f-64a813e3b83e%7D\\_4AA5-5472ENW\\_Hires\\_\(WO\\_CM\).pdf?d\\_site=704062726&d\\_creative=3099&d\\_campaign=&d\\_dpuid](https://images.marketingcontent.ext.hp.com/Web/HPMartech/%7B95dccb4d-3ade-4a53-bb5f-64a813e3b83e%7D_4AA5-5472ENW_Hires_(WO_CM).pdf?d_site=704062726&d_creative=3099&d_campaign=&d_dpuid) [Stand: 27.August.2021]

Formlabs *Whitepaper: Einführung in den Stereolithografie- 3D- Druck*  
[https://3d.formlabs.com/rs/060-UIG-504/images/WP-DE-Einführung-in-den-Stereolithografie-3D-Druck.pdf?mkt\\_tok=MDYwLVVJRy01MDQAAAF\\_KoveG4LiIRwm64QiwAlgTcKO6rjK4UhdK3c1Fg3mTO\\_O\\_lqHk9CWkEU0PfqX4OBBMAgbW1H8Q0VzFhd2eTI9krTiH1GuY4gCrai4DOUmLqNXK](https://3d.formlabs.com/rs/060-UIG-504/images/WP-DE-Einführung-in-den-Stereolithografie-3D-Druck.pdf?mkt_tok=MDYwLVVJRy01MDQAAAF_KoveG4LiIRwm64QiwAlgTcKO6rjK4UhdK3c1Fg3mTO_O_lqHk9CWkEU0PfqX4OBBMAgbW1H8Q0VzFhd2eTI9krTiH1GuY4gCrai4DOUmLqNXK) [Stand: 27.August.2021]

Festo Ges.m..b.H. (2019): *Fluidic Muscle DMSP*  
[https://www.festo.com/cat/de-at\\_at/data/doc\\_de/PDF/DE/DMSP\\_DE.PDF](https://www.festo.com/cat/de-at_at/data/doc_de/PDF/DE/DMSP_DE.PDF) [Stand: 29.August.2021]

Joy-IT (2020): *SEN-PRESSURE20*  
<https://www.pollin.de/productdownloads/D811271D.PDF> [Stand: 11.Juli.2021]

Formlabs (2021): *Validierung der Isotropie beim SLA-3D-Druck*  
<https://formlabs.com/blog/isotropy-in-SLA-3D-printing/> [Stand: 31.August.2021]

Formlabs (2021): *Mindestwandstärke für den 3D-Druck*  
<https://formlabs.com/ch/blog/mindestwandstaerke-im-3d-druck/> [Stand: 3.September.2021]

3Faktur GmbH *Genauigkeiten bzw. Toleranzen im 3D-Druck*  
<https://3faktor.com/genauigkeiten-bzw-toleranzen-im-3d-druck/> [Stand: 3.September.2021]

Rapidobject GmbH *Konstruktionsrichtlinien für Multi Jet Fusion (MJF)*  
[https://www.rapidobject.com/csdata/download/1/de/konstruktionsrichtlinien\\_mjf\\_374.pdf](https://www.rapidobject.com/csdata/download/1/de/konstruktionsrichtlinien_mjf_374.pdf) [Stand: 3.September.2021]

HUBS B.V. (2021): *3D Druck Verfahren*  
<https://www.hubs.com/de/leitfaden/3d-druck/#technologies> [Stand: 04.September.2021]

Interlink Electronics *FSR 402 Data Sheet*  
<https://www.trossenrobotics.com/productdocs/2010-10-26-DataSheet-FSR402-Layout2.pdf> [Stand: 17..September.2021]

NinjaTek *Flexible Polyurethane Material for FDM Printers*  
<https://ninjatek.com/wp-content/uploads/NinjaFlex-TDS.pdf> [Stand: 10.Oktober.2021]

PrimaCreator *PrimaSelect™ FLEX*  
<https://primacreator.com/collections/flexible/products/primaselect%E2%84%A2-flex?variant=61778918155> [Stand: 12.Oktober.2021]

igus® GmbH (2021): *roboLink® Low Cost-Roboter als Komplettsystem oder Individuallösung*  
<https://www.igus.de/info/roboLink-guenstige-roboterarme-kaufen> [Stand: 25.Oktober.2021]

Ultimaker BV (2017): *Ultimaker ABS TDS*

<https://support.ultimaker.com/hc/en-us/articles/360012759139-Ultimaker-ABS-TDS> [Stand: 15.September.2021]

PrimaCreator *PRIMASELECT™ FLEX*

<https://primacreator.com/collections/flexible/products/primaselect%E2%84%A2-flex?variant=61778917515> [Stand: 15.September.2021]

