



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorarbeit
Henrik Wortmann
Iterative Konstruktion eines
individualisierten Force-Feedback
Handschuhs mittels
Rapid-Prototyping-Techniken

Henrik Wortmann

Iterative Konstruktion eines individualisierten
Force-Feedback Handschuhs mittels
Rapid-Prototyping-Techniken

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung
im Studiengang Mechatronik
an der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer : Prof. Dr. rer. nat. Thomas Lehmann
Zweitgutachter : Prof. Dr.-Ing. Günther Gravel

Abgegeben am 8. April 2017

Henrik Wortmann

Thema der Bachelorarbeit

Iterative Konstruktion eines individualisierten Force-Feedback Handschuhs mittels Rapid-Prototyping-Techniken

Stichworte

Parametrisierung, rapid-prototyping, 3D-Druck, Handschuh, Force-Feedback, virtuelle Realität, Interaktion, additive Fertigung, Krafterückmeldung, haptisches Feedback, Eingabegerät, Exoskelett

Kurzzusammenfassung

In dieser Arbeit wird ein Force-Feedback Handschuh entwickelt, der eine Kraft zwischen Daumen und Zeigefinger erzeugen kann. Zusätzlich wird die Konstruktion parametrisiert, damit jeder Nutzer einen für sich passenden Handschuh bekommt. Die Produktion erfolgt im 3D-Druck. Auf diese Weise kann schnell und kostengünstig ein individueller Handschuh gefertigt werden. Mit einfacher Elektronikausstattung wird die Basis für erste Versuche geliefert.

Henrik Wortmann

Title of the paper

Iterative construction of an individual force-feedback glove using rapid-prototyping-technologies

Keywords

parametric, force-feedback, glove, rapid-prototyping, 3D-printing, interaction, human-computer interface, virtual reality, exoskeleton, haptic feedback

Abstract

This paper describes the development and construction of a parametric glove giving force-feedback between thumb and index finger. Every user will be allowed to include his own finger parameters in the design. The glove will be produced using rapid-prototyping technologies (especially 3D-printing) for quick and cost-efficient production of individualized gloves. A basic electronic design will provide a platform for first testing.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen	4
2.1	Kooperation mit dem CSTI	4
2.2	Virtual Reality	4
2.2.1	Faktoren der Wahrnehmung in realer und virtueller Welt	5
2.3	Die menschliche Hand	6
2.3.1	Freiheitsgrade	6
2.3.2	Griffarten	6
2.4	Bisherige Entwicklungen	7
2.4.1	Anforderungen an ein Feedback bei Telepräsenz	8
2.4.2	Erste Force-Feedback Entwicklung zur Robotersteuerung	8
2.4.3	m·ReS ^{X1} & m·ReS ^{X2}	8
2.4.4	Festo Exohand	9
2.4.5	Dexmo	9
2.4.6	Cybergrasp	9
2.4.7	Bewertung der bisherigen Entwicklungen	10
2.5	Rapid-Prototyping	10
3	Rapid-Prototyping	11
3.1	Stereolithographie und 3D-Druck	11
3.2	Richtlinien der Konstruktion im 3D-Druck	13
3.3	Möglichkeiten der vorhandenen Drucker	13
3.3.1	Das Koordinatensystem	15
3.3.2	Materialien und Genauigkeiten	16
3.3.3	Einfluss der Druckrichtung	17
3.3.4	Stützstrukturen in FLM- und SL-Verfahren	17
3.4	Versuche mit neuer Düse und unterschiedlichen Materialien	18
3.4.1	Versuch 1: Feststellung des minimal nötigen Lagerfreiraumes	18
3.4.2	Versuch 2: Druckmaße für den Einbau von Spritzgusslagern	25
4	Entwicklung der Handschuhprototypen	27
4.1	Anforderungen und Rahmenbedingungen	27
4.1.1	Explizite Anforderungen durch Aufgabenstellung	27

4.2	Unterteilung der Konstruktion in einzelne Lösungsschritte	29
4.2.1	Konstruktionsaufbau	29
4.2.2	Kraftübertragung	30
4.2.3	Fixierung auf der Hand	31
4.2.4	Gelenke/Lagerung	31
4.2.5	Befestigung der Finger (MCP-Gelenk)	31
4.2.6	Befestigung des Daumens	32
4.3	Erfassung der Konstruktionsparameter	32
4.4	Auswahl der Konstruktionssoftware	32
4.4.1	Auswahlkriterien	33
4.4.2	Begründung der Auswahl von Autodesk Fusion	33
4.5	Entwicklung des ersten Prototypen	34
4.5.1	Auswahl der Teillösungen	34
4.5.2	Bewertung	36
4.6	Prototyp 2	37
4.6.1	Auswahl der Verbesserungen	38
4.6.2	Mathematischer Nachweis der erforderlichen Verschiebung	39
4.6.3	Funktionsprüfung	39
4.6.4	Ergebnis	40
4.7	Auswahl von Sensoren und Aktoren	40
4.7.1	Kriterien für die Aktorauswahl	41
4.7.2	Auswahl des Servos	42
4.7.3	Anforderungen an den Mikrocontroller	42
4.7.4	Auswahl des Mikrocontrollers	43
4.7.5	Anbindung des Servos	43
4.8	Finales Modell	45
4.8.1	Veränderungen zu Prototyp 2	46
4.8.2	Halterung für Aktorik	46
4.8.3	Besonderheiten beim Druck	47
4.8.4	Nachbearbeitung	48
4.8.5	Zusammenbau	48
4.9	Anpassungsmöglichkeiten der Parameter	49
5	Fazit und Ausblick	50
	Literatur	53
	Anhang	57
6.1	Tabellen der Konstruktionsparameter	57
6.2	Mögliche Konstruktionslösungen	59
6.3	Ansteuerung der Servos	61
6.4	Konstruktionszeichnungen	62

6.5 Digitaler Anhang 75

Tabellenverzeichnis

3.1	Konstruktionsrichtlinien im 3D-Druck	13
3.2	Parameter der Drucker	16
3.3	Eigenschaften der Druckmaterialien	16
3.4	Versuchsergebnisse zum Lagerfreiraum	21
3.5	Soll-Ist-Vergleich des Zapfenmaßes beim Versuchsteil	23
3.6	Nötige Maßanpassung von Zapfen und Bohrungen	26
4.1	Softwareauswahl	33
6.1	Tabelle der zu messenden Parameter	57
6.2	Tabelle der Akzorhalterparameter	58
6.3	Bewertung der Konstruktionslösungen	60

Abbildungsverzeichnis

2.1	Freiheitsgrade der menschlichen Hand	7
3.1	Der Treppenstufeneffekt	12
3.3	Beispiel für die Verwendung von Fasen und Rundungen zur Stabilitätsverbesserung	14
3.4	Der Handschuh im Bauraum mit Koordinatensystem	15
3.5	Bruch durch abgescherte Schichten	17
3.6	Das Versuchsteil	19
3.7	Stützstrukturen im SL-Druck	20
3.8	Oberflächenvergleich: Links mit feiner Düse (T10), Rechts mit grober Düse (T16)	21
3.9	Vergleich der Materialien von links nach rechts: ABS, Nylon, Polycarbonat, Harz	23
3.10	Das Versuchsteil im SL-Druck	24
3.11	Soll-Ist-Vergleich des Zapfendurchmessers beim Versuchsteil	24
3.12	Lagertestplatte (Maßstab 1:1)	26
4.1	Der erste Prototyp	37
4.2	Geometrie der Fingerbewegung	39
4.4	Linearservo Spektrum SPMSH2040L	42
4.5	Arduino Mini	44
4.6	Anschluss der Servos	44
4.7	Möglicher Modellbauakku der Firma ACME	45
4.8	Finales Modell	46
4.9	Versionsvergleich des MCP-Gelenks	47
4.10	Finales Modell mit verbauter Aktorik	48
4.11	Fehler bei der Parameteranpassung	49
5.1	Mögliche alternative Montagepunkte für Aktoren	52

Abkürzungsverzeichnis

Abb. Abbildung

AR augmented reality

bzw. beziehungsweise

ca. circa

CAD computer aided design

CSTI Creative Space for Technical Innovations

DC direct current

DIP Distales Interphalangealgelenk

FDM Fused-Deposition-Modeling

FLM Fused-Layer-Modeling

MCP Metacarpophalangealgelenk

NASA National Aeronautics and Space Administration

PIP Proximales Interphalangealgelenk

PWM Pulsweitenmodulation

SL Stereolithographie

STL Standard Tessellation Language

UV ultraviolett

VR virtual reality

z.B. zum Beispiel

1 Einleitung

Die Technik hält heutzutage immer mehr Einzug in das tägliche Leben. Besonders der Bereich Virtual Reality (VR) wird immer wichtiger, auch für viele Unternehmen u.a. in der Produktentwicklung. Um einen realistischen Eindruck von Produkten zu bekommen ist es wichtig diese nicht nur zu sehen, sondern auch zu greifen. VR bietet die Möglichkeit ortsunabhängig einen Gegenstand in 3D zu betrachten, jedoch fehlt es hier an der Möglichkeit diesen auch greifen zu können. Greifbewegungen zu erfassen, z.B. durch Leap Motion[1], und die Animation darauf reagieren zu lassen stellt kein Problem mehr dar.

Bisher bekommt der Anwender nur optisch einen Eindruck, wie die virtuelle Realität auf ihn reagiert, jedoch gibt es kein haptisches Feedback. Durch dieses fehlende Feedback ist die Realitätsnähe deutlich beschränkt.

Bereits 1989 wurde an der Rutgers University mit einer Form eines einfachen Feedbacks zwischen zwei Fingern, erzeugt durch einen Pneumatikzylinder, experimentiert[2]. Das Ziel dieses Systems war es die Fernsteuerung für Roboter präziser zu gestalten.

Ein haptisches Feedback in Form einer Kraftrückmeldung an der Hand würde den Interaktionsspielraum von Telepräsenzsystemen und die Fernsteuerungsmöglichkeiten von Robotern deutlich erweitern. Bisher macht die fehlende Kraftrückmeldung die Arbeit unpräzise und schwierig. Der Roboter kann dem Nutzer über eine Kraft ein Feedback über seine Interaktionen mit Objekten geben und bietet dem Anwender die Chance präziser und flexibler zu steuern. Die Kraft schränkt den Bewegungsraum der Finger auf den Bereich ein, in dem sich der Endeffektor des Roboters momentan bewegt. Gerade in Gefahrenbereichen kann dies ein deutliches Plus an Sicherheit bedeuten, beispielsweise bei Bergungsarbeiten oder Kampfmittelräumung.

Auch in medizinischen Bereichen, wie Therapien oder Operationen, wird eine umfangreichere Interaktion zwischen Arzt und Patient möglich, da sich der Arzt nicht mehr nur auf seine optische Wahrnehmung verlassen muss, sondern auch spüren kann wie sich das gesteuerte Gerät verhält. Ein haptisches Feedback kann hier helfen, Behandlungsfehler zu vermeiden.

Es wurden bereits viele Geräte entwickelt, die in der Lage sind ein haptisches Feedback zu übertragen. Viele dieser Modelle sind für einen stationären Einsatz entwickelt und bieten nicht die Möglichkeit, dass sich der Anwender frei im Raum bewegen kann. Häufig lässt sich die Kraft auch nicht variabel regeln, sondern es wird nur ein fest einstellbarer Widerstand geliefert. Für medizinische Zwecke ist dies geeignet, jedoch nicht für präzise Greifbewegungen.

Auch mit Hinblick auf die VR gibt es Entwicklungen, allerdings ist aktuell kein passendes Produkt am Markt verfügbar. Die derzeit verfügbaren Modelle sind spezialisiert für Robotik oder medizinische Zwecke und mit hohen Anschaffungskosten verbunden, sodass ein Einsatz in der VR zwar denkbar, aber nicht wirtschaftlich wäre.

Problemstellung

Die Anforderungen an ein haptisches Feedback sind, je nach Anwendungszweck, sehr verschieden. Es müssen die individuellen Anforderungen betrachtet werden. Die geforderte Art des haptischen Feedbacks kann sich von der Medizintechnik über Robotik bis hin zur virtuellen Realität unterscheiden. Während es für Therapiezwecke in der Medizintechnik häufig reicht, dass ein einstellbarer Widerstand wirkt, wird bei Operationen bereits eine exakte Kraftrückmeldung verlangt. Auch in der virtuellen Realität wird ein genaues Force-Feedback gefordert. Hier soll der Anwender das Gefühl bekommen, dass er wirklich das angezeigte Objekt mit einem Präzisionsgriff, oder falls gefordert, Kraftgriff greift. Zugleich bekommt der Nutzer mit, wann er einen Gegenstand berührt, indem sich ab Berührungspunkt eine Gegenkraft aufbaut.

Um diese präzise Rückmeldung zu ermöglichen muss ermittelt werden, wie eine Kraft auf bestimmte Kraftangriffspunkte an den Fingern übertragen werden kann. Da jede Hand unterschiedlich ist, unterscheiden sich auch die Abmessungen einer Konstruktion. Um einen Handschuh schnell fertigen zu können, steht mit dem 3D-Druck eine Möglichkeit zur Verfügung, passende Bauteile für wenige Euro herzustellen. Hier muss geprüft werden, inwiefern die Fertigung mit Rapid-Prototyping-Techniken möglich ist und ob einzelne Bauteile aus anderen Materialien verbaut werden müssen.

Gegenstand der Arbeit

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Handschuh für Daumen und Zeigefinger konstruiert, welcher ein haptisches Feedback auf die Hand übertragen kann und seine Freiheitsgrade sich auf die natürlichen Gelenkpunkte der Finger beziehen. Die Konstruktion soll parameterbasiert ausgelegt werden. Die genauen Handmaße des Anwenders werden übergeben und die CAD-Software passt automatisch abhängige Maße an. Mit agilen Methoden werden schnell erste Prototypen gefertigt und deren Funktion überprüft. Iterativ wird die Konstruktion über mehrere Prototypen optimiert.

Wichtig ist, dass der Handschuh den natürlichen Bewegungsabläufen der Finger folgt und einen Widerstand bietet, wenn in der virtuellen Welt etwas gegriffen wird. Während der Entwicklung wird die Ergonomie am Beispiel der eigenen Hand fortlaufend getestet, da

dem Anwender nur dann ein Feedback geliefert werden soll, wenn ein virtueller Gegenstand gegriffen wird.

Für die Wahrnehmung des haptischen Feedbacks ist darüber hinaus relevant, an welchen Stellen der Hand bzw. der Finger eine Kraft aufgebracht wird. Das Gerät soll so entworfen werden, dass eine Krafterleitung an den Stellen möglich ist, wo auch beim Greifen eines realen Gegenstandes Kräfte entstehen. Hierzu werden nötige Kraftangriffspunkte ermittelt und in der Konstruktion vorgesehen. Die Angriffspunkte werden parameterabhängig definiert, sodass sie abhängig von den eingegebenen Handabmessungen richtig positioniert werden.

In Verbindung mit den Kraftangriffspunkten sowie Gelenkpunkten wird beachtet, dass ausreichend Platz für Sensorik und Aktorik vorhanden ist und genügend Angriffspunkte konstruiert werden. Der natürliche Bewegungsraum der Finger soll durch weitere Teile und die Konstruktion selbst nicht eingeschränkt werden. Es wird eine Aktorauswahl getroffen und verbaut, um erste Versuche mit dem Handschuh zu ermöglichen. Die Produktion des Handschuhs erfolgt primär als 3D-Druck und soll mit möglichst wenig Zusammenbauaufwand für die Benutzung vorbereitet werden.

2 Grundlagen

Diese Arbeit verknüpft unterschiedliche Wissensgebiete. Im Hinblick auf das Einsatzszenario in der virtuellen Realität (VR) spielt das Gebiet der Informatik (siehe Kapitel 2.2) in dieser Arbeit eine große Rolle. Die Konstruktion mit Auslegung für eine Fertigung mit Rapid-Prototyping Techniken ist der zweite große Bereich. Dabei muss ständig die Möglichkeit im Auge behalten werden, geeignete Sensoren und Aktoren anzubringen. Auch die grundlegende Anatomie der menschlichen Hand ist von zentraler Bedeutung. Die Grundlagen dazu werden in diesem Kapitel behandelt.