Formlabs GmbH (2020): *Tough 2000 Resin*

<https://formlabs-media.formlabs.com/datasheets/2001340-TDS-DE-0P.pdf> [Stand: 15.September.2021]

Formlabs GmbH (2021): *Tough 1500 Resin*

<https://formlabs-media.formlabs.com/datasheets/2001292-TDS-DE-0.pdf> [Stand: 15.September .2021]

Stratasys Ltd. (2021): *Agilus30*

<https://www.stratasys.com/de/materials/search/agilus30> [Stand: 15.September.2021]

Stratasys Ltd. (2021): *Elastico™*

<https://www.stratasys.com/materials/search/elastico> [Stand: 15.September.2021]

Materialise (2021): *Materialise Datasheets*

[https://www.materialise.com/system/files/resources/materialise\\_datasheets\\_04\\_06\\_2021%20.pdf](https://www.materialise.com/system/files/resources/materialise_datasheets_04_06_2021%20.pdf) [Stand: 30.September.2021]

Stratasys Ltd. (2018): *Durus*

<https://www.stratasys.com/materials/search/durus> [Stand: 30.September.2021]

Stratasys Ltd. (2021): *Digital ABS plus*

<https://www.stratasys.com/materials/search/digital-abs-plus> [Stand: 15.Oktober.2021]

Sinterit sp. z o.o. *PA11 Onyx*

[https://www.sinterit.com/wp-content/uploads/2020/12/Sinterit-Powders\\_Specification-PA11-Onyx.pdf](https://www.sinterit.com/wp-content/uploads/2020/12/Sinterit-Powders_Specification-PA11-Onyx.pdf) [Stand: 1.Oktober.2021]

makerguides.com *Force Sensing Resistor (FSR) with Arduino Tutorial*

<https://www.makerguides.com/fsr-arduino-tutorial/> [Stand: 30.Oktober.2021]

Formfutura BV (2021): *Engineering LCD Series - Strong Resin*

<https://www.formfutura.com/shop/product/elcd-blck-0500-engineering-lcd-series-strong-resin-7726?category=531> [Stand: 2.November.2021]

Liqcreate (2021): *Flexible-X*

<https://www.liqcreate.com/product/flexible-x/> [Stand: 11.November.2021]

Ultimaker BV (2018): *Ultimaker Tough PLA TDS*

<https://support.ultimaker.com/hc/en-us/articles/360012759599-Ultimaker-Tough-PLA-TDS> [Stand: 11.November.2021]

Liqcreate (2021): *Tough-X*

<https://www.liqcreate.com/product/tough-x/> [Stand: 11.November.2021]

Liqcreate (2021): *Clear Impact*

<https://www.liqcreate.com/product/clear-impact/> [Stand: 11.November.2021]

Ultimaker BV (2017): *Ultimaker Nylon TDS*

<https://support.ultimaker.com/hc/en-us/articles/360011962600-Ultimaker-Nylon-TDS> [Stand: 11.November.2021]

Universal Robots A/S (2021): *MGRIP P2 COBOT KIT*

<https://www.universal-robots.com/plus/products/soft-robotics/mgrip-p2-cobot-kit/> [Stand: 8.Oktober.2021]

Della Santina, Cosima (2021): *Soft Robots*

<https://www.researchgate.net/publication/346266320> [Stand: 12.August.2021]

Erickson, Angelle (2018): *7 Principles for Design for Additive Manufacturing (DfAM)*

<https://www.cati.com/blog/2018/12/7-design-additive-manufacturing-dfam-principles/> [Stand: 14.August.2021]

Eutebach, Niklas (2020): *blog.igus.de*

<https://blog.igus.de/konstruktionstipps-multi-material-bauteile-aus-dem-3d-drucker/> [Stand: 12.Juni.2021]

Fras, Jan (2016): *Soft Flexible Gripper Design, Characterization and Application*

[https://www.researchgate.net/publication/311255090\\_Soft\\_Flexible\\_Gripper\\_Design\\_Characterization\\_and\\_Application](https://www.researchgate.net/publication/311255090_Soft_Flexible_Gripper_Design_Characterization_and_Application) [Stand: 17.August.2021]

Gärtner, Ralf (2021): *Multi Jet Fusion*

<https://www.protiq.com/3d-druck/verfahren/multi-jet-fusion/> [Stand: 27.August.2021]

Large, Martin (2021): *all- electronics*

<https://www.all-electronics.de/automatisierung/wie-sensorik-in-gedruckten-verschleissteilen-wartungsbedarf-meldet-101.html> [Stand: 10.Juli.2021]

Mammerler, Raphael (2019): *ULTIMAKER S5: MULTI MATERIAL 3D-DRUCK*

<https://3dee.at/ultimaker-s5-multi-material-3d-druck/> [Stand: 30.September.2021]

May, Markus; Zaremba, Johannes *Übersicht über die häufigsten 3D-Druck Dateiformate*

<https://3faktor.com/uebersicht-ueber-die-haeufigsten-3d-druck-dateiformate/> [Stand: 24.August.2021]

Pietrala, Dawid (2017): *The characteristics of a pneumatic muscle*

[https://www.researchgate.net/publication/316890962\\_The\\_characteristics\\_of\\_a\\_pneumatic\\_muscle](https://www.researchgate.net/publication/316890962_The_characteristics_of_a_pneumatic_muscle) [Stand: 29.August.2021]

Salem, Mohamed E.M.; Wang, Qiang; Wen, Ruoshi; Xiang, Ma (2018): *Design and Characterization of Soft Pneumatic Actuator for Universal Robot Gripper*

[https://www.researchgate.net/publication/328987826\\_Design\\_and\\_Characterization\\_of\\_Soft\\_Pneumatic\\_Actuator\\_for\\_Universal\\_Robot\\_Gripper](https://www.researchgate.net/publication/328987826_Design_and_Characterization_of_Soft_Pneumatic_Actuator_for_Universal_Robot_Gripper) [Stand: 17.August.2021]

Schwarz, Katrin (2020): *ikts.fraunhofer.de*

[https://www.ikts.fraunhofer.de/de/presse/pressemitteilungen/2020\\_09\\_02\\_forschung\\_kompakt\\_additive\\_fertigung\\_von\\_multifunktionalen\\_bauteilen.html](https://www.ikts.fraunhofer.de/de/presse/pressemitteilungen/2020_09_02_forschung_kompakt_additive_fertigung_von_multifunktionalen_bauteilen.html) [Stand: 12.Juni.2021]

Tirado-Garcia, I.; Garcia-Gonzalez, D.; Garzon-Hernandez, S.; Rusinek, A.; Robles, G.; Martinez-Tarifa, JM; Arias, A. (2021): *Conductive 3D printed PLA composites: On the interplay of mechanical, electrical and thermal behaviours*

<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0263822321002051?token=A700621A0E9C3C279BB758A05AC28267435C4BDA83A62BC8431CAD85C84DD3D4D0E55213602F2F023B779E7A7C531478&originRegion=us-east-1&originCreation=20210912091822> [Stand: 12.September .2021]

## ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

FLM.....	Fused Layer Modeling
FFF.....	Fused Filament Fabrication
FDM.....	Fused Desposition Modeling
SLA....	Stereolithographie (Verfahren)
DLP.....	Digital Light Processing
SLS.....	Selective Laser Sintering
MJF.....	Multi Jet Fusion
3D.....	Dreidimensional
2D.....	Zweidimensional
DfAM.....	Design for Additive Manufacturing
FSR....	Force Resistance Sensor
MMAM.....	Multi- Material Additive Manufacturing
UV- Licht.....	Ultraviolettes Licht
CT.....	Computertomographie
CAD.....	Computer Aided Design
3MF.....	3D Manufacturing Format
STL....	Stereolithografie (Dateiformat)
AMF.....	Additive Manufacturing File Format
TPU.....	Thermoplastisches Polyurethan
PLA....	Polyactide (Thermoplast)
ABS.....	Acrylnitril- Butadien- Styrol- Copolymer (Thermoplast)
FF.....	FormFutura (Resin- Hersteller)
PC.....	Polycarbonat
PA.....	Polyamid
k. A. ...	Keine Angabe
HP....	Hewlett Packard (Firma)
KLT.....	Kleinladungsträger
NO....	Normally open
NC....	Normally closed