2.1 Kooperation mit dem CSTI

Das Creative Space for Technical Innovations (CSTI) ist eine neue Einrichtung an der HAW-Hamburg. Als Plattform zur Entwicklung und zum Wissensaustausch im technischen Bereich bietet das CSTI eine einfache Möglichkeit, Ideen fächerübergreifend zu verwirklichen. Für eine schnelle Entwicklung und einen umfangreichen Austausch werden agile Methoden umgesetzt. Ein wesentlicher Arbeitsbereich sind virtuelle Realitäten.

2.2 Virtual Reality

Bei der Erzeugung von virtuellen Welten wird eine Unterteilung vorgenommen. Bekommt der Anwender nur eine Ergänzung der realen Welt, beispielsweise durch Hologramme, spricht man von einer augmentierten Realität (AR). Entwickelt man jedoch eine Umgebung um den Nutzer herum, mit der er interagieren kann, so spricht man von einer virtuellen Realität (VR).

Bei der AR liegt der Fokus darauf, dem Nutzer zusätzliche Informationen in seinem Blickfeld bereitzustellen. Viele Autohersteller bieten auf dieser Basis inzwischen Bedienungsanleitungen, wo der Nutzer die Smartphonekamera auf das Teil des Fahrzeuges richtet, zu welchem er Informationen wünscht. In dem Kamerabild werden die gewünschten Infos dann direkt an der Stelle eingeblendet.

2.2.1 Faktoren der Wahrnehmung in realer und virtueller Welt

Die Wahrnehmung einer Umgebung setzt sich beim Menschen aus den fünf klassischen Sinnen zusammen: Sehen, Hören, Riechen, Schmecken und Fühlen. In einer virtuellen Umgebung sind die Sinne Hören, Sehen und Fühlen relevant. Davon sind Hören und Sehen einfach und gut umsetzbar. Damit die Interaktionen mit der virtuellen Welt einen besonders realistischen Eindruck vermitteln, muss zusätzlich das Fühlen umgesetzt werden. Darüber hinaus die Sinne Riechen und Schmecken umzusetzen wäre sehr aufwendig bzw. technisch schwer machbar und nur für wenige Anwendungen der VR sinnvoll.

Hören

In einer VR-Umgebung ist die Umsetzung des Hörens mittels Kopfhörer problemlos möglich. Wie realitätsnah das Erlebnis ist, hängt alleine von der Qualität der Audiospur und der Kopfhörer ab. Durch Raumklang kann die Realitätsnähe zusätzlich verbessert werden.

Sehen

Für VR-Umgebungen stehen Brillen unterschiedlicher Hersteller zur Verfügung. Wenn der Nutzer die Brille trägt, wird sein Blickfeld auf die Bilder der integrierten Bildschirme beschränkt. Die Brillen sind mit Gyroskopsensoren ausgestattet, damit die Anzeige an die Blickrichtung im Raum angepasst werden kann. Hier hängt der Realitätsgrad von der Bildqualität der virtuellen Umgebung ab.

Fühlen

Die meisten Umsetzungen einer virtuellen Realität verzichten auf die Übermittlung eines haptischen Feedbacks und beschränken sich auf optische und akustische Eindrücke. Möchte man einen virtuellen Gegenstand greifen, sieht man beispielsweise in der Umsetzung mit LeapMotion[1] seine eigene Hand eingeblendet, kann diese in Richtung virtueller Gegenstände bewegen und mit diesen interagieren. Der Anwender sieht also wie der Gegenstand reagiert, spürt ihn allerdings nicht. Diese Kraftrückmeldung (Force-Feedback) fehlt dem Nutzer, um die Umgebung realistischer erscheinen zu lassen. Auch die Interaktion wird durch ein Feedback vereinfacht und präzisiert.

2.3 Die menschliche Hand

Die menschliche Hand ist ein äußerst komplexes Interaktionsorgan und spielt bei der Wahrnehmung der Umwelt eine große Rolle. Wesentlich sind hier zwei Fähigkeiten: Agieren und Fühlen. Durch die Haut können Temperaturen und Drücke wahrgenommen werden. Die Taktile Wahrnehmung an der Hand und speziell an den Fingerkuppen basiert auf der Registrierung der Hautverformung. An den Fingerspitzen können bereits Änderungen im Mikrometerbereich registriert werden [3].

2.3.1 Freiheitsgrade

Die menschliche Hand besitzt 23 rotatorische Freiheitsgrade. Dabei entfallen jeweils vier Freiheitsgrade auf die einzelnen Finger bzw. Daumen. Zehn Fingergelenke besitzen jeweils einen Freiheitsgrad (Proximales Interphalangealgelenk kurz PIP und Distales Interphalangealgelenk kurz DIP), die fünf Verbindungsgelenke zur Handfläche (Metacarpophalangealgelenk kurz MCP) enthalten zwei und das Handgelenk selber enthält drei Freiheitsgrade [4]. In Abbildung 2.1 sind neben den bemaßten Fingerknochen auch die Freiheitsgrade eingezeichnet. Beispielmaße sind in Tabelle 6.1 zu finden.

2.3.2 Griffarten

Bei der menschlichen Hand wird zwischen zwei Arten von Greifbewegungen unterschieden, dem Kraft- und dem Präzisionsgriff. Darüber hinaus gibt es eine Unterscheidung zwischen dem statischen und dem dynamischen Griff.

Wird ein Objekt gegriffen und bewegt es sich während der Interaktion nicht mehr relativ zur Hand, handelt es sich um einen statischen Griff. Konträr dazu spricht man von einem dynamischen Griff, wenn sich das Objekt während der Greifinteraktion relativ zur Hand bewegt. Die dynamische Griffform tritt beispielsweise auf, wenn ein Objekt langsam durch die Hand rutscht. Man spricht hier auch von stabilen bzw. instabilen Griffen.

Die zweite Unterscheidung zwischen Kraft- und Präzisionsgriff beschreibt die unterschiedlichen Berührungspunkte beider Griffarten. Der Kraftgriff ist das Greifen eines Objekts mit der kompletten Hand. Dabei entstehen unendlich viele Berührungspunkte, und die Berührungskräfte treten flächendeckend auf. Der Präzisionsgriff hingegen ist der präzise Griff eines Objekts zwischen den Fingerspitzen. Hier entstehen minimal zwei und maximal fünf Kontaktpunkte[5]. Für die exakte Manipulation eines virtuellen Objektes ist daher der Präzisionsgriff relevant. Im Rahmen dieser Arbeit wird auf einen Präzisionsgriff zwischen Daumen und Zeigefinger mit zwei Kontaktpunkten hingearbeitet.

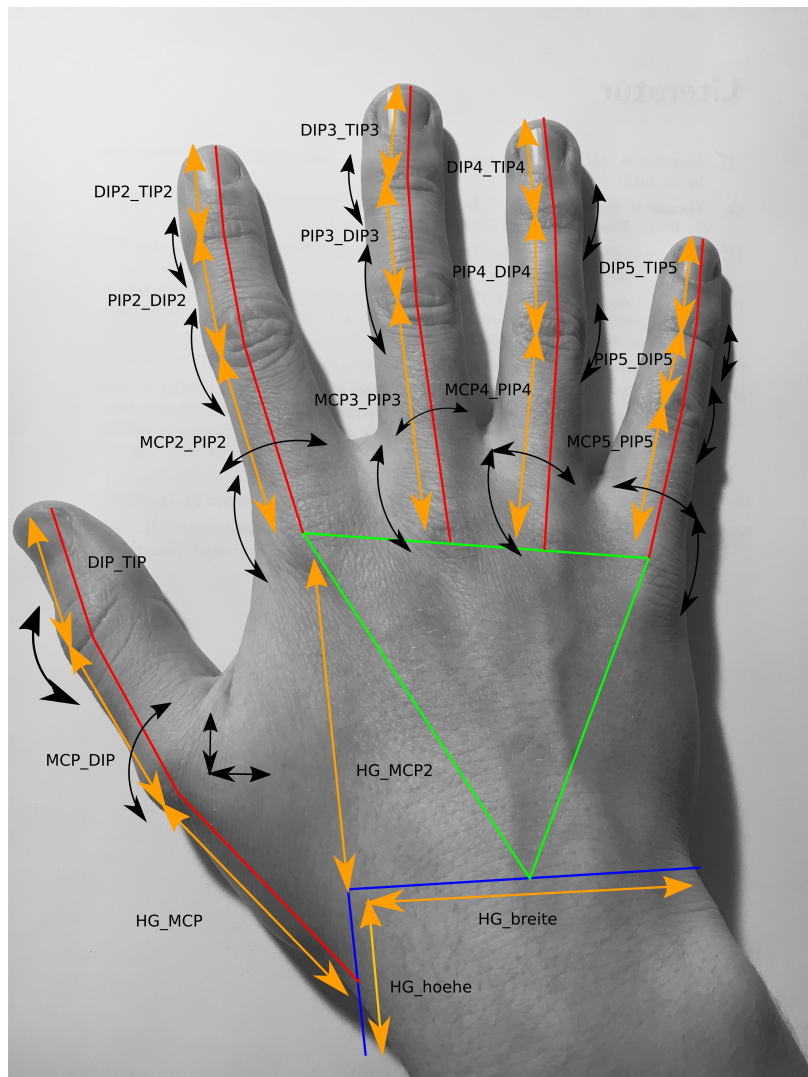


Abbildung 2.1: Freiheitsgrade der menschlichen Hand

2.4 Bisherige Entwicklungen

Die Idee, eine Krafterückmeldung an der Hand zu erzeugen, ist im Grundsatz nicht neu. Für die Fernsteuerung von Robotern, als Interaktionsmöglichkeit und Steuerung für Telepräsenzsysteme, als Bedienung für VR-Anwendungen, für Therapiezwecke und medizinische Assistenz; die Einsatzmöglichkeiten sind vielfältig. Auch Umsetzungen gibt es bereits. In diesem Abschnitt werden die existierenden/entwickelten Produkte vor- und gegenübergestellt.

2.4.1 Anforderungen an ein Feedback bei Telepräsenz

Shimoga hat sich im Jahre 1993 mit den Anforderungen an ein Feedback bei einer Fernsteuerung befasst und herausgestellt, was bei Neuentwicklungen und Verbesserungen beachtet werden muss. Durch die Installation eines Endeffektors mit Fingern wird es möglich, ein unebenes Objekt zu greifen und ohne Armbewegung zu bewegen. Um eine exakte Fernsteuerung zu ermöglichen, sollte die Steuereinheit eine gleiche, oder möglichst ähnliche Form besitzen wie der Endeffektor. Shimoga stellt Vergleiche bis damals existierender Entwicklungen an[6]. Zarudiansky hat 1981 bereits ein Aktorgehäuse entworfen, mit dem alle Finger beeinflusst werden konnten. Als weitere Beispiele werden unterschiedliche Modelle von Burdea angeführt[2]. Bei modernen Entwicklungen sollte darauf geachtet werden, dass der Handschuh möglichst isomorph an der Hand anliegt. Zusätzlich soll ein kompaktes Design angestrebt werden. Die Aktoren sollen idealerweise mit bis zu 10 000 Hz arbeiten, damit auch Vibrationen übertragen werden können. Zusätzlich sollen dauerhaft bis zu 7 N und kurze Spitzenwerte von 50 N bei einer Genauigkeit von 0,05 N erzeugt werden[6].

2.4.2 Erste Force-Feedback Entwicklung zur Robotersteuerung

Schon in den 70er Jahren hat die NASA mit einem Force-Feedback experimentiert. Als Fernsteuerung für einen Roboter wurde ein Joystick mit einem Feedback ausgestattet. Ziel dieser Entwicklung war es, einen Roboter im Weltall präziser fernsteuern zu können als mit einer Fernsteuerung ohne Feedback. Ein Joystick repräsentiert nicht die natürlichen Bewegungen einer Hand, daher entspricht die Bewegung der menschlichen Hand nicht der Roboterhand.

Als eine einfache Lösung der Ungleichheit von Steuerung und Endeffektor wird eine Mikropneumatik mit Positionssensor zwischen Daumen und einem weiteren Finger angebracht. Das Force-Feedback wird durch den Pneumatikzylinder in Abhängigkeit von der Bewegung des Endeffektors erzeugt. Die Steuerung erfolgt dabei rein wegabhängig[2].

2.4.3 m·ReS^{X1} & m·ReS^{X2}

Bei dem Force-Feedback Handschuh m·ReS^X handelt es sich um ein parametrisiertes Exoskelett, welches im Pulverdruckverfahren gefertigt wird. Dieser Handschuh ist für die Therapie von Schlaganfallpatienten ausgelegt. Die Anforderungen unterscheiden sich hier jedoch etwas von der VR. Für die Therapie soll der Handschuh möglichst präzise an die Hand angepasst sein und einen Widerstand gegen die Fingerbewegung aufbringen können. Umgesetzt sind die Finger vom Zeigefinger bis zum kleinen Finger. Es gibt zwar auch eine Konstruktion für den Daumen, diese arbeitet allerdings nur über eine Verbindung zu einem der anderen Finger, daher ist eine separate Ansteuerung des Daumens

nicht möglich.

Für diesen Handschuh gibt es zwei unterschiedliche Aktorvarianten. Eine Variante arbeitet mit vier DC-Motoren, die andere mit einstellbaren Federn. Dabei ist es möglich, für jeden Finger eine andere Kraft einzustellen. Lediglich der Daumen ist von der eingestellten Kraft des verbundenen Fingers abhängig.

Wenn bei Schlaganfallpatienten die Handmuskulatur betroffen ist, ist häufig auch die Armmuskulatur mit betroffen. Daher sind bei diesem Exoskelett die Aktoren extern angebracht. Der Handschuh ist damit nur stationär verwendbar und schließt eine freie Bewegung aus[4]. Für die Anwendung in der VR ist freie Beweglichkeit im Raum aber unabdingbar.

2.4.4 Festo Exohand

Von der Firma Festo wurde ein stationärer Handschuh entwickelt, der an allen Fingern ein individuelles Force-Feedback liefern kann. Das Feedback wird von Pneumatikzylindern erzeugt. Der Einsatzzweck dieses Handschuhs ist die Fernsteuerung einer Roboterhand, die die menschliche Hand Eins-zu-Eins abbildet. Festo sieht die Steuerung eines Roboters hinter einer Trennwand vor. Die Abbildung des Endeffektors als Hand sorgt auch für eine exakte Abbildung des Feedbacks auf die Hand. Der Druck der Pneumatik kann auf beiden Seiten abgeglichen werden. Die Bewegungsfreiheit des Nutzers ist jedoch stark eingeschränkt, da eine permanente Pneumatikverbindung erforderlich ist[7].

2.4.5 Dexmo

Der Force-Feedback Handschuh „Dexmo“ des chinesischen Start-Ups Dexta Robotics bietet dem Nutzer eine Kraftrückmeldung. Vom Hersteller werden unterschiedliche Einsatzszenarien genannt, unter anderem auch VR. Präsentiert wird der Handschuh in Verbindung mit einem Computerspiel. Inklusiv Aktoren ist der Handschuh portabel und lässt sich kabellos verwenden. Zudem wird das Modell als günstig und massenmarkttaugliches Gerät beworben. Das System arbeitet mit magnetorheologischen Bremsen und liefert ein binäres Feedback. Durch das Schließen der Bremse bildet der Handschuh einen festen Körper. Mit diesem Kraftschluss wird ein Festkörper besser repräsentiert als mit einem motorgesteuerten Feedback. Leider gibt es keine Hinweise auf eine Markteinführung und auch keine Informationen über die Preisgestaltung[8].

2.4.6 Cybergrasp

Die Firma Cyberglove Systems bietet ebenfalls einen Force-Feedback Handschuh namens Cybergrasp als Ergänzung zum Cyberglove Sensorhandschuh an, welcher als Basis

dient. Zusätzlich wird eine externe Aktoreinheit benötigt, die einen Bewegungsradius von einem Meter zulässt. Durch die Aktoren kann eine Kraft von bis zu 12 N aufgebracht werden. Alternativ zur Aufstellung der Aktorbox an einem festen Ort kann diese Einheit auch als Rucksack für den mobilen Einsatz erworben werden. Mit einem Gewicht von 454 g, hinzukommend der Sensorhandschuh und die Aktoreinheit, ist dieses System kein Leichtgewicht. Ein Einsatz in der VR wäre denkbar, allerdings ist der Preis von mehr als 80.000 \$ ein Ausschlusskriterium[9].

2.4.7 Bewertung der bisherigen Entwicklungen

Bereits entwickelte Modelle kommen in einzelnen Bereichen dem Einsatz für Force-Feedback in der VR sehr nah. Allerdings weist jedes Modell Schwächen oder Probleme auf, die den Einsatz verhindern. Am besten werden die Anforderungen vom Handschuh „Dexmo“ erfüllt, der aber nicht verfügbar ist. Die „Exohand“ von Festo kommt nicht in Frage, da diese stationär angebunden ist, während der „Cybergrasp“ schlicht zu teuer ist. Der Therapiehandschuh „m·ReS^X“ der Uni Lübeck ist parametrisiert, liefert eine Krafrückmeldung, allerdings ohne separat steuerbaren Daumen, und das Force-Feedback ist beim mobilen Einsatz nicht steuerbar. Jedes der bereits existierenden Modelle erfüllt die Anforderungen nur zu einem Teil, sodass eine Eigenentwicklung nötig ist.

2.5 Rapid-Prototyping

Da Rapid-Prototyping ein umfangreiches Thema und ein wesentlicher Bestandteil dieser Arbeit ist, wird dies in Kapitel 3 gesondert betrachtet.

3 Rapid-Prototyping

Der Oberbegriff Rapid-Prototyping fasst Verfahren zusammen, welche die schnelle Fertigung von Prototypen auf Basis von Konstruktionsdaten ermöglichen. Die Herstellung bei diesen Verfahren soll manuelle Bearbeitungsschritte möglichst vermeiden. Daher zählen die meisten Techniken des Rapid-Prototyping zu den additiven Fertigungsverfahren.

3.1 Stereolithographie und 3D-Druck

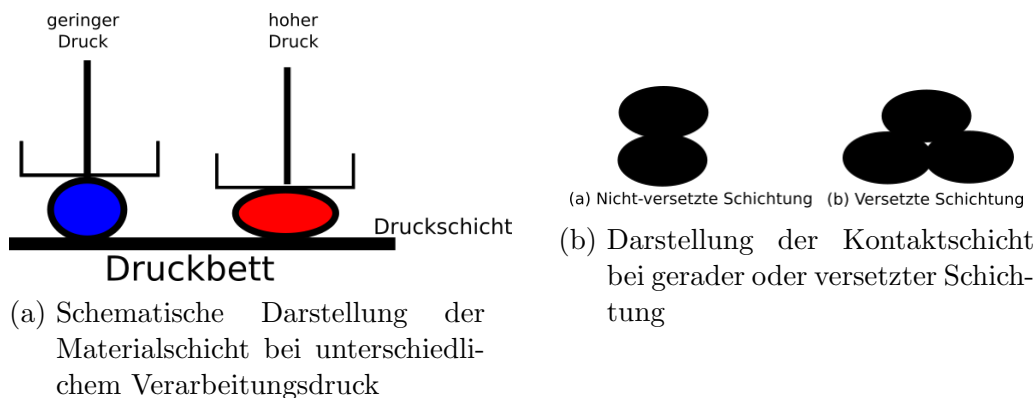
Weit verbreitet unter den Rapid-Prototyping-Techniken ist der 3D-Druck. Dieser ist inzwischen auch für private Anwender erschwinglich geworden und einfache Drucker sind weit verbreitet. Die Anfänge lassen sich auf Chuck Hulls Erfindung einer Stereolithographiemaschine im Jahre 1983 zurückführen [10]. Das Stereolithographieverfahren (SL) arbeitet mit flüssigem Photopolymer. Durch Bestrahlung mit UV-Licht härtet dieses Harz aus und bildet ein festes Material. Erste Maschinen wurden in Europa im Jahre 1989 installiert [11]. Bekannt wurde der 3D-Druck aber erst, als preiswerte Bausätze auf den Markt kamen, die nach dem FLM-Verfahren arbeiten (Fused-Layer-Modeling). Bei der Firma Stratasys wird das Verfahren auch FDM (Fused-Deposition-Modeling) genannt. Der Begriff „3D-Druck“ ist zwar unpräzise, hat sich aber, statt der unterschiedlichen Verfahrensbezeichnungen, in der Allgemeinheit durchgesetzt, da sich jeder unter dem Begriff etwas vorstellen kann.

Sowohl das Stereolithografie- als auch das FLM-Verfahren arbeitet mit einem schichtweisen Aufbau der Bauteile. Das FLM-Verfahren ist ein Extrusionsverfahren, bei dem das Modellmaterial aufgeschmolzen und durch eine Düse Schicht für Schicht aufgetragen wird. Durch die Schichtung entsteht am Bauteil ein Treppenstufeneffekt, der durch dicke Schichten verstärkt auftritt. Bestimmt wird die Schichtdicke durch unterschiedliche technische Möglichkeiten der Druckermodelle und die Druckgeschwindigkeit. Daraus resultiert ein, abhängig von Druckermodell und Druckeinstellungen, unterschiedlich stark ausgeprägter Treppenstufeneffekt (Abbildung 3.1). Beim SL-Verfahren kann dieser Effekt minimiert werden, da sich die Anzahl der Photonen durch die Intensität des UV-Lasers gut steuern lässt und somit Schichtdicken im Mikrometerbereich erreicht werden können. Die Einhärtetiefe ist abhängig von der aufgebrachtten Flächenenergie und den Harzparametern. Da die Schichtengenerierung aus der flüssigen Phase geschieht, entsteht die Vernetzung der Schichten über die komplette Kontaktfläche, während beim

FLM-Verfahren geschmolzenes Druckmaterial auf bereits erstarrtes aufgedrückt wird. Je nach Lage der Schichten und Verarbeitungsdruck entstehen unterschiedlich große Kontaktflächen (Abbildung 3.2a und 3.2b).



Abbildung 3.1: Der Treppenstufeneffekt



3D-Drucker gibt es in unterschiedlichsten Preisklassen und mit unterschiedlichen Druckfunktionen und -materialien. Die Druckermodelle lassen sich in die Kategorien Prototyper und Fabrikatoren einteilen. Prototyper verarbeiten fast ausschließlich Kunststoffe und dienen, wie der Name schon sagt, der schnellen Fertigung einzelner Prototypen. Die Preisspanne erstreckt sich von ca. 300 € für einfachste Modelle bis etwa 70.000 € für professionelle Geräte. Fabrikatoren sind ab etwa 100.000 € erhältlich. Je nach Modell können diese Drucker auch mehrere Millionen Euro kosten. Derartige Druckermodelle sind mit einem großen Bauraum ausgestattet und auf reproduzierbare Prozesse und Bauteile bei hoher Qualität ausgelegt. Häufig können auch Metalle verarbeitet werden[11]. Für die Fertigung eines Teils im 3D-Druck muss zunächst ein 3D-Modell mit einer beliebigen CAD- oder Designsoftware erstellt werden. Für den Druck muss die Datei dann im STL-Format (Standard Transformation Language) vorliegen. Im STL-Format wird die Oberfläche der Konstruktion mit Dreiecken vernetzt und so die Geometrie angenähert[11]. Je nach Verfeinerung des Netzes können hier große Datenmengen entstehen. Die STL-Datei wird in eine Slicing-Software importiert (in diesem Fall Catalyst oder Insight der Firma Stratasys). Die Software zerlegt das 3D-Modell in Schichten, berechnet Stützstrukturen und die dazugehörigen Werkzeugbahnen. Aus dieser Software wird auch direkt der Druckauftrag gestartet.

3.2 Richtlinien der Konstruktion im 3D-Druck

Das Arbeitsfeld der Konstruktion für 3D-Druck ist, im Vergleich zur Konstruktion für herkömmliche, spanende Fertigung, neu. Während es für traditionelle Fertigungsverfahren exakte Normen und Richtlinien gibt, existiert nichts Vergleichbares im Hinblick auf 3D-Druck. Eine Forschungsgruppe der Universität Paderborn beschäftigt sich mit diesem Thema und gibt Empfehlungen, wie Bauteile entworfen werden sollten, um einen guten Ausdruck mit den meisten Druckern, die nach dem FLM-Verfahren arbeiten, zu erhalten[12]. Die genauen Möglichkeiten unterscheiden sich jedoch je nach Druckermode. Die projektrelevanten Grenzen der vorhandenen Drucker werden durch Versuche in Kapitel 3.4 ermittelt.

Tabelle 3.1: Konstruktionsrichtlinien im 3D-Druck[12]

Konstruktionsobjekt	Richtlinie
Dicke	> 1,5 mm
Außenradius	» Schichtdicke
	Innenradius + 2 mm
Innenradius	» Schichtdicke
Kanten	> 1,5 mm
	Fasen maßgenauer als Radien
Rundungsradius außen	> 1,5 mm
Rundungsradius innen	> 0,3 mm
Überhanglänge	vermeiden
Schichtzykluszeiten	möglichst groß
Stützhöhen	klein halten
Stützfläche	möglichst groß halten

Zusätzlich zu den aufgeführten Richtlinien werden scharfe Kanten vermieden. Bedingt durch die eingangs in Kapitel 3.1 erwähnte und dargestellte Schichtung ist eine bessere Vernetzung zu erwarten, wenn die Schichten leicht versetzt liegen. Bei Übergängen von großen in kleine Flächen werden die Schichten durch zugefügte Fasen und Rundungen gegen Abscherung gesichert.

3.3 Möglichkeiten der vorhandenen Drucker

Zur Verfügung stehen zwei Drucker der Firma Stratasys. Das Modell „Uprint SE Plus“[13] wird zur testweisen Erstellung einzelner Bauteile für Prototypen verwendet. Die Materialenauswahl und die erzielbare Maßgenauigkeit sind beschränkt. Daher wird für genauere Drucke und die Verarbeitung unterschiedlicher Materialien das Modell



Abbildung 3.3: Beispiel für die Verwendung von Fasern und Rundungen zur Stabilitätsverbesserung

„Fortus 380mc“^[14] genutzt. Mit diesem Drucker besteht die Möglichkeit, neben dem ABS430-Kunststoff auch Polycarbonat (PC) und Nylon zu verarbeiten. Durch Kombination der Materialien kann die Konstruktion durch anderen Materialeinsatz an kritischen Stellen verstärkt werden. Zusätzlich bieten beide Drucker die Funktion einen Druck zu pausieren, um weitere Bauteile einzulegen und so in die Konstruktion einzudrucken. Ein großes Problem beim 3D-Druck ist das Warping. Durch die unterschiedlichen Temperaturen in den Schichten entstehen Spannungen beim Druck und das Bauteil kann sich verziehen. Die Stratasys-Drucker begegnen diesem Problem mit einem geschlossenen und beheizten Bauraum.

Beide Modelle arbeiten mit auswaschbaren Stützstrukturen. Die Verwendung von Stützmaterialien gibt dem Konstrukteur den Freiraum, mit beliebigen Aufbauten zu arbeiten, die lediglich durch Druckparameter und Materialeigenschaften begrenzt werden. Bei größeren Bauteilen sind die internen Bauteilstrukturen wählbar, damit das Teil nicht voll mit dem Material ausgefüllt wird. Interne Strukturen ermöglichen es, vergleichbare Festigkeit zu erhalten bei gleichzeitiger Materialeinsparung und damit einhergehender Gewichtsersparnis. Gerade wenn ein Benutzer die Konstruktion am Körper trägt und von dieser möglichst wenig bemerken soll, ist das Gewicht ein wichtiges Thema. Einschränkend ist hierbei zu beachten, dass diese Strukturen erst ab einer bestimmten Bauteildicke sinnvoll sind. Bei sehr schmalen und dünnen Aufbauten sind diese, bedingt durch Schichtdicke und -breite, nicht druckbar. Der Gewichtsvorteil ist dann außerdem vernachlässigbar klein.

Der Mensch nimmt das stärkste Gefühl am intensivsten wahr, d.h. wenn das Gewicht des Handschuhs zu hoch ist, drängt sich dessen Wahrnehmung in den Vordergrund. Der

Nutzer würde in diesem Fall die Krafrückmeldung eingeschränkt bzw. schwächer wahrnehmen als sie eigentlich ist.

Weiterhin steht ein Stereolithographiedrucker „Form 2“ [15] der Firma „Formlabs“ zur Verfügung. Dieser arbeitet verfahrensbedingt besonders präzise und mit Schichtdicken im Mikrometerbereich. Oberflächen werden sehr glatt gedruckt und Freiräume an Schichträndern entstehen nicht. Stützstrukturen werden aus dem Modellmaterial gedruckt und müssen manuell gelöst werden.

3.3.1 Das Koordinatensystem

3D-Drucker arbeiten mit einem X-Y-Z-Koordinatensystem, wobei die Z-Achse die Höhe des Bauraums beschreibt. Das hier eingeführte Koordinatensystem (Abbildung 3.4) dient als Grundlage für die Konstruktion und wird in dieser Arbeit verwendet.

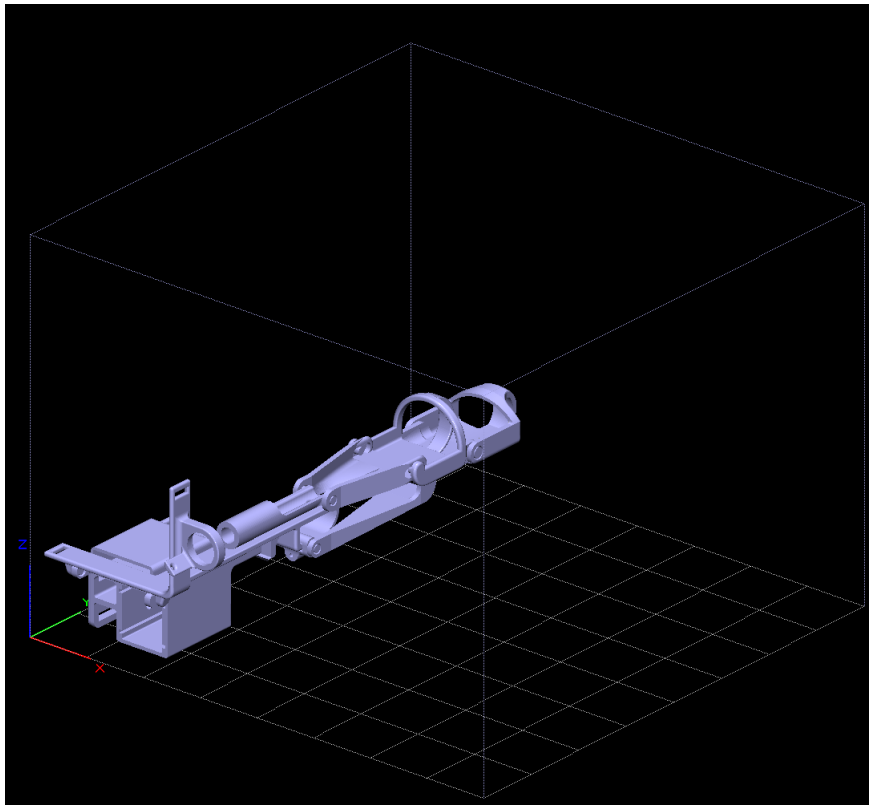


Abbildung 3.4: Der Handschuh im Bauraum mit Koordinatensystem

3.3.2 Materialien und Genauigkeiten

Je nach Druckermodell und verwendetem Material unterscheiden sich die Gestaltungsmöglichkeiten einer Konstruktion. In Tabelle 3.2 sind die Genauigkeiten nach Druckermodell und Druckmaterial aufgelistet. Bei ersten Druckversuchen hat sich her-

Tabelle 3.2: Parameter der Drucker

Drucker	Material	Schichthöhe	Schichtbreite
Fortus 380mc	Polycarbonat	0,127 mm	n.a.
	Nylon	0,178 mm	n.a.
	ABS430	0,127 mm	n.a.
uPrint SE Plus	ABS430	0,254 mm	0,917 mm
Form 2	Harz	25 μm	140 μm

Tabelle 3.3: Eigenschaften der Druckmaterialien

Parameter - Achse	ABS430[16]	Nylon 12[17]	Polycarbonat[18]	Harz[19]
Dehngrenze-XZ	31 MPa	32 MPa	40 MPa	38 MPa
Dehngrenze-ZX	—	28 MPa	30 MPa	38 MPa
Bruchdehnung-XZ	2,0%	2,4%	2,2%	12,0%
Bruchdehnung-ZX	—	2,7%	2,0%	12%
E-Modul-XZ	2100 MPa	1276 MPa	2006 MPa	1250 MPa
E-Modul-ZX	1650 MPa	1180 MPa	1800 MPa	1250 MPa
Biegefestigkeit-XZ	2,0%	—	—	—
Biegefestigkeit-ZX	2,0%	>10,0%	4,0%	—

ausgestellt, dass 3D-Drucker, bedingt durch die fixen Schichtdicken, Probleme haben, wenn besondere Maßhaltigkeit gefordert wird. Beispielsweise ist hier das Eindringen von Lagern zu nennen. Aus der Software ist nicht zu erkennen, ob das gedruckte Maß des Fertigteils nach oben oder unten abweichen wird. Wenn konstruktiv möglich, muss hier das Maß etwas größer gewählt werden, damit keine Bauteile verklemmen können. Muss das Maß genau sein, etwa bei Passungsbohrungen, sollte ein kleineres Maß gedruckt und manuell nachgearbeitet werden.