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1: Prinzip des induktiven Näherungsschalters, Quelle: Schnell (1993), S. 5.....	10
Abb. 2: Funktion eines induktiven Näherungsschalters, Quelle: KEYENCE International, Online-Quelle [25.August.2021].....	11
Abb. 3: Greifer mit induktiven Sensoren, Quelle: Müller/Franke/Henrich/Kuhlenkötter/Raatz/Verl (2019), S. 82.....	11
Abb. 4: Prinzip Reedkontakt, Quelle: Ebel/Idler/Prede/Scholz (2014), S. 132.....	12
Abb. 5: Reedkontakt- Auslösung, Quelle: Regtien (2012), S. 137. ....	12
Abb. 6: Prinzip des Reflexionslichtschrank, Quelle: Schnell (1993), S. 76. ....	13
Abb. 7: Schematischer Aufbau der Durchlichtschanke, Quelle: Schnell (1993), S. 77. ....	14
Abb. 8: Bauformen von kompakten Einweglichtschrank, Quelle: Hesse/Schnell (2014), S. 82.....	14
Abb. 9: Anbringungsbeispiele für Winkellichtschrank, Quelle: Hesse/Schnell (2014), S. 83.(leicht modifiziert).....	15
Abb. 10: Prinzip Reflexlichttaster, Quelle: Schnell (1993), S. 76. ....	15
Abb. 11: Reflexionslichtschanke mit HGA- Ausblendung, Quelle: Baumer Holding AG, Online-Quelle [25.August.2021].....	16
Abb. 12: Eigenschaften der verschiedenen Antriebe, Quelle: Hesse (2011), S. 42.....	17
Abb. 13: Schunk EGN mit Keilhakenprinzip, Quelle: Schunk GmbH & Co. KG (2021), Online-Quelle [30.Juli.2021]. ....	18
Abb. 14: Antriebsquerschnitte Fluid, Quelle: Feldmann/Schöppner/Spur (2014), S. 341.....	19
Abb. 15: Pneumatischer Parallelgreifer Schunk PGN, Quelle: Schunk GmbH & Co. KG (2021), Online-Quelle [30.Juli.2021]. ....	20
Abb. 16: Verlauf des Momentes zur Fingerstellung beim Radialgreifer, Quelle: Hesse (2011), S. 73.....	21
Abb. 17: Aufbau eines Radialgreifers (Zimmer Group), Quelle: Zimmer Group GmbH, Online-Quelle [31.Juli.2021]. ....	22
Abb. 18: Haltekraft eines Winkelgreifers abhängig von der Fingerlänge $b$ , Quelle: Hesse (2011), S. 74. ....	22
Abb. 19: Innengreifer Aufbau, Quelle: Zimmer Group GmbH, Online-Quelle [Juli.2021.Juli]. ....	23
Abb. 20: Aufbau des Dreibackengreifers mit Keilhakenprinzip, Quelle: Zimmer Group GmbH, Online-Quelle [31.Juli.2021]. ....	23
Abb. 21: Dauermagnetgreifer FIPA, Quelle: FIPA GmbH, Online-Quelle [1.August.2021]. ....	24
Abb. 22: Variationen von Sauggreifern, Quelle: J. Schmalz GmbH, Online-Quelle [1.August.2021].....	25
Abb. 23: Vakuum- Ejektoren, Quelle: J. Schmalz GmbH, Online-Quelle [1.August.2021]. ....	25
Abb. 24: FLM/ FFF Druckverfahren, Quelle: DruckWege GmbH, Online-Quelle [10.Juni.2021]. ....	30

Abb. 25: Verschiedene Körper im FDM Multimaterialdruck, Quelle: Eigene Darstellung.....	31
Abb. 26: Vereinigung der Bauteile im Slicer, Quelle: Eigene Darstellung.....	32
Abb. 27: Materialkombinationen FDM- Multimaterial- Druck, Quelle: Mammerler (2019), Online-Quelle [30.September.2021]. .....	32
Abb. 28: SLA- Verfahren, Quelle: Formlabs, Online-Quelle [27.August.2021], S. 4. ....	33
Abb. 29: DLP- Verfahren, Quelle: Breuninger/Becker/Wolf/Rommel/Verl (2013), S. 38. ....	35
Abb. 30: Schema SLS- Druck, Quelle: Formlabs (2021), Online-Quelle [27.August.2021], S. 4.....	36
Abb. 31: Arbeitsschritte SLS- 3D Druck, Quelle: Schmid (2015), S. 10. ....	36
Abb. 32: Schema HP Multi Jet Fusion, Quelle: HP Development Company, L.P. (2018), Online-Quelle [27.August.2021], S. 3.....	37
Abb. 33: Funktionsschema MJF, Quelle: HP Development Company, L.P. (2018), Online-Quelle [27.August.2021].....	37
Abb. 34: Schema PolyJet- Verfahren, Quelle: HUBS B.V. (2021), Online-Quelle [04.September.2021]...39	39
Abb. 35: PolyJet Druckvorgang, Quelle: Redwood/Schöffner/Garret (2017), S. 130.....	39
Abb. 36: Workflow 3D Druck, Quelle: Komorowsky (2014), S. 14.....	41
Abb. 37: Slicing mit CURA, Quelle: Eigene Darstellung. ....	45
Abb. 38: Beispiel für die Ausrichtung eines Soft- Grippers auf der Plattform (SLA und DLP), Quelle: Eigene Darstellung.....	46
Abb. 39: Verschleißsensor von igus, Quelle: igus GmbH, Online-Quelle [10.Juli.2021]. ....	48
Abb. 40: Additiver DMS- Schichtaufbau im Vergleich zu konventionellem Sensor, Quelle: Rehberger/Noll (2020), S. 47.....	49
Abb. 41: Additiv hergestellter DMS auf Metallbauteil, Quelle: Rehberger/Noll (2020), S. 48. ....	50
Abb. 42: Aufbau eines Metallfolien DMS, Quelle: Tränkler/Reindl (2015), S. 439. ....	51
Abb. 43:Dünnschicht- Drucksensor für Robotik, Quelle: Joy-IT (2020), Online-Quelle [11.Juli.2021].....	51
Abb. 44: Gedruckter Faltenbalg Fraunhofer, Quelle: Becker/Grzesiak (2006), EP1943064B1. ....	52
Abb. 45: Kraft- Kontraktionsverlauf des DMSP-5-100N, Quelle: Festo Ges.m..b.H. (2019), Online-Quelle [29.August.2021], S. 14.....	54
Abb. 46: Bauformen Fluidic Muscle von Festo, Quelle: Ebel/Idler/Prede/Scholz (2014), S. 45.....	54
Abb. 47: Mechanisch betätigter Soft Robotic Greifer, Quelle: Laschi/Rossiter/Iida/Cianchetti/Margheri (2017), S. 90.....	55
Abb. 48: Pneumatisch betätigter Soft Robotic Greiferfinger, Quelle: Salem/Wang/Wen/Xiang (2018), Online-Quelle [17.August.2021], S. 7f. (leicht modifiziert) .....	56

Abb. 49: FE- Simulation Soft- Greiferfinger, Quelle: Salem/Wang/Wen/Xiang (2018), Online-Quelle [17.August.2021], S. 7.....	56
Abb. 50: Soft- Gripper am Cobot montiert, Quelle: Universal Robots A/S (2021), Online-Quelle [8.Oktober.2021]. .....	57
Abb. 51: Vergleich FDM mit und ohne Support, Quelle: Erickson (2018), Online-Quelle [14.August.2021]. .....	64
Abb. 52: Tough Materialien, Quelle: Eigene Darstellung. ....	68
Abb. 53: Soft Materialien, Quelle: Eigene Darstellung.....	69
Abb. 54: Erster Modellentwurf als Grundlage (Winkelgreifer m. gedruckter Aktorik): Quelle: Eigene Darstellung. ....	70
Abb. 55: Greifer mit gedruckter Aktorik: Offen und vorgespannt, Quelle: Eigene Darstellung. ....	71
Abb. 56: Vernetzung des Greifermodells, Quelle: Eigene Darstellung. ....	71
Abb. 57: Fixierte Flächen und Kraft, Quelle: Eigene Darstellung. ....	72
Abb. 58: Ausgangsform und verformtes Resultat, Quelle: Eigene Darstellung.....	72
Abb. 59: Belastete Zonen im Bereich Filmscharnier und Feder, Quelle: Eigene Darstellung.....	73
Abb. 60: Angriffsfläche für den Aktor, Quelle: Eigene Darstellung. ....	73
Abb. 61: Ergebnisse Simulation für Öffnung des Greifers: Quelle: Eigene Darstellung. ....	74
Abb. 62: Exportieren als Multikörper- Teil, Quelle: Eigene Darstellung. ....	74
Abb. 63: Definition Füllung und Modell wieder zusammenfügen, Quelle: Eigene Darstellung. ....	75
Abb. 64: Mutikörper- Part mit verschiedenen Füllungen, Quelle: Eigene Darstellung.....	75
Abb. 65: Faltenbalgfunktion anhand eines ersten Entwurfes, Quelle: Eigene Darstellung.....	76
Abb. 66: Festigkeits- Dehnungsdiagramm Formlabs Tough 2000, Quelle: Eigene Darstellung. ....	77
Abb. 67: Ausdehnung des Faltenbalgs bei 6 bar Innendruck, Quelle: Eigene Darstellung. ....	78
Abb. 68: Faltenbalg- Geometrie für Studie, Eigene Darstellung. ....	78
Abb. 69: Beispielbild Simulationsreihe Faltenbalg, Quelle: Eigene Darstellung. ....	79
Abb. 70: Schematischer Aufbau des Testaufbaus für den Faltenbalg, Quelle: Eigene Darstellung. ....	81
Abb. 71: Faltenbalg Geometrie Nr. 1, Quelle: Eigene Darstellung. ....	81
Abb. 72: Faltenbalg Geometrie Nr. 2, Quelle: Eigene Darstellung. ....	82
Abb. 73: Faltenbalg Geometrie Nr. 3, Quelle: Eigene Darstellung. ....	82
Abb. 74: Geometrie Soft- Robotic Innengreifer, Quelle: Eigene Darstellung. ....	87
Abb. 75: Festigkeits- Dehnungs- Diagramm NinjaFlex, Quelle: Tawk/Alici (2020), S. 4. ....	88
Abb. 76: Mooney- Rivlin- Parameter NinjaFlex, Quelle: Tawk/Alici (2020), S. 7.....	89