Bei einer Schichtdicke von 0,254 mm kann ein Gelenklager mit einer Toleranz von $12 \pm 0,2$ mm verklemmen, oder aber zu lose in der Bohrung sitzen. Wie genau das Maß nach dem Druck ist, lässt sich nur bei Lage in der X-Y-Ebene exakt vorhersagen. Mit Versuchsprodukten (Kapitel 3.4) werden das genaue Verhalten und nötige Anpassungen ermittelt. Auch welches Material verwendet werden soll, oder ob auch ein Druck im SL-Verfahren in Frage kommt, wird geprüft. Zu erwarten ist, dass Nylon aufgrund der

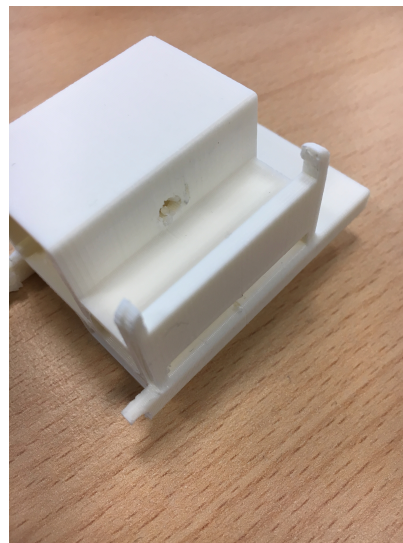
Materialeigenschaften, gedruckt mit einer Schichtdicke von 0,178 mm, die beste Material- und Genauigkeitskombination für das finale Modell darstellt.

3.3.3 Einfluss der Druckrichtung

Bedingt durch den schichtweisen Aufbau des Ausdrucks gibt es Unterschiede bei der Stabilität des Bauteils abhängig von der Druckrichtung. Die Bruchdehnung entlang einer Schicht (X- oder Y-Richtung) weicht von der über mehrere Schichten (Z-Richtung) deutlich ab. In Tabelle 3.3 wird der Einfluss der Druckrichtung aus den Herstellerdaten klar dargestellt. Die Verbindung zwischen einzelnen Schichten ist weniger stark als innerhalb einer Schicht. Im Stereolithographieverfahren tritt dieser Effekt durch die Generierung und Vernetzung aus der flüssigen Phase nicht auf. Bei sehr dünnen Bauteilen mit schmalen Schichten kam es im Laufe der Arbeit immer wieder zur Abscherung bei Versuchsteilen. Bruchstellen lagen immer entlang eines Schichtübergangs, nie senkrecht zur Schichtung (siehe Abbildung 3.5). Beim sehr elastischen Nylon tritt dieser Effekt materialbedingt nicht so deutlich hervor.



(a) Bruch des Versuchsteils



(b) Bruch des Mikrocontrollerhalters

Abbildung 3.5: Bruch durch abgescherte Schichten

3.3.4 Stützstrukturen in FLM- und SL-Verfahren

In beiden Verfahren arbeiten die Drucker mit Stützstrukturen, einerseits um die Grundflächen der Objekte unabhängig von der Bauplattform zu drucken, andererseits auch,

um beliebige Strukturen und Freiräume drucken zu können. Im SL-Verfahren müssen die Stützstrukturen aus dem Modellmaterial bestehen, bei dem keine Auswaschung möglich ist. Die Formgebungs- und Bewegungsmöglichkeiten der Modelle sind daher eingeschränkt. Für bewegliche Bauteile muss erheblich mehr Freiraum vorhanden sein als im FLM-Verfahren, wo ein auswaschbares Material eingebracht wird. Daher gibt es hier keine Einschränkungen bei der Formgebung. Auch bewegliche Teile werden ab einer Stützschildtdicke im Lagerfreiraum möglich.

3.4 Versuche mit neuer Düse und unterschiedlichen Materialien

Bei der Konstruktion eines Handschuhs werden viele feine Strukturen nötig. Um den Druck möglichst fein gestalten zu können, wurde eine neue Düse (T10) für den Drucker Fortus 380mc angeschafft. Mit dieser Düse ist es möglich, statt einer Schichthöhe von 0,178 mm eine Höhe von 0,127 mm zu erreichen. Der Druck mit dieser Düse wird mit unterschiedlichen Materialien, Düsen und Verfahren getestet, um die anwendungsspezifisch-ideale Kombination zu finden.

3.4.1 Versuch 1: Feststellung des minimal nötigen Lagerfreiraumes

In diesem Versuch wurde ein Lineargleitlager, dessen Lauffläche aus einem Langloch und einem Zapfen besteht, aus Polycarbonat gedruckt. Um den minimal nötigen Lagerfreiraum festzustellen, wird die Größe des Zapfens bei den Testobjekten variiert.

Beschreibung

Der Zapfendurchmesser wird von 3,00 mm über 3,25 mm bis 3,50 mm gewählt, während die Breite des Langlochs konstant bei 4,00 mm gehalten wird. Bei dem Testobjekt (Abbildung 3.6) handelt es sich um die Abbildung des MCP-Gelenkes des Zeigefingers. Dieses Gelenk verbindet den Finger mit der Hand und erfordert, neben der Rotationen um Y- und Z-Achse, auch eine Verschiebung in X-Richtung.

Zwischen Langloch und Zapfen werden Stützstrukturen eingebracht, damit sich beide Bauteile nicht verbinden. Das Stützmaterial wird nach dem Druck in einer Lauge aufgelöst. Bei der Stützmaterialdüse handelt es sich um das Modell T12SR100[14].

Das Bauteil mit 3,25 mm Zapfendurchmesser wird zusätzlich einmal mit Nylon gedruckt. Die Software sieht hier im Lager bereits eine Stützschildtd vor, die ein Verkleben verhindern sollte. Der Druck im Stereolithographieverfahren wird mit einem Freiraum von



Abbildung 3.6: Das Versuchsteil

0,25 mm versucht (Abbildung 3.7), da dieses Verfahren mit Schichtdicken ab 25 μm arbeitet. Unabhängig von Verfahren und Material wird mit der jeweils verfügbaren feinsten Konfiguration gearbeitet. Daher wird nicht bei jedem Material mit unterschiedlichen Düsen und allen Zapfenmaßen gedruckt.

Neben der Feststellung des Lagerfreiraumes wird auch die Maßgenauigkeit der gedruckten Zapfen überprüft. Die Vermessung erfolgt mit einem Messschieber. Die mögliche Messgenauigkeit beträgt 0,05 mm. Bei der Messung ist zu beachten, dass diese mit minimalem Druck erfolgt, da der Kunststoff, im Vergleich zu Stahl, sehr weich ist und damit die Messung beeinflusst werden könnte. Durch die Schichtung ist darüber hinaus zu erwarten, dass die Zapfen leicht unrund gedruckt werden. Aus diesem Grund wird jeweils einmal in X- und Z-Richtung gemessen.

Erwartungen

Durch die Slicing-Software lässt sich das Verhalten schon sehr gut vorhersagen. Bei dem Drucker Fortus 380mc handelt es sich um die Herstellersoftware Insight. Für einen Freiraum von 0,25 mm wird eine Stützschiicht im Lager gedruckt. Da die Schicht auf einer Lagerseite sehr klein ist, ist es fraglich ob diese ein Verkleben komplett verhindert. Bei einem Freiraum von 0,375 mm werden auf jeder Seite komplette Stützschiichten gedruckt, sodass ein Verkleben unwahrscheinlich ist. Hier ist die Schichtung von Polycarbonat und Nylon identisch. Bei einem Freiraum von 0,5 mm werden auf jeder Lagerseite sogar zwei Schichten Stützmaterial gedruckt und es ist sichergestellt, dass das Modellmaterial nicht verklebt.

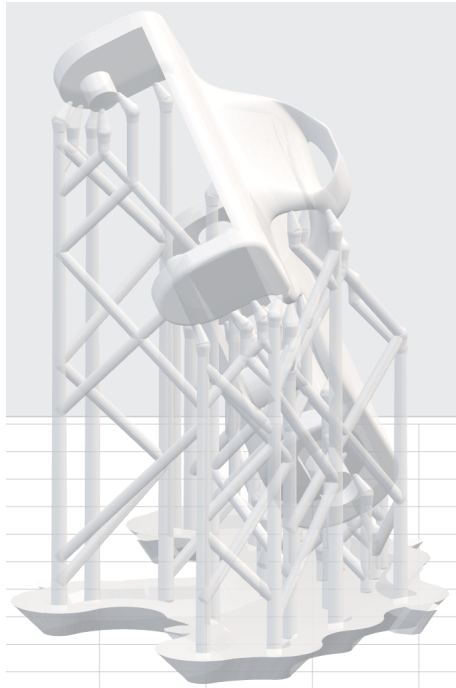


Abbildung 3.7: Druckvorschau mit Stützstrukturen im SL-Verfahren, erstellt mit PreForm[20]

Bei dem Drucker uPrint SE Plus wird von der Herstellersoftware Catalyst bei einem Freiraum von 0,5 mm lediglich eine Stützschicht gedruckt. Durch die dicken Stützmaterialschichten des uPrint ist es unwahrscheinlich, dass die ABS-Schichten verkleben.

Beim Stereolithographieverfahren hingegen ist das genaue Verhalten schwerer vorherzusagen. Die Stützschichten werden durch die Software PreForm errechnet, aus dem Modellmaterial erzeugt und halten das Bauteil in Position (Bauteil mit Stützstrukturen in Abbildung 3.7). Ob durch diese Positionierung auch der Freiraum zwischen den Bauteilen eingehalten werden kann, ist im 3D-Modell nicht zu erkennen. Stützschichten werden im Lager nicht erzeugt. Durch die sehr dünnen Schichten von 25 µm wird bei diesem Versuchsexemplar eine besonders glatte Oberfläche berechnet.

Versuchsergebnis

Mit der neuen Modelldüse sind auf der Oberfläche des Produktes feinere Strukturen mit fließenden Übergängen möglich. Ein Lagerfreiraum von 0,25 mm ist aber trotz der feinen Strukturen nicht umsetzbar, da die Stützstrukturen nicht ausreichend Raum freihalten und das Modellmaterial verklebt. Es kann zwar gelöst werden, jedoch verklemmt sich das Lager beim Verschieben häufig. Daher muss der Freiraum etwas größer gewählt werden.

Das Versuchsteil mit einem Zapfen von 3,25 mm ist frei beweglich, jedoch ist hier Nachbearbeitung erforderlich. Da Polycarbonat beim Druck leicht Fäden bildet, können diese das Lager blockieren und müssen entfernt werden.

Um einen weiteren Vergleich zu ermöglichen, wurde das Bauteil zusätzlich aus Nylon gedruckt. Auch bei diesem Teil ist das Lager frei beweglich und bei diesem Druck sind keine Fäden entstanden, sodass hier die Nachbearbeitung entfällt.

Beim möglichen Lagerfreiraum bringt die feine Düse somit nur geringe Vorteile. Einen deutlichen Unterschied erkennt man bei der Oberflächenstruktur (Abb.: 3.8).

Tabelle 3.4: Versuchsergebnisse zum Lagerfreiraum

Lagerfreiraum in mm	beweglich?
0,25	X
0,325	✓
0,5	✓

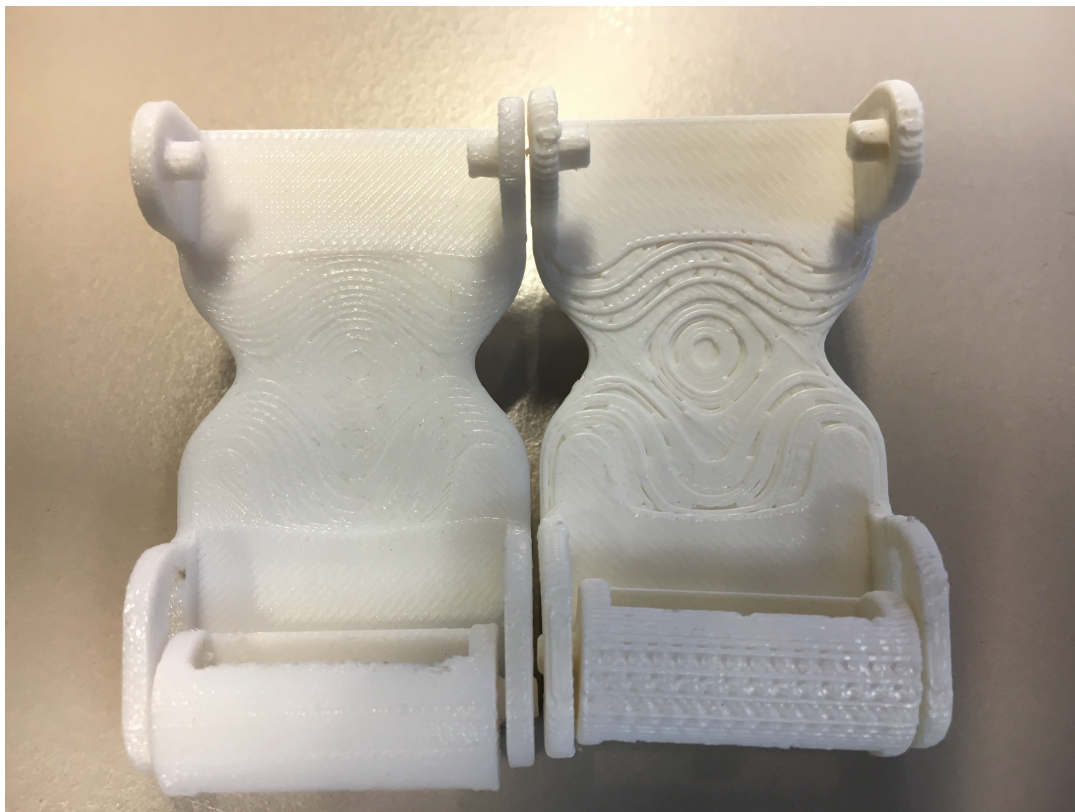


Abbildung 3.8: Oberflächenvergleich: Links mit feiner Düse (T10), Rechts mit grober Düse (T16)

Die Testobjekte aus Polycarbonat, mit der feinen Düse gedruckt, weisen deutlich feinere

Übergänge auf als die herkömmlichen Ausdrücke aus ABS mit dem uPrint SE Plus. Dieser Unterschied resultiert aus zwei Ursachen. Erstens reduziert sich die Schichthöhe mit der feinen Düse von 0,254 mm auf 0,127 mm, sodass mehr Schichten gedruckt werden. Zweitens verarbeitet der Fortus 380mc das Modellmaterial mit einem höheren Druck als der uPrint. Bedingt durch den Druck legt sich das Material in ovalerer Form ab als bei niedrigerem Druck. Daraus resultiert auch eine geringere Schichthöhe (Abbildung 3.2a). Zusätzlich zu den feineren Schichthöhen erkennt man, dass die Schichten mit der feinen Düse zusätzlich besser ausgefüllt sind und weniger Leerräume am Schichtrand aufweisen. Durch die schmalen Materialbahnen sind präzisere Abschlüsse mit der Randschicht möglich.