Abb. 77: Simulierte Verformung NinjaFlex- Innengreifer, Quelle: Eigene Darstellung .....	89
Abb. 78: Reale Verformung Soft- Robotic- Innengreifer (Versuch 1), Quelle: Eigene Darstellung. ....	90
Abb. 79: Erfolg durch Abdichtung mit einem Imprägniermittel, Quelle: Eigene Darstellung. ....	91
Abb. 80: Reale Verformung Soft- Robotic- Innengreifer (Versuch 2), Quelle: Eigene Darstellung. ....	92
Abb. 81: Optimierte Geometrie Soft- Innengreifer, Quelle: Eigene Darstellung. ....	93
Abb. 82: Vergleich der Vergleichsspannung zwischen ersten Versuch und optimierter Geometrie, Quelle: Eigene Darstellung. ....	93
Abb. 83: Prüfaufbau Soft- Robotic- Innengreifer, Quelle: Eigene Darstellung. ....	94
Abb. 84: Aufbau leitfähiges Filament, Quelle: Tirado-Garcia/Garcia-Gonzalez/Garzon- Hernandez/Rusinek/Robles/Martinez-Tarifa/Arias (2021), Online-Quelle [12.September .2021], S. 3. ....	96
Abb. 85: Diagramm Messung ungedrucktes Filament, Quelle: Eigene Darstellung. ....	97
Abb. 86: Messung ungedrucktes Filament, Quelle: Eigene Darstellung. ....	98
Abb. 87: Messprobe ProtoPasta, Quelle: Eigene Darstellung .....	98
Abb. 88: Vergleich der Messungen am ProtoPasta Filament (Anisotropie), Quelle: Eigene Darstellung. ....	100
Abb. 89: Vergleich der Messungen anhand des Querschnittes, Quelle: Eigene Darstellung. ....	101
Abb. 90: Schema Sensorauswertung, Quelle: Eigene Darstellung. ....	102
Abb. 91: Aufbau eines FSR- Sensors, Quelle: makerguides.com, Online-Quelle [30.Oktober.2021]. ....	103
Abb. 92: Kraft- Widerstands Diagramm FSR 402, Quelle: Interlink Electronics, Online-Quelle [17..September.2021], S. 1. ....	104
Abb. 93: Schaltung FSR Signal messen, Quelle: Eigene Darstellung. ....	105
Abb. 94: Spannungs- Kraftverlauf im Spannungsteiler (FSR 402), Quelle: Interlink Electronics, Online- Quelle [17..September.2021] .....	105
Abb. 95: Schema des FSR- Sensors für den Robotergreifer, Quelle: Eigene Darstellung. ....	106
Abb. 96: Umsetzung eines Druckschalters, Quelle: Eigene Darstellung. ....	107
Abb. 97: Verformung des Betätigers durch Druckluft, Quelle: Eigene Darstellung. ....	107
Abb. 98: Umsetzung des Steckbretts im Multimaterialdruck, Quelle: Eigene Darstellung. ....	108
Abb. 99: Zu handhabende Steckerhülse, Quelle: Eigene Darstellung. ....	109
Abb. 100: Kleinladungsträger für die Steckerhülsen, Quelle: Eigene Darstellung. ....	110
Abb. 101: Ist- Situation KLT- Greifer, Quelle: Eigene Darstellung. ....	111
Abb. 102: Übersicht Design KLT- Greifer aus dem 3D- Drucker, Quelle: Eigene Darstellung. ....	112
Abb. 103: Übersicht 2 Design KLT- Greifer, Quelle: Eigene Darstellung. ....	113
Abb. 104: Simulation des Greiferkörpers, Quelle: Eigene Darstellung. ....	114