Da die Versuchsobjekte mit unterschiedlichen Materialien gedruckt wurden, konnte hier die Erwartung bestätigt werden, dass Nylon für den Druck eines Handschuhs am besten geeignet sein wird. Durch die hohe Dehnbarkeit des Materials wird verhindert, dass schmale Strukturen brechen. Bei ABS ist die Bruchgefahr durch eine Abscherung an den Schichtgrenzen am Größten. Im Gegensatz dazu weist Nylon eine höhere Zähigkeit auf, womit eine Abscherung unwahrscheinlicher wird. Polycarbonat hingegen ist stabiler als ABS, jedoch nicht so flexibel und schränkt daher ggf. die Beweglichkeit ein und verhindert den zerstörungsfreien Austausch von einzelnen Bauteilen mit einem Clipsystem. Bei sehr dünnen Schichten entstehen in den Randbereichen scharfe Kanten am Bauteil, die eine Verletzungsgefahr bedeuten können. Entweder ist eine Nachbearbeitung erforderlich, oder dünne Randschichten müssen von Beginn an in der Konstruktion vermieden werden.

Das Bauteil, welches im SL-Verfahren gedruckt wurde, weist keine Verschiebbarkeit auf. Beide Einzelteile verkleben beim Druck, da der Freiraum zu klein ist um Stützstrukturen einzubringen. Da bei SL-Verfahren nur mit einem Material gedruckt werden kann, müssen die Stützstrukturen aus dem Modellmaterial sein. Das heißt, es können keine Strukturen ausgewaschen werden, sondern müssen an den Kontaktpunkten mit dem Modell abgeschnitten werden. Aus diesem Grund wird die Oberfläche an den Kontaktstellen beeinträchtigt. Deutlich zu sehen sind diese Rückstände in Abbildung 3.10. Abgesehen von den Kontaktpunkten der Stützstrukturen entsteht durch die sehr dünnen Schichten eine besonders glatte Oberfläche. Außerdem ist bei runden Strukturen kaum eine Schichtung sichtbar. Weiterhin werden, im Gegensatz zu den auftretenden Leerräumen, die beim FLM-Verfahren in den Schichten entstehen (Abbildung 3.8), die Ebenen im SL-Verfahren komplett ausgefüllt und es treten keine Leerräume auf. Der Vergleich zwischen Soll- und Ist-Maß in X- oder Z-Richtung (Tabelle 3.5) zeigt deutlich die Schichtung des Materials. Auch die Rundheit ist, bedingt durch die Schichtung in Z-Richtung, nicht gegeben. Je nach Maßrichtung ist der Zapfendurchmesser unterschiedlich. Bei den feinen Düsen und beim SL-Verfahren sind die Abweichungen vom Sollmaß sehr gering. Mit der „groben“ T16-Düse zeigen sich diese sehr deutlich (bis zu 0,2 mm). Tendenziell ist die Maßgenauigkeit in X- oder Y-Richtung besser, da hier lediglich eine Abhängigkeit von der Positioniergenauigkeit des Druckers besteht. Der Drucker positioniert in der Mitte



Abbildung 3.9: Vergleich der Materialien von links nach rechts: ABS, Nylon, Polycarbonat, Harz

Tabelle 3.5: Soll-Ist-Vergleich des Zapfenmaßes beim Versuchsteil

Material	Soll-Maß	Ist-Maß X	Ist-Maß Z	Druckdüse	ΔX	ΔZ
PC	3,00 mm	2,90 mm	2,90 mm	T10	-0,10 mm	-0,10 mm
PC	3,25 mm	3,30 mm	3,35 mm	T10	0,05 mm	0,10 mm
PC	3,50 mm	3,45 mm	3,55 mm	T10	-0,05 mm	0,05 mm
ABS	3,00 mm	3,05 mm	3,20 mm	T16	0,05 mm	0,20 mm
Nylon	3,25 mm	3,20 mm	3,30 mm	T12	-0,05 mm	0,05 mm
SL-Harz	3,50 mm	3,50 mm	3,55 mm	SL-Verfahren	0,00 mm	0,05 mm

einer Schichtbreite. In Z-Richtung sind die Abweichungen verfahrensbedingt. Durch die Software wird eine Schichtzahl ermittelt, die das Maß möglichst genau annähert.



Abbildung 3.10: Das Versuchsteil im SL-Druck

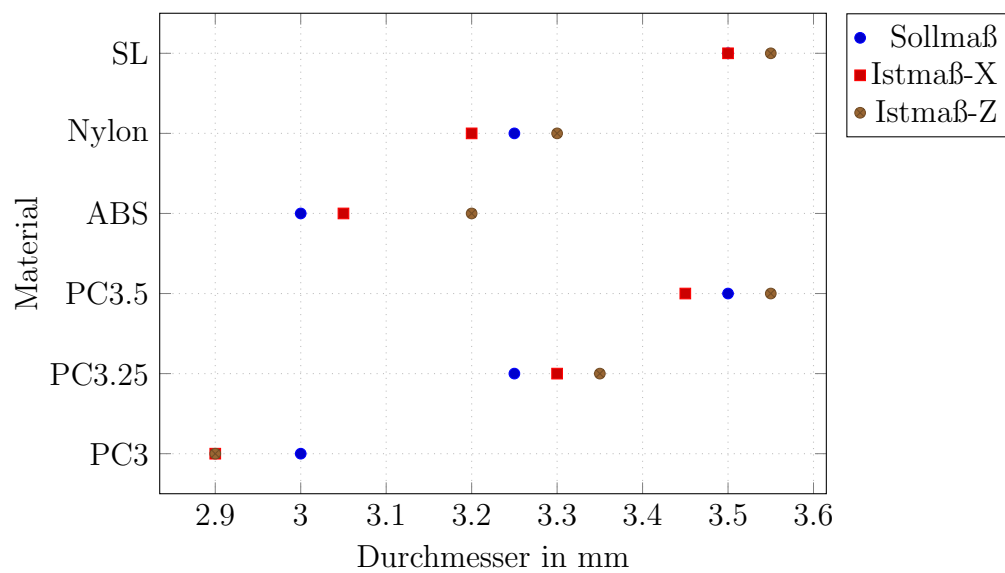


Abbildung 3.11: Soll-Ist-Vergleich des Zapfendurchmessers beim Versuchsteil

3.4.2 Versuch 2: Druckmaße für den Einbau von Spritzgusslagern

Da 3D-Drucker bei der Genauigkeit auf die Positionierungsgenauigkeit und die Schichtdicke bzw. Schichtbreite angewiesen sind, weichen die Maße der Ausdrücke stärker vom Sollmaß ab als bei herkömmlichen Fertigungsverfahren. Für die Einbringung von Lagerhülsen sind Bohrungen bzw. Zapfen mit bestimmter Toleranz nötig. Wie genau sich die Abweichungen vom Sollmaß verhalten, soll durch den Druck einer Lagertestplatte mit unterschiedlichen Zapfen und Bohrungen geklärt werden.

Beschreibung

Für die Feststellung der Einbaumaße wird eine Platte konstruiert, welche Zapfen und Bohrungen in 0,1 mm-Schritten um das angegebene Sollmaß des Herstellers enthält (Abbildung 3.12). Diese Platte wird in unterschiedlichen Richtungen gedruckt, um auch hier Abhängigkeiten festzustellen. An der gedruckten Lagertestplatte können entweder die genauen Maße mit dem Messschieber festgestellt und mit den Herstellerangaben verglichen, oder alternativ kann die Passgenauigkeit vorhandener Lager direkt geprüft werden. Mit einem digitalen Messschieber ist es möglich die Maße auf 1/100 mm genau zu bestimmen. In diesem Fall werden die Maße auf 0,05 mm-Schritte gerundet. Einerseits ist eine genauere Auflösung aufgrund der Schichtdicke bzw. -breite nicht nötig, andererseits ist eine gleiche Messkraft bei dem weichen Material nicht gegeben. Weiterhin schränkt der Treppenstufeneffekt die Kontaktfläche des Messschiebers ein und sorgt für zusätzliche Ungenauigkeiten in der Messung. Für den Abstand zwischen den einzelnen Zapfen wurden 7 mm gewählt, bei Bohrungen 5 mm. Aus Übersichtlichkeitsgründen entfallen in der Zeichnung diese Maße sowie der Abstand zum Rand des Bauteils. Grundsätzlich ist es unerheblich, wie groß der Abstand gewählt wird. Weniger als 2 mm zum Rand sollte dieser aus Stabilitätsgründen aber niemals betragen.

Die Düse des uPrint erzeugt eine Extrusionsbreite von 0,254 mm. Geht man davon aus, dass der Drucker den Extrusionspunkt exakt anfährt, ist zu erwarten, dass Innen- und Außenmaß eines Kreises um jeweils $\pm 0,127$ mm vom Sollmaß abweichen.

Auswertung

Beim Druck der Zapfen und Bohrungen in Z-Richtung müssen die Maße zu den Toleranzangaben nur geringfügig angepasst werden. Die Schichten können vom Drucker rund und präzise erzeugt werden, da keine Abhängigkeit von der Schichtdicke, sondern nur von der Schichtbreite besteht. Wie erwartet ist eine Maßenpassung um ca. 0,2 mm notwendig.

Beim Druck in X- oder Y-Richtung ist eine größere Anpassung erforderlich. Der uPrint arbeitet mit einer minimalen Schichtdicke von 0,254 mm. Als sicherer Korrekturfaktor

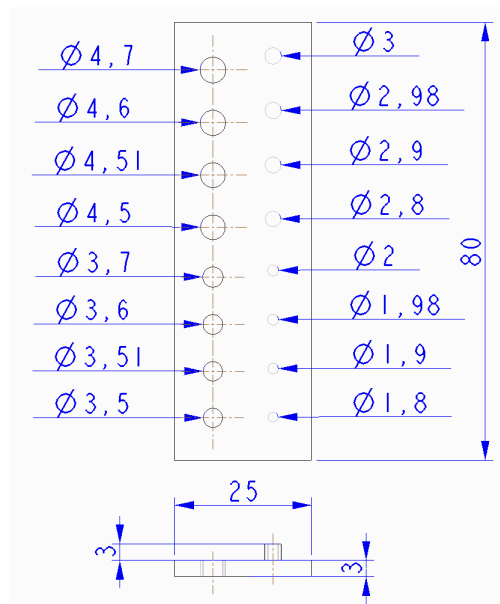


Abbildung 3.12: Lagertestplatte (Maßstab 1:1)

sollte hier $\pm 0,3$ mm gewählt werden. Will man von dieser Empfehlung abweichen, ist es ratsam vor dem Druck genau zu prüfen, wie der Drucker die Schichten aufbaut, bzw. wieviele Schichten für einen Zapfen oder eine Bohrung verwendet werden und wie groß die zwischenliegende Stützschiicht ist.

Tabelle 3.6: Nötige Maßanpassung von Zapfen und Bohrungen

Konstruktionsobjekt	Anpassung Z-Richtung	Anpassung X- oder Y-Richtung
Zapfen	-0,2 mm	-0,3 mm
Bohrung	0,2 mm	0,3 mm

4 Entwicklung der Handschuhprototypen

Für die Entwicklung der Prototypen werden zunächst die Anforderungen und Rahmenbedingungen ermittelt und mögliche Lösungsideen gesammelt und bewertet. Die Bewertung setzt sich aus Kosten, Einfachheit und Stabilität zusammen. Die Umsetzung erfolgt in Hinblick auf ein Force-Feedback zwischen Daumen und Zeigefinger. Da sich die Freiheitsgrade des Zeigefingers nicht von denen der anderen Finger unterscheiden, kann die Konstruktion nachträglich, mit angepassten Parametern, auf andere Finger übertragen werden.

Da die Konstruktion auf der Außenseite der Finger liegt, bewegt sich diese bei Beugung des Fingers in einem größeren Radius. Diese Vergrößerung sorgt dafür, dass Verschiebungen am Verbindungspunkt zur Handfläche erfolgen und diese durch einen zusätzlichen Freiheitsgrad ausgeglichen werden müssen. Da die Erfassung nötiger Schiebewege schwierig und abstandsabhängig ist, wird mit Prototypen und dessen Optimierung gearbeitet.

4.1 Anforderungen und Rahmenbedingungen

Dieser Abschnitt soll einen Überblick über die Anforderungen an das Exoskelett verschaffen. Dabei werden sowohl explizite Anforderungen durch die Aufgabenstellung, als auch implizite Faktoren, welche sich durch die Konstruktion ergeben, betrachtet. Spezielle Anforderungen an Aktoren und Steuerung werden gesondert in Kapitel [4.7](#) behandelt.

4.1.1 Explizite Anforderungen durch Aufgabenstellung

Das Ziel dieser Arbeit ist es, einen Handschuh zu entwickeln, der in der Lage ist, beim Greifen eines virtuellen Gegenstandes in der virtuellen Welt ein haptisches Feedback auf die Hand des Nutzers in der realen Welt zu übertragen.

Funktionen

Der Handschuh soll mit Aktoren ausgestattet werden, die eine Krafrückmeldung bei einem Präzisionsgriff ermöglichen. Kräfte sollen entgegen der Greifbewegung an zu identifizierenden Kraftangriffspunkten aufgebracht werden. Das Augenmerk soll auf einem Präzisionsgriff zwischen Daumen und Zeigefinger liegen. Eine Krafrückmeldung entgegen einer Öffnungsbewegung ist nicht notwendig.

Die Bewegungen werden mit der LeapMotion Kamera erfasst, daher soll, durch die Lage der Konstruktion dicht am Finger, der Einfluss der Konstruktion auf Bilderkennung und die natürliche Beweglichkeit der Hand des Nutzers minimiert werden. Alle Freiheitsgrade der Hand sollen erhalten bleiben. Hierfür soll die Konstruktion parametrisiert, in Abhängigkeit von Handabmessungen des Anwenders, generiert werden.

Kosten

Die Fertigung soll im 3D-Druck erfolgen und der Zusammenbauaufwand minimiert werden. Minimierung des Bedarfs an Material und Zubehörteilen soll zu geringen Kosten führen.

Sicherheit

Durch den Handschuh dürfen keine unnatürlichen oder gar verletzende Bewegungen und Kräfte erzeugt werden. Eine Begrenzung muss durch die Mechanik, Maximalkräfte oder Steuerung erfolgen. Zusätzlich gilt es, scharfe Kanten zu vermeiden und elektrische Sicherheit zu gewährleisten.

Nutzbarkeit

Der Handschuh soll ohne Hilfe einer weiteren Person angezogen werden können. Durch geeigneten Konstruktionsaufbau und Führungen soll ein einfaches Überstreifen möglich sein.

Portabilität

Das Gewicht und die Größe des Handschuhs sollen minimiert werden, damit Transport und Lagerung einfach möglich sind. Da der Handschuh am Körper getragen wird, soll das Gewicht minimiert werden. Zusätzlich darf keine externe Verkabelung nötig sein, damit freie Beweglichkeit im Raum der VR möglich ist. Ein maximales Gewicht von 200 g ist anzustreben.

Einfachheit

Unnötig komplizierte Aufbauten sollen vermieden und damit gleichzeitig auch mögliche Fehlerquellen reduziert werden.

4.2 Unterteilung der Konstruktion in einzelne Lösungsschritte

Die Konstruktion des Handschuhs wird in mehrere Lösungsschritte unterteilt. Für jeden Teil der Gesamtlösung werden unterschiedliche Ideen ausgewertet und passende Lösungsmöglichkeiten ermittelt. Eine kurze Übersicht bietet auch Tabelle 6.3 im Anhang.

4.2.1 Konstruktionsaufbau

Der Konstruktionsaufbau lässt viel Spielraum um die Anforderungen zu erfüllen. Die Konstruktionsideen lassen sich in drei grundlegende Aufbauarten unterteilen. Die erste Möglichkeit ist eine Konstruktion komplett oberhalb der Finger. Als zweite Möglichkeit steht dem eine innenliegende Konstruktion gegenüber. Die dritte Idee ist eine vollumfassende Konstruktion, die einem klassischen Handschuh am ehesten gleicht.

Verletzungssicherheit

Ein besonderes Augenmerk gilt, wie bei jeder klassischen, mechanischen Konstruktion, der Sicherheit. Durch die Mechanik darf kein Mensch verletzt werden. Im Bereich der Finger dürfen keine Bewegungen auftreten, die außerhalb des natürlichen Bewegungsraumes der Gelenke liegen. Dabei sollen Bewegungen, die durch die Muskulatur erzeugt werden können, als Referenzraum dienen. Darüberhinaus dürfen auftretende Kräfte nur so groß sein, dass auch hier keine Verletzungsgefahr besteht.

Die Begrenzung der Kraft kann mechanisch durch die Konstruktion, elektrisch durch die Steuerung, oder alternativ durch die Auswahl der Aktoren erfolgen, sofern diese gar nicht erst verletzende Kräfte erzeugen können.

Der Bewegungsraum

Der Bewegungsraum kann ebenfalls durch die Steuerung begrenzt werden. Die sicherste Variante ist jedoch immer eine mechanische Begrenzung. Dabei kann bereits der mögliche Verstellweg eines Servos eine Beschränkung darstellen. Weitere Ideen sind die Einschränkung des Bewegungsraumes durch Kontaktpunkte an den einzelnen Bauteilen oder zusätzliches Einbringen von Langlöchern als Führung. Da es sich bei den Gelenken um Drehpunkte handelt, kann die Bewegung auch direkt an diesen Punkten eingeschränkt werden. Dazu eignet sich zum Beispiel die unrunde Auslegung der Lagerzapfen und Bohrungen. Bei dieser Lösung ist jedoch die Haltbarkeit der Materialien zu prüfen, da die Beschränkung auf Reibung basiert. Des Weiteren würde die Verwendung von Lagerhülsen in den Gelenken ausgeschlossen und ein Verklemmen wäre bei Überbeanspruchung möglich. Je nach Material und Druckrichtung könnte es auch zur Abscherung von Schichten und damit verbundener Zerstörung des Bauteils kommen.

4.2.2 Kraftübertragung

Bei der Konstruktion soll eine Möglichkeit zur Kraftaufbringung vorgesehen werden. Die Angriffspunkte der Kräfte sollen eine Wahrnehmung des virtuellen Gegenstandes erlauben, die der des Greifens eines realen Objekts entspricht.

Die Erzeugung einer Gegenkraft an den Fingern kann aktiv oder passiv erfolgen. Zu den aktiven Varianten zählt unter anderem die Aufbringung einer Kraft durch einen Servo, der gegen die Fingerbewegung arbeitet. Als passive Variante kann die Bewegung des Fingers durch eine Bremse gehemmt oder gar blockiert werden. Dabei kann die Bremsung beispielsweise an einem Seilzug erfolgen oder durch Piezoaktoren direkt in den Gelenken. Beide bremsenden Varianten weisen jedoch Nachteile auf. Die Bremsung eines Seilzuges erfordert einen Aufbau vergleichbar der Variante mit Servo. Die Kraft einer sehr kleinen Bremse ist äußerst gering (kleine Modelle arbeiten mit einem Nennmoment $<1\text{ Nm}$), sodass die aktive Lösung bei gleichem Aufwand mehr Möglichkeiten bieten würde. Zusätzlich müsste eine Rückstellmöglichkeit vorgesehen werden. Ein Beispiel für eine passive, gebremste Möglichkeit ist die Mikrobremse der Firma Kendrion[21]. Problematisch wäre bei dieser Lösung allerdings die Spannungsversorgung. Die meisten Bremsen sind für Motoren ausgelegt und arbeiten mit 24 V.

Die Einbremsung mit einem Piezoaktor wäre vorteilhaft, da der Aufbau eines Seilzuges oberhalb der Finger entfallen könnte. Piezoaktoren könnten direkt in die Gelenke eingedrückt werden. Aufgrund der kleinen Verstellwege der Aktoren müssten zusätzlich passende, getrennt gefertigte Gegenstücke eingebracht werden. Die Genauigkeit des 3D-Druckes reicht nicht, um direkt ein Gegenstück zu den Verstellwegen zu drucken. Der Verkabelungsaufwand würde auch deutlich steigen, da zu jedem Gelenk Kabel geführt werden müssten. Auch die elektrische Sicherheit muss aufgrund der Körpernähe geprüft

werden. Piezokristalle arbeiten zwar mit geringen Strömen, die Betriebsspannung ist jedoch sehr hoch (siehe Kapitel 4.7).

4.2.3 Fixierung auf der Hand

Zu Beginn müssen Überlegungen angestellt werden, wie der Handschuh auf der Hand befestigt werden kann. Dabei müssen die Finger frei beweglich bleiben, was die Befestigungspunkte und Möglichkeiten einschränkt. Schmale Ringe um die Finger wären hier grenzwertig. Sind diese sehr schmal, würde die Funktion zwar nicht eingeschränkt, die Haptik des Handschuhs aber dennoch beeinträchtigt.

Ein Klettband, im Bereich des Handgelenks, würde eine einfache Verbindung darstellen. Da es nur diesen einen festen Verbindungspunkt gibt besteht die Gefahr, dass Finger wieder aus der Konstruktion rutschen. Auch die Anbringung an der Hand ist damit nicht besonders einfach. Für einen Prototyp ist dies akzeptabel, für den regulären Gebrauch jedoch nicht.

Für den regelmäßigen Gebrauch kann die Konstruktion mit einem Textilhandschuh als Basis verbunden werden. Durch den Handschuh entstehen an beliebig vielen Punkten Befestigungsmöglichkeiten für die Konstruktion. Zusätzlich wird das Anlegen vereinfacht, da der Textilhandschuh eine Führung entlang der Konstruktion bildet.

4.2.4 Gelenke/Lagerung

Die Gelenke des Handschuhs können grundsätzlich auf zwei Arten umgesetzt werden. Einerseits durch ein flexibles Material, wie zum Beispiel Textil, zur Verbindung der Einzelteile, andererseits durch Konstruktion und Druck ineinandergreifender Teile. Auf Basis verbundener Bauteile können die Lager modifiziert oder mit Verbesserungen und Erweiterungen ausgestattet werden.

Um die Gleitfähigkeit der Lagerungen zu verbessern, können Lagerhülsen eingebracht werden. Die Materialreibung würde reduziert und dies dem Nutzer durch weniger Bewegungswiderstand entgegenkommen. Weiterhin halten Lagerhülsen die Druckschichten des Lagerzapfens zusammen und verteilen die Kraft gleichmäßig. Die große Auswahl an Lagerhülsen auf dem Markt eröffnet viele Möglichkeiten. Es gibt Hülsen als leitfähige Variante, oder auch mit Magnetstreifen. Hier wäre die Umsetzung einer Positionserkennung denkbar.

4.2.5 Befestigung der Finger (MCP-Gelenk)

Die MCP-Gelenke, welche die Basisplatte der Hand mit den Fingern verbinden, erfordern eine Konstruktion, die Bewegungen in zwei Freiheitsgraden erlauben. Hierfür

könnte ein Kugelgelenk verwendet werden, wobei der Bewegungswinkel des Gelenks hier eine mögliche Einschränkung darstellt. Durch ein zusätzliches Gelenkbauteil könnte alternativ ein weiterer Freiheitsgrad hinzugefügt werden. Ähnlich wie mit einer Textilverbindung könnten alle Freiheitsgrade umgesetzt werden.

4.2.6 Befestigung des Daumens

Der Daumen hat, im Vergleich zu den anderen Fingern, einen Freiheitsgrad mehr in Bezug auf die Handfläche. Daher erfordert diese Befestigung eine andere Anbindung, um alle Freiheitsgrade zu erhalten. Auch der Verbindungspunkt zwischen Basisplatte und Fingerkonstruktion unterscheidet sich von den anderen Fingern. Zusätzlich muss berücksichtigt werden, dass die Gelenke des Daumens zu den anderen Fingern gedreht sind und sich der Rotationswinkel, je nach Stellung des Daumens, ändern kann.

4.3 Erfassung der Konstruktionsparameter

Um eine Konstruktion aufbauen zu können, müssen Maße ermittelt werden, die die relevanten Konstruktionspunkte an der Hand repräsentieren. Dabei handelt es sich um Fingerlängen und Gelenkabmessungen. Da man ohne Röntgengerät nicht in die Hand bzw. Finger und Gelenke hineinschauen kann um die genauen Gelenkpunkte zu ermitteln, sind die ermittelten Maße nicht absolut exakt, sondern lediglich eine Näherung. Erfasst werden die Längen der Fingerknochen zwischen den Gelenken und die Breiten und Höhen der Gelenke. Gemessen wird mit einem Messschieber. Idealerweise werden mehrere Messreihen durchgeführt und der Mittelwert der Messungen als Konstruktionsparameter übernommen. Auf diese Weise kann die Abweichung von den exakten Werten statistisch minimiert werden. Die nötigen Parameter sind in Abbildung 2.1 dargestellt und in Tabelle 6.1 aufgelistet.

4.4 Auswahl der Konstruktionssoftware

Vor dem Beginn der Konstruktion wird eine passende CAD-Software ausgewählt. Da die Softwareauswahl am Markt sehr groß ist müssen Auswahlkriterien definiert werden.

4.4.1 Auswahlkriterien

Die Konstruktion soll individuell anpassbar sein und mit Rapid-Prototyping-Technologien, speziell dem 3D-Druck, gefertigt werden. Aus diesen beiden speziellen Anforderungen der Arbeit ergeben sich bereits zwei Kriterien: Die Software muss eine parametrisierte Konstruktion unterstützen und, für den 3D-Druck, Daten im STL-Format exportieren können.

Eine weitere Einschränkung ergibt sich aus der Softwareverfügbarkeit an der Hochschule, da nicht für jede Software Lizenzen vorhanden sind. Dies schränkt die Auswahl auf Siemens NX¹, PTC Creo², CATIA V5-R19³, Autodesk Fusion⁴ sowie freie Software ein. Die Eignung für die Konstruktion kleiner Bauteile und die speziellen Möglichkeiten für den 3D-Druck müssen zusätzlich geprüft werden. Durch den 3D-Druck werden viele Einschränkungen und Gestaltungsmöglichkeiten in der Formgebung aufgehoben, da klassische Fertigung, z.B. durch Zerspanen, nicht nötig ist.

Tabelle 4.1: Softwareauswahl

Anforderung	CATIA	NX	Creo	Fusion	Freie Software
Parametrisierung	✓	✓	✓	✓	✓
STL-Export	✓	✓	✓	✓	✓
Freiformen	✗	✗	✓	✓	unterschiedlich
Lizenz	auslaufend	✓	✓	frei für Bildungseinrichtungen und Unternehmen mit Umsatz < 100.000 \$	✓
Dokumentation/ Literatur	✓	✓	✓	Herstellerdoku/Foren	unterschiedlich

4.4.2 Begründung der Auswahl von Autodesk Fusion

Durch die beschriebenen Kriterien fällt die Wahl auf Autodesk Fusion. Fusion ist eine noch recht neue Software und ist vom Konstruktionsablauf auf eine agile Entwicklung ausgelegt. Es besitzt außerdem die Möglichkeit mit Freiformen zu arbeiten und Strukturen auf diese Weise beliebig zu gestalten. Mit herkömmlichen CAD-Funktionen sind

¹Siemens NX, www.siemens.com/NX11

²PTC Creo Parametrics 3.0, <http://www.ptc-de.com/cad/creo/parametric>

³CATIA V5 R19, <https://www.3ds.com/de/produkte-und-services/catia/>

⁴Autodesk Fusion 360, www.autodesk.de/fusion-360

beliebige Strukturen zwar auch möglich, allerdings sind diese dann mit so vielen Bedingungen verknüpft, dass die Konstruktion deutlich mehr Entwicklungszeit erfordern würde. Die Verwendung von freier Software wäre auch möglich, langfristig ist aber ein besserer Softwaresupport von einem Hersteller wie Autodesk zu erwarten als bei freien Entwicklerteams.

Weitere Vorteile von Fusion sind die Cloudbasis und die plattformunabhängigen Entwicklungsmöglichkeiten. Gerade für ein parametrisiertes Modell ist dies interessant, da vor Ort die Parameter, unabhängig vom mitgeführten Gerät, geändert werden können. Der künftige Anwender kann sofort sein angepasstes Modell betrachten und der Druck vorbereitet werden.

Für die agile Entwicklung bietet Fusion zusätzlich den Vorteil, dass die Bauteile in einer Datei aufeinander aufbauend erstellt werden können. Auf diese Weise umgeht man die Erstellung einzelner Bauteildateien und hat automatisch passende Maßbeziehungen in der Konstruktion. Bei klassischer CAD-Software wäre die Erstellung und Bemaßung einzelner Bauteile und ein anschließender Zusammenbau nötig.

Stellt sich bei diesem Vorgehen ein angefügtes Bauteil als nicht funktional heraus, so ist es möglich durch die automatische Versionierung auf einen älteren Stand zurückzugehen. Andere Software erfordert die manuelle Versionierung durch den Benutzer oder alternativ Server-/Client-Infrastrukturen, wie z.B. PTC Windchill für Creo. Derartige Maßnahmen sind eher für Unternehmen relevant, die diese Software produktiv einsetzen.

4.5 Entwicklung des ersten Prototypen

Die Entwicklung des ersten Prototypen basiert auf den ausgemessenen Parametern und der bewerteten Auswahl der Konstruktionsideen. Der Prototyp soll einer ersten Konstruktionsprüfung dienen und Schwachstellen aufzeigen. Zusätzlich sollen nötige Verstellwege aufgrund der Fingerbewegung ermittelt werden.

4.5.1 Auswahl der Teillösungen

Für den ersten Prototyp werden schnelle Konstruktionswege gewählt und möglichst nur Druckteile verwendet. Die Parametrisierung steht im Hintergrund. Dabei werden im Programm zwar Parameter hinterlegt, diese dienen jedoch lediglich dem vereinfachten Abruf von Maßen. Es wird keine Robustheit bei Parameteränderung gefordert.

Lage der Konstruktion

Die Konstruktion wird oberhalb der Finger ausgeführt. Dies hat den Vorteil, dass der Bewegungsraum der Finger nicht eingeschränkt wird. Für eine obenliegende Konstruktion

tion spricht ebenfalls die Anatomie der Hand. Während PIP- und DIP-Gelenke an der linken und rechten Seite des Fingers erreichbar sind, ist dies beim MCP-Gelenk nicht möglich. Hier bleibt nur die Wahl zwischen der Ausführung ober- oder unterhalb des Gelenks. Aufgrund der vorangegangenen Auswahl wird auch hier die Konstruktion oberhalb ausgelegt. Darüber hinaus verhindert diese Auslegung Komplikationen in Hinblick auf die Montage weiterer Finger. Der Aufbau zwischen den Fingern kann auf ein Minimum reduziert werden.