Abb. 105: Slicing des KLT- Greifers (Körper), Quelle: Eigene Darstellung.....	115
Abb. 106: Faltenbalgaktor für KLT- Greifer, Quelle: Eigene Darstellung.....	116
Abb. 107: Simulation des Faltenbalgs im Assembly, Quelle: Eigene Darstellung. ....	116
Abb. 108: Schematische Darstellung der Sensorik am KLT- Greifer, Quelle: Eigene Darstellung. ....	117
Abb. 109: Ist- Situation des Hülsengreifers, Quelle: Eigene Darstellung.....	119
Abb. 110: Design Hülsengreifer mit Teilschnitt auf der linken Seite, Quelle: Eigene Darstellung.....	120
Abb. 111: Simulation des Hülsengreifers, Quelle: Eigene Darstellung.....	121
Abb. 112: Systembaukasten Aktorik, Quelle: Eigene Darstellung.....	122
Abb. 113: Systembaukasten Sensoren, Quelle: Eigene Darstellung. ....	123
Abb. 114: Low- Cost- Roboter von Igus, Quelle: igus® GmbH (2021), Online-Quelle [25.Oktober.2021]. .....	126

## TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Einordnung der ausgewählten Sensoren, Quelle: Eigene Darstellung. ....	26
Tabelle 2: Übersicht der konventionellen Aktoren, Quelle: Eigene Darstellung. ....	27
Tabelle 3: Übersicht über die 3D Druck Verfahren, Eigene Darstellung. ....	40
Tabelle 4: Gestaltungsziele für Additive Fertigung, Quelle: Eigene Darstellung. ....	59
Tabelle 5: Richtlinie Mindestwandstärken, Quelle: Formlabs (2021), Online-Quelle [3.September.2021]. (leicht modifiziert).....	60
Tabelle 6: Richtlinie Toleranzen, Quelle: Eigene Darstellung. ....	60
Tabelle 7: DfAM Auswirkungsmatrix, Quelle: Eigene Darstellung. ....	63
Tabelle 8: Bewertung der Verfahren für Teillösungen, Quelle: Eigene Darstellung. ....	65
Tabelle 9: Geeignete Materialien für Aktorik- Teillösungen, Quelle: Eigene Darstellung. ....	67
Tabelle 10: Auswertung Simulation Faltenbalg Teil 1, Quelle: Eigene Darstellung. ....	79
Tabelle 11: Auswertung Simulation Faltenbalg Teil 2, Quelle: Eigene Darstellung. ....	80
Tabelle 12: Auswertung getestete Faltenbälge SLA- Verfahren, Quelle: Eigene Darstellung. ....	83
Tabelle 13: Auswertung getestete Faltenbälge DLP- Verfahren, Quelle: Eigene Darstellung. ....	85
Tabelle 14: Auswertung getestete Faltenbälge MJF- Verfahren, Quelle: Eigene Darstellung. ....	85
Tabelle 15: Auswertung getestete Faltenbälge SLS- Verfahren, Quelle: Eigene Darstellung. ....	86
Tabelle 16: Ergebnisse NinjaFlex Innengreifer, Quelle: Eigene Darstellung. ....	90
Tabelle 17: Materialwerte NinjaFlex, Quelle: NinjaTek, Online-Quelle [10.Oktober.2021]. ....	90
Tabelle 18: Materialwerte PrimaSelect, Quelle: PrimaCreator, Online-Quelle [12.Oktober.2021]. ....	92
Tabelle 19: Ergebnisse Innengreifer, Quelle: Eigene Darstellung. ....	94
Tabelle 20: Messergebnisse ungedrucktes Filament, Quelle: Eigene Darstellung. ....	97
Tabelle 21: Ergebnisse Messung entlang der Schichten, Eigene Darstellung. ....	99
Tabelle 22: Ergebnisse Messung entgegen den Schichten, Eigene Darstellung. ....	99
Tabelle 23: Ergebnisse Messung schräg gedrucktes Filament, Eigene Darstellung. ....	100

## ANHANG 1: PRÜFSTAND CODE

```
#include <LiquidCrystal.h>
#define fsrpin A0

//RS, E, D4, D5, D6, D7
LiquidCrystal lcd(11,10,2,3,4,5);

int valvePin = 12;
int relievePin = 13;
int fsrreading; //Variable to store FSR value
int HubAnzahl=0; // Ventil betätigt
int touches = 0; // Balg ausgefahren
int notouches = 0; // Balg nicht ausgefahren

void setup() {
  // put your setup code here, to run once:
  analogWrite(9, 150);

  lcd.begin(16,2);
  lcd.setCursor(0, 0);

  Serial.begin(9600);
  pinMode(valvePin, OUTPUT);
  pinMode(relievePin, OUTPUT);

  analogWrite(9, 150);
  lcd.begin(16,2);
  lcd.setCursor(0,0);
  lcd.print("Campus02");
  delay(2000);
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print("Hub:");
  lcd.setCursor(9,0);
  lcd.print("ANA:");
}

void loop() {
  while (notouches < 10)
  {
    // put your main code here, to run repeatedly:

    digitalWrite(valvePin, HIGH);
    Serial.print("Hub:");

    lcd.setCursor(4,1);
```

```
    lcd.print(HubAnzahl);
HubAnzahl = HubAnzahl + 1; //Hubzähler
Serial.print(HubAnzahl);
delay(3000); // Druck entfalten lassen
    fsrreading = analogRead(fsrrpin);

    if (fsrreading > 10) {
        touches = touches +1;
    }
    else {
        notouches = notouches +1;
    }

//Tatsächlicher Anschlag
Serial.print(" Touches: ");
Serial.print(touches);

    lcd.setCursor(10,1);
    lcd.print("/");
    lcd.setCursor(11,1);
    lcd.print(touches);

    Serial.print (" NO: ");
    Serial.print(notouches);

    Serial.print(" --> Analog reading = " );

    Serial.println(fsrreading);
// Print the fsrreading:
    lcd.setCursor(12,0);
    lcd.print(fsrreading);

    digitalWrite(valvePin, LOW);
    delay(500); //Einlassluft abschalten
    digitalWrite(relievePin, HIGH);
    delay(1000); //Luft auslassen
    digitalWrite(relievePin, LOW); // Auslassvetil schließen
    lcd.setCursor(12,0);
    lcd.print("    ");
    delay(100); //Delay bis zum HIGH von Einlassventil
}
Serial.println ("Faltenbalg gebrochen"); //Exception wenn Delta >10
    lcd.setCursor(9,0);
    lcd.print("Broken");
    delay(60000); //Schreibt alle 1 Minuten ein FB gebrochen auf den Serial
Monitor
}
```

## ANHANG 2: DATENBLATT PROTOPASTA (ELECTRIC. CONDUCTIVE)

# Proto-pasta

Technical Data Sheet Rev. 1

### Translucent / Sparkly (HTPLA)

Proto-pasta's 2 main HTPLA categories are Translucent and Sparkly. All materials in these categories print similar to standard PLA but can be heat treated for higher temperature resistance. This durable PLA has a theoretical Heat Deflection Temperature (HDT) of more than 140C (285F) after heat treating. This means HTPLA parts maintain strength and form too much higher temperatures than PLA, ABS, or Polyesters like PET which loose structure as soon as 55C and by 100C.

### Material Properties

Properties	Value/Description
Base material	Heat treatable PLA w/ high temp resistance
Characteristics	low odor, non-toxic, renewably sourced
Molecular structure	Amorphous or partially crystalline (Amorphous as printed, part crystalline when heat-treated) (Melting resets crystalline structure to amorphous state)
Additives	Minimal color added
Max particle size	0.1 mm (may limit resolution)
Density	approx. 1.24 g/cc
Length	approx. 346 m/kg (1.75 mm) & 130 m/kg (2.85 mm)
Min bend diameter	15 mm (1.75 mm) & 40 mm (2.85 mm)
Glass transition (Tg) onset	approx. 60 deg C (140 deg F)
Melt point (Tm) onset	approx. 155 deg C (310 deg F)
Max use	Tg for amorphous, Tm for crystalline

*Use limit is geometry, load & condition dependent*

### Print Settings

(Based on Ultimaker s5 .15mm Profile)

Setting	Value
Nozzle Temperature [°C]	206
Heated Bed Temperature [°C]	60
Print Speed [mm/s]	25-45
Flow Rate/Extrusion Multiplier [%]	100
Extrusion Width [mm]	.45 (.05mm larger than nozzle size)
Volume Flow Rate [mm³/s]	2-3

### Heat Treating (for heat-treating only)

HTPLA is a semi-crystalline grade of PLA optimized for heat-treating for higher temperature use. Prior to printing, HTPLA parts should be scaled in the slicer to compensate for shrinkage when heat treating. (Please note that all values for heat-treating are process dependent and may vary between users)

Part Axis	Percentage
Scale Values (x/y-axis)	102.2%
Scale Values (z-axis)	99%

(a large range of temperatures & times can yield acceptable results)

Typical Heat Treat Temperature	Typical Heat Treat Time
95-110 °C	10+ minutes

For a more in-depth look at heat treating please view [proto-pasta.com/translucent](http://proto-pasta.com/translucent) and [proto-pasta.com/sparkly](http://proto-pasta.com/sparkly)

*Results may vary based on print settings as well as print quality*