Bei einer obenliegenden Konstruktion wird der Raum zwischen den Fingern freigehalten, sodass bei aufbauenden Arbeiten störungsfrei weitere Finger und/oder Sensoren angefügt werden können.

Da, wie in Kapitel 2 beschrieben, ein Präzisionsgriff gefordert ist, werden die Kraftangriffspunkte an die Fingerspitzen gelegt. Gleichzeitig dient dieser Punkt auch als Befestigung am Finger. Eine Kraftübertragung auf andere Fingerteile, für einen Kraftgriff, ist nicht gefordert.

Richtlinien der Konstruktion

Basierend auf in Kapitel 3.2 gelisteten Richtlinien wird ein wesentliches Augenmerk auf die Radien von Zapfen bzw. Bohrungen gelegt. Zusätzlich ist die Konstruktion nie dünner als 2 mm ausgelegt. Alternativ sind Rundungen hinzugefügt um das Material zu stabilisieren. Dies ist besonders in den frei geformten Bereichen der Fall, wo die Einhaltung der Dicke aufwendig zu prüfen wäre.

Gelenke

Die Gelenke werden beim ersten Prototyp komplett mit einem Lagerfreiraum von 0,5 mm gedruckt. Mit diesem Freiraum ist sichergestellt, dass die Lager beweglich gedruckt werden und nicht verklemmen.

Das MCP-Gelenk des Daumens stellt eine Ausnahme dar. Hier wird für die rotatorischen Bewegungen ein Kugelgelenk eingebracht. Da hier der Verschiebeweg besonders groß ist, werden ein Zapfen und eine Hülse konstruiert, die ineinander laufen. Der Weg wird mit 8 cm so groß gewählt, dass Hülse und Zapfen bei Benutzung nicht komplett auseinanderlaufen können.

Eine weitere Besonderheit stellt das MCP-Gelenk der Finger dar. Es besitzt zwei Freiheitsgrade, bei denen es sich um Rotationen um Y- und Z-Achse handelt. Da die Konstruktion oberhalb der Fingergelenke liegt, sind die Gelenkpunkte des Aufbaus zu den Fingern leicht verschoben. Während die Finger bei der Beugung innenliegen und daher die Bahn der Fingerspitze dem kleinsten möglichen Radius entspricht, bewegt sich der

Aufbau in einem größeren Radius. Die zusätzliche Strecke macht eine axiale Verschiebung in X-Richtung notwendig, welche hier ermittelt und im zweiten Prototyp umgesetzt wird.

Aktorik

Das Modell dient, neben der Prüfung von Teillösungen, auch als Grundlage für die Findung möglicher Aktorik. Am Prototyp sollen mögliche Montagepunkte bzw. Flächen ermittelt werden, welche als Basis für die Auswahl von Aktoren und Bestimmung von Kraftwegen dienen. Montagepunkte dürfen die Hand nicht berühren, damit keine drückenden Stellen auftreten. Besonders Verschraubungen sollten nicht direkt auf der Haut liegen. Je nach verwendeten Schrauben könnten durch scharfe Kanten Verletzungen entstehen.

Einschränkung des Bewegungsraumes

Da der erste Prototyp der Erforschung des Bewegungsraumes dient, wird keine explizite Einschränkung durch die Konstruktion vorgesehen.

4.5.2 Bewertung

Der nötige Verschiebeweg wurde durch die Bewegung des Handschuhs ermittelt. Dazu ist eine Markierung an einem Endpunkt des Handschuhs auf dem Handrücken angebracht worden. Anschließend wird der Zeigefinger maximal gebeugt. Bei vollständiger Beugung wird an gleichem Endpunkt erneut eine Markierung auf dem Handrücken angebracht. Der Abstand zwischen beiden Markierungen stellt den nötigen Verschiebeweg dar, der von einem Lager aufgenommen werden muss. Die axiale Verschiebung muss einen minimalen Weg von 15 mm erlauben.

Da das MCP-Gelenk die letzte Verbindung zur Handfläche ist, befindet sich hier auch der größte Verschiebeweg. Daher sollte hier auch die Verschiebemöglichkeit vorgesehen werden. Bei diesem Prototyp liegt das Gelenk direkt am Fingerknochen an. Das Gelenkbauteil dreht auf dem Handrücken, was für den Anwender bei längerer Nutzung unangenehm ist.

An den Fingerspitzen sind feine Strukturen mit Freiformen angebracht, die leicht brechen und anders aufgebaut werden müssen. Die Verbindung zwischen den Druckschichten ist zu schwach und hält dem Druck des Fingers nicht stand. Da an dieser Stelle auch die Kraft übertragen wird, muss die Konstruktion hier verstärkt werden. Neben der Verstärkung ist hier auch eine Parametrisierung nötig, da dieser Bereich von der

Fingerdicke abhängig ist.

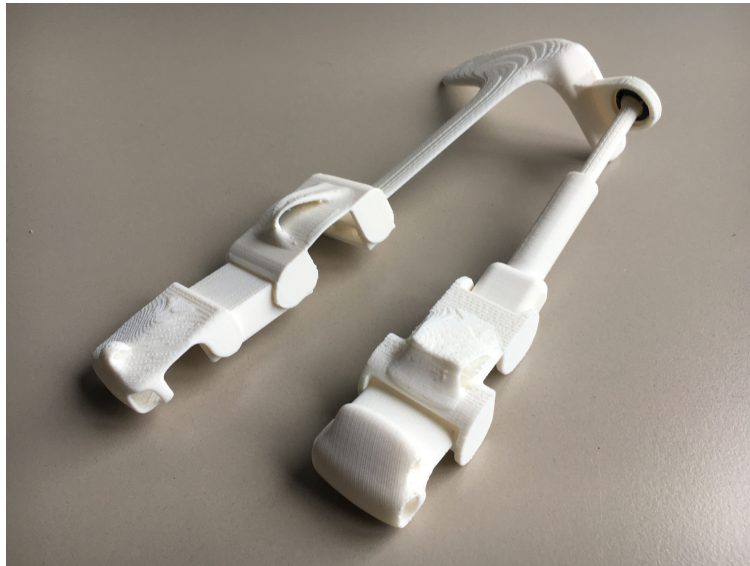


Abbildung 4.1: Der erste Prototyp

In dem Aufbau sind die Fingerknochen „MCP-DIP“, „DIP-TIP“, „MCP2-PIP2“, „DIP2-TIP2“ sowie der Aufbau des Handrückens, als Freiformen ausgelegt. Dies erlaubt zwar eine schnelle Konstruktion durch einfaches Ziehen und frei positionierbare Verdickungen an festigkeitskritischen Bereichen zu platzieren, allerdings verhindert dies einen parameterabhängigen Aufbau. Schwierig ist außerdem die genaue Maßbestimmung an unterschiedlichen Punkten. Einzelne Lücken zur Material- und Gewichtersparnis sind aufwendig hinzuzufügen. An vielen Bereichen kann die Konstruktion verfeinert werden. Weiterhin sind die Oberflächen der Freiformen sehr rau, da die Schichtzahl an vielen Stellen variiert. Deutlich zu sehen ist dies an den Freiformen des ersten Prototyps (Abbildung 4.1). Für nachfolgende Entwicklungen wird daher auf Freiformen verzichtet und mit der Funktion „Erhebung“ gearbeitet. Diese Funktion erlaubt es, eine gleichmäßige Verbindung zwischen unterschiedlichen Flächen zu erstellen. Dadurch minimalisiert sich der Materialverbrauch und gleichzeitig wird eine Parametrisierung möglich.

4.6 Prototyp 2

Dieser Prototyp stellt den Zwischenschritt zwischen erstem Versuch und finalem Modell dar. Es sollen die Schwachstellen des ersten Prototyps eliminiert und die Parametrisierung ermöglicht werden. Während das erste Modell zur Prüfung der Funktionsidee

diente, soll dieser nächste Prototyp dem finalen Modell schon möglichst angenähert sein und zusätzlich die Funktionsprüfung der Aktoren ermöglichen.

4.6.1 Auswahl der Verbesserungen

Wie bereits in Kapitel 4.5 erwähnt, muss für die Parametrisierung auf Freiformen verzichtet und die Funktion „Erhebung“ verwendet werden um Formenübergänge zu gestalten. Probleme durch die teilweise zu dünnen Schichten werden auf diese Art behoben. Übergänge zwischen unterschiedlichen Formen verlaufen gleichmäßig und sind präzise auswählbar.

Anhand des ersten Prototyps (Kapitel 4.5) wurden nötige Verschiebewege ermittelt und mathematisch in Kapitel 4.6.2 nachgewiesen. Am Zeigefinger wird das MCP-Gelenk neu konstruiert, damit eine Verschiebung von 15 mm möglich ist. Zusätzlich wird der Gelenkpunkt angehoben um eine direkte Auflage auf Handrücken bzw. Fingerknochen zu vermeiden und den Tragekomfort zu verbessern. Ausgeführt wird dieses Gelenk als ein Schlitten, welcher neben einer axialen Verschiebung auch eine begrenzte Rotation um die Z-Achse ermöglicht (Einschränkung durch Breite des Schlittens möglich). Die Daumenkonstruktion am Fingerknochen MCP-PIP wird am außenliegenden Zapfen des MCP-Gelenks eingehängt.

Während die Konstruktion des MCP-Gelenks am Daumen bereits eine Verschiebung ermöglicht, wird zusätzlich am DIP-Gelenk eine geringfügige Verschiebemöglichkeit in Form eines Langloches hinzugefügt. Dies ist funktional nicht zwingend erforderlich, erhöht jedoch den Tragekomfort, indem die Konstruktion des MCP-Gelenks mehr Bewegungsspielraum erhält und bei Beugung nicht mehr so stark auf den Fingerknochen drückt.

Während der erste Prototyp noch dazu diente, die grobe Lage der Komponenten und Maße zu prüfen, wird beim zweiten Prototyp bereits eine parametrisierte Auslegung vorgenommen. Es werden die in Kapitel 4.3 ermittelten Parameter übernommen und als weiterer Parameter der Lagerfreiraum eingefügt. Auf diese Weise lässt sich der Handschuh je nach Material oder Druckgenauigkeit einstellen, ohne die komplette Konstruktion zu überarbeiten. Mögliche Freiräume für vorhandene Drucker sind in Kapitel 3.4.1 dargestellt. Mit diesem Parameter ändert sich der Abstand zwischen jeglichen beweglichen Teilen in der Konstruktion. Standardmäßig ist ein Freiraum von 0,5 mm gesetzt. Mit diesem Maß können beide vorhandenen FDM-Drucker bewegliche Teile generieren. Am ersten Prototyp waren lediglich an den Fingerspitzen Befestigungspunkte für den Nylonfaden konstruiert, der für die Kraftübertragung vom Servo auf die Finger dienen soll. Da die Fäden eine bestimmte Länge aufweisen und zur korrekten Funktion einen bestimmten Weg entlanglaufen müssen, werden weitere Befestigungspunkte an einzelnen Fingerteilen hinzugefügt. Zusätzlich verhindert dies, dass sich die Fäden in Lagern verfangen und diese blockieren können.

4.6.2 Mathematischer Nachweis der erforderlichen Verschiebung

Mit Funktionen der Trigonometrie kann die nötige Verschiebung in Abhängigkeit von den Bewegungswinkeln der Gelenke ermittelt werden (Abbildung 4.2). Voraussetzung dafür ist, dass der Versatz der Konstruktion vom Finger bekannt ist. Hier wird ein konstanter Abstand von 1 cm angenommen.

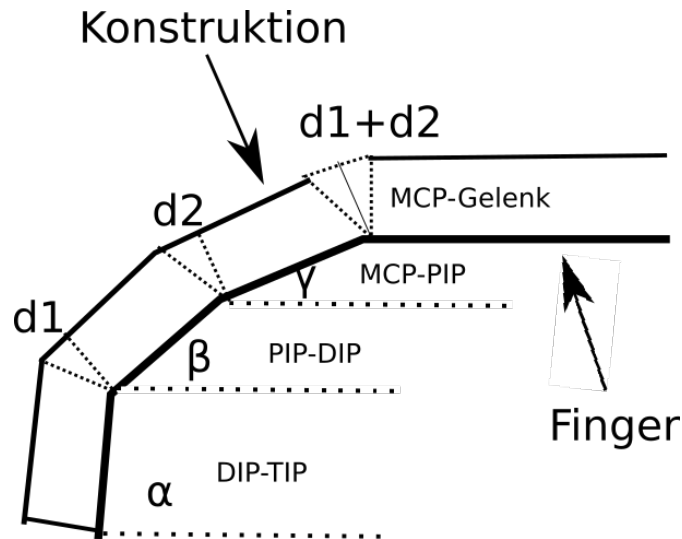


Abbildung 4.2: Geometrie der Fingerbewegung

$$d_1 = \sin(180^\circ - \beta - 90^\circ - (90^\circ - \alpha)) * \text{Abstand zu Finger} \quad (4.1)$$

$$d_2 = \sin(180^\circ - \gamma - 90^\circ - (90^\circ - \beta)) * \text{Abstand zu Finger}$$

$$d_{ges} = d_1 + d_2 \quad (4.2)$$

Setzt man beispielsweise Winkelwerte (z.B. $\alpha = 80^\circ$, $\beta = 30^\circ$, $\gamma = 30^\circ$) in die Gleichungen (4.1) ein und addiert die Einzelwerte entsprechend Gleichung (4.2), erhält man eine Verschiebung im MCP-Gelenk von 15 mm. Dies entspricht ca. der Verschiebung, die mit Hilfe des ersten Prototyps ermittelt wurde.

4.6.3 Funktionsprüfung

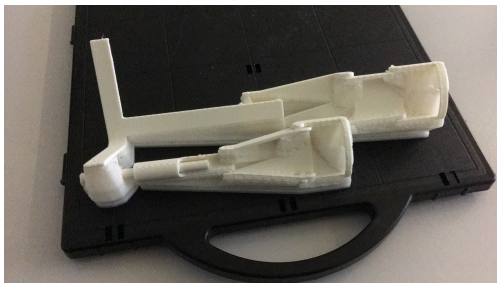
Da dieser Prototyp bereits die Basis für das finale Modell darstellt, wird die Funktion besonders genau geprüft. Primär geht es dabei um die Prüfung von Mechanik und Kraftübertragung. Dafür wird ein Servo auf dem Handschuh befestigt und wahlweise mit Zeigefinger oder Daumen verbunden. Die Schaltung ist auf einem Breadboard aufgebaut. Der Mikrocontroller bezieht seine Versorgungsspannung per USB, während der

Servo von einem Labornetzteil direkt mit 4V versorgt wird. Die Ansteuerung des Servos wird in Kapitel 4.7 behandelt.

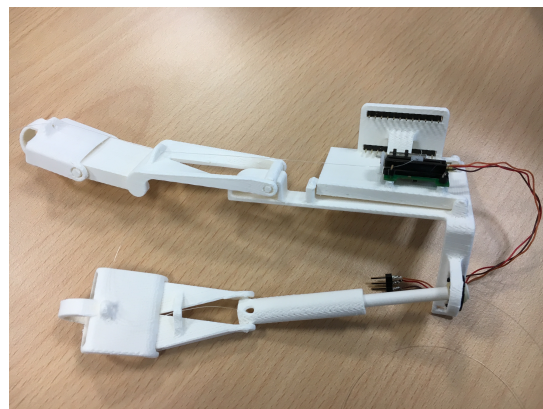
4.6.4 Ergebnis

Der Handschuh funktioniert problemlos. Die Montage des Servos ist an den vorgesehenen Punkten möglich, allerdings wird die Servobefestigung auf ein Einschubsystem geändert, damit eine schraubenlose Verbindung möglich wird. Schrauben mit einem Durchmesser von 1 mm sind nicht immer leicht zu beschaffen und aufgrund ihrer kleinen Größe nicht einfach zu verschrauben. Weiterhin kann der Drucker keine Bohrung in der Größe fertigen, wodurch eine Nachbearbeitung erforderlich wird, oder aber die Schrauben direkt in den Kunststoff gedreht werden müssten. Daraus würde eine begrenzte Haltbarkeit resultieren (siehe 4.8.2).

Die Verschiebung am MCP-Gelenk des Zeigefingers ist passend ausgelegt und der Verstellweg des Servos wird dem Verschiebeweg gerecht. An diesem Gelenk muss jedoch auf dem Lager eine weitere Fadenführung hinzugefügt werden. Ohne diese kann es passieren, dass der Faden in den Lagerzwischenraum rutscht und so einen höheren Widerstand erzeugt. Zusätzlich hilft diese Führung bei der Rückstellung, indem das Gelenk den Verschiebeweg entlang nach oben gezogen wird (Abbildung 4.9a und 4.9b).



(a) Fertiger Ausdruck des zweiten Prototyps mit Stützstrukturen



(b) Der zweite Prototyp

4.7 Auswahl von Sensoren und Aktoren

Ein wichtiger Punkt dieser Arbeit ist die Auswahl von Aktoren. Dadurch sollen erste Versuche mit dem Handschuh ermöglicht werden.

4.7.1 Kriterien für die Aktorauswahl

Um die Auswahl an Aktoren einzugrenzen werden Kriterien definiert, an denen eine Eignung für den Handschuh gemessen werden kann. Damit der Anwender möglichst wenig vom Handschuh spürt, sollen die Aktoren klein und leicht sein. Darüber hinaus auch stromsparend, um einen möglichst langen Akkubetrieb zu ermöglichen. Die Kriterien sollen für alle Handgrößen von Erwachsenen passen, damit neben den Parametern nicht auch die Aktorik angepasst werden muss.

Auch wenn zunächst nur Daumen und Zeigefinger steuerbar sein sollen, darf die Aktorik für diese beiden Finger nicht den kompletten Bauraum einnehmen. Daher sollen die Aktoren so klein sein, dass die Option besteht, den Handschuh auf fünf Finger zu erweitern. Dabei spielt es keine Rolle, ob die Aktoren über-, neben- oder hintereinander positioniert werden, solange die vorgesehenen Kraftwege für die jeweiligen Finger beibehalten werden. Zusätzlich sollte keine Positionierung aller Aktoren übereinander nötig sein, andernfalls würde der Handschuh unhandlich werden und die Beschädigungsgefahr steigen.

Alle hintereinanderliegenden Aktoren sollten, bei einer Befestigung auf der Hand, an keiner Stelle eine Länge von 5 cm überschreiten. In der Breite dürfen nicht mehr als 6 cm belegt werden. Die maximale Höhe der Aufbauten darf 4 cm nicht überschreiten. Bei größeren Höhen steigt die Gefahr, dass der Nutzer bei Bewegungen die Aufbauten nicht bedenkt und diese mit dem Arm oder sonstigen Gegenständen kollidieren. Hier gilt: je flacher und kleiner der Aufbau, desto besser.

Ein weiterer, wichtiger Punkt für die Portabilität des Handschuhs ist das Gewicht. Wie in den Anforderungen (Kapitel 4.1) erwähnt, soll der Nutzer möglichst wenig von dem Handschuh spüren. Um dies zu erreichen muss das Gewicht gering gehalten werden. Realistisch ist dabei ein Aufbaugewicht von maximal 150 g. Bei größeren Gewichten wird es schwieriger, den Fokus des Anwenders auf das eigentliche Feedback zu lenken. Ein weiterer Grund das Gewicht möglichst klein zu halten ist die Befestigung. Eine große, schwere Konstruktion auf dem Handrücken verrutscht eher als ein leichter Aufbau und benötigt daher stärkere oder zusätzliche Befestigungen.

Kritisch sind, bei einem kleinen und portablen Aufbau, auch Stromversorgung und Ansteuerung. Die meisten Mikrocontroller können eine Ausgangsspannung von 5 V liefern bzw. damit versorgt werden. Um komplizierte Elektronik zu vermeiden sollte daher keine Aktorik ausgewählt werden, die mehr Spannung benötigt.

Der Kraftbereich muss bei aktiven Aktoren klar definiert werden. Während bei passiven, bremsenden Aktoren die Bewegung nur gehemmt wird, arbeitet beispielsweise ein Servo aktiv am Finger und kann eine Bewegung erzeugen, die gegen die der Fingermuskulatur arbeitet. Die erzeugte Kraft muss spürbar sein, darf aber nicht verletzend wirken. Typische auftretende Maximalkräfte beim Zugreifen liegen zwischen 10 N und 15 N[22]. Daher darf die Kraft nicht größer als 10 N sein. Gegen diese Kraft kann ein erwachsener Mensch mit allen Fingern problemlos entgegenwirken. Ein Sicherheitsfaktor von 3 N wird

zusätzlich berücksichtigt, sodass nur Aktoren in die Wahl gezogen werden, die weniger als 7 N aufbringen können.

Bei allen Varianten der Kraftaufbringung muss auch eine Rückstellmöglichkeit vorgesehen werden. Dabei kann die Rückstellung entweder durch einen Aktor oder, bei geringem Kraftaufwand, durch die Fingermuskulatur erfolgen.

4.7.2 Auswahl des Servos

Bei der Servoauswahl wurden möglichst kleine Servos gesucht, damit der Bauraum nicht überschritten wird. Zur Auswahl stehen dabei klassische Servos, die einen bestimmten Winkel anfahren, oder aber Linearservos, die eine bestimmte Strecke verfahren können. Da an einem Faden gezogen werden und damit eine Wegverstellung erfolgen soll, wurden Linearservos SPMSH2040L der Marke Spektrum ausgewählt. Neben einem Verstellweg von 13,5 mm überzeugt dieser Servo mit einer geringen Bauhöhe von lediglich 8,2 mm und einer maximalen Kraft von 3,3 N. Nachteilig sind die mangelhafte Dokumentation dieses Modells und die Eingangsspannung zwischen 3,2 V und 4,2 V. Bei einem Anschluss von 5 V muss eine Diode oder ein Spannungswandler in die Versorgungsleitung eingebaut werden. Alternativ ist ein Anschluss des Servos direkt an einen Modellbauakku möglich. Es existiert keine Angabe über die Stromaufnahme des Servos, daher muss diese vor einer eventuellen Versorgung über den Mikrocontroller geprüft werden. Eine Überschreitung des maximalen Ausgangsstromes am Pin des Mikrocontrollers könnte zur Überlast und damit verbundener Zerstörung führen. Da Servos üblicherweise hohe Impulsströme benötigen, kann eine direkte Anbindung an den Akku nötig sein.

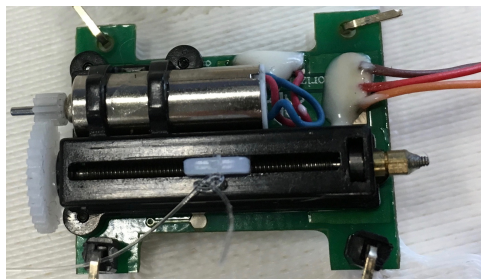


Abbildung 4.4: Linearservo Spektrum SPMSH2040L

4.7.3 Anforderungen an den Mikrocontroller

Der Mikrocontroller muss für die Spannungsversorgung mit einem Akku geeignet sein. Die Versorgung soll mit einer Eingangsspannung zwischen 3,7 V und 9 V erfolgen. In diesem Spannungsbereich ist eine große Auswahl an Batterien und Akkus verfügbar.

Speziell aus dem Modellbaubereich gibt es Exemplare in kleinen Formaten.

Es müssen zwei PWM-Ausgänge vorhanden sein, um die Servos von Zeigefinger und Daumen durch den Mikrocontroller ansteuern zu können. Idealerweise sollte der Controller mit fünf PWM-Ausgängen bestückt sein, damit in Zukunft auch Aktoren für weitere Finger ansteuerbar sind.

Aufgrund der Montage auf dem Handschuh muss der Controller so klein wie möglich sein. Die Fläche darf 50 mm x 30 mm nicht überschreiten. Gleichzeitig sollte die Bauhöhe inklusive Anschlusspins nicht mehr als 20 mm betragen. Vom Gewicht her sind in dieser Größenordnung keine Probleme zu erwarten und es gilt wieder: je kleiner, desto besser. Ein weiteres Kriterium ist die einfache Verfügbarkeit, damit auch kurzfristig neue Varianten in Betrieb genommen werden können. Zusätzlich sind auch einfache Programmiermöglichkeiten und eine große Community vorteilhaft, um nicht komplette Steuerungen neu entwickeln zu müssen. Auch zur schnellen Inbetriebnahme und Fehlerbehebung ist dies hilfreich.

4.7.4 Auswahl des Mikrocontrollers

Auf Basis der oben genannten Anforderungen wird ein Arduino als Mikrocontroller ausgewählt. Dieser besticht mit seinem günstigen Preis, umfangreichen Anschlussmöglichkeiten (Abhängig vom genauen Modell) und großer Community. Für Arduinoprogrammierung ist eine einfache Entwicklungsumgebung verfügbar und die Controller sind problemlos zu beschaffen. Je nach nötigen Anschlussmöglichkeiten kann zwischen unterschiedlichen Modellen gewählt werden. Besonders klein sind die Modelle Mini[23] und Nano[24]. Größere Varianten kommen für die Montage auf dem Handschuh nicht in Frage. Je nach Auswahl von Sensoren und Aktoren kann zwischen Arduino Mini und Nano gewählt werden. Der Nano bietet mehr Anschlussmöglichkeiten, während der Mini mit besonders kleiner Größe überzeugt. Da zunächst nur Daumen und Zeigefinger gesteuert und keine Sensoren angeschlossen werden müssen, sind die Möglichkeiten des Arduino Mini ausreichend. Zusätzlich weist dieser bereits sechs PWM-Ausgänge auf und bietet damit auch für die Steuerung einer kompletten Hand mit fünf Fingern ausreichend Reserven. Der Arduino Mini arbeitet bei 5 V und kann mit einer Eingangsspannung zwischen 7 V und 9 V umgehen.

4.7.5 Anbindung des Servos

Die Frage, ob eine Stromversorgung des Servos mit dem Mikrocontroller möglich ist, wurde bereits bei der Servoauswahl aufgeworfen. Daher wird bei einem Versuchsaufbau mit externer Stromversorgung die Stromaufnahme des Servos geprüft. Wie vorangegangen erwähnt, werden häufig hohe Impulsströme benötigt, die schlimmstenfalls zur Zerstörung des Mikrocontrollers führen könnten. Vom Hersteller gibt es keine Angabe

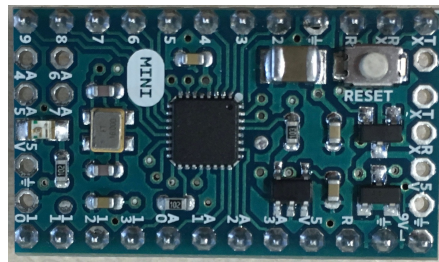


Abbildung 4.5: Arduino Mini

über Spitzenströme. In einem Versuchsaufbau mit Labornetzteil wird durch ein Multimeter die Stromaufnahme bei maximalem Verfahrensweg abgelesen. Aufgrund der Trägheit des Multimeters bzw. dessen Anzeige kann nur die ungefähre Größenordnung abgelesen werden. Die Ausschläge des Multimeters gehen in Bereiche von mindestens 150 mA. Bedingt durch den internen Aufbau des Servos liegen die zu erwartenden Stromspitzen deutlich darüber. Eine direkte Anbindung an den Mikrocontroller wird damit unmöglich, da die Gefahr, dass Leiterbahnen zerstört werden, zu groß ist.

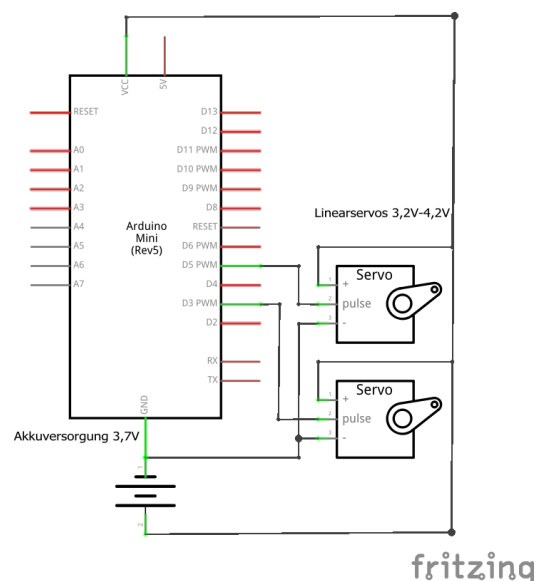


Abbildung 4.6: Anschluss der Servos

Servoanschluss am Akku

Häufig arbeiten Modellbauakkus mit 3,7 V. In diesem Fall ist ein direkter Servoanschluss an den Akku möglich. Bei abweichenden Versorgungsspannungen müssen, je nach verwendetem Akku, geeignete Spannungswandler verwendet werden, damit der Servo mit

einer Spannung zwischen 3,2V und 4,2V versorgt wird. In diesem Bereich kann die Spannung beliebig festgelegt werden. Zu beachten ist lediglich, dass die Verfahrgeschwindigkeit des Servos mit der Spannung steigt. Als Sollwert ist die Verfahrdauer mit 0,13s Ende-zu-Ende angegeben.

Bei einer Versorgungsspannung von 5V kann vereinfachend eine Diode (1N4004) vor den Servo geschaltet werden. Diese Diode ruft einen Spannungsabfall von 0,7V hervor, wodurch am Servo eine Eingangsspannung von 4,3V anliegt. Bei einer Überschreitung des Spannungsbereichs in diesem Umfang sind keine Probleme zu erwarten und die Servofunktion ist gewährleistet.



Abbildung 4.7: Möglicher Modellbauakku der Firma ACME

Steuerung des Servos

Da zu dem Linearservo der Marke Spektrum keine Dokumentation vorhanden ist, muss der Steuerbereich festgestellt werden. Der Arduino bietet die vorgefertigte Bibliothek „Servo.h“ zur Servoansteuerung, welche eingebunden wird. Bei herkömmlichen Servos lässt sich mit dem Befehl „servo.write(degree)“ ein Winkel der Variable „degree“ an den Servo „servo“ übergeben. Nachdem testweise einige Werte eingesetzt wurden, konnte die Mittelstellung des Servos bei degree = 105 und Endpunkte bei degree = 60 bzw. degree = 150 ausgemacht werden. Zwischen diesen Endpunkten weist der Servo lineares Verhalten auf. Eindeutige Positionen können zwischen diesen Werten angefahren werden. Bis zu den mechanischen Endpunkten sind mit diesen Werten noch 0,5mm Platz. Der Quellcode ist im Anhang 6.1 zu finden.

4.8 Finales Modell

Der Druck des finalen Modells erfolgt mit Nylon. Durch dieses Material wird die Funktion der Clipseysteme gewährleistet und die Bruchgefahr der Bauteile minimiert.

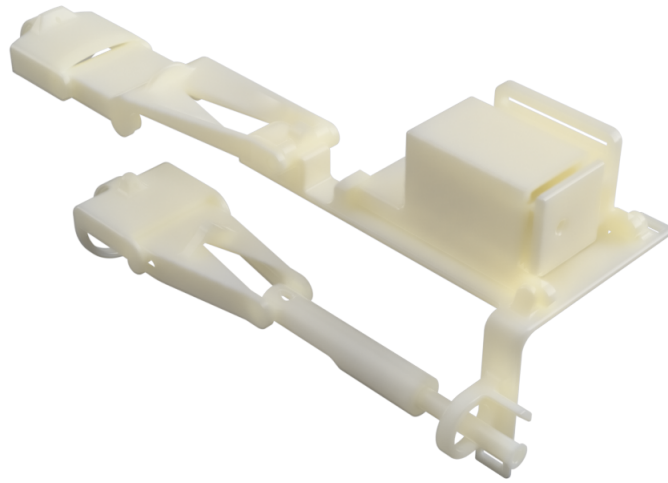


Abbildung 4.8: Finales Modell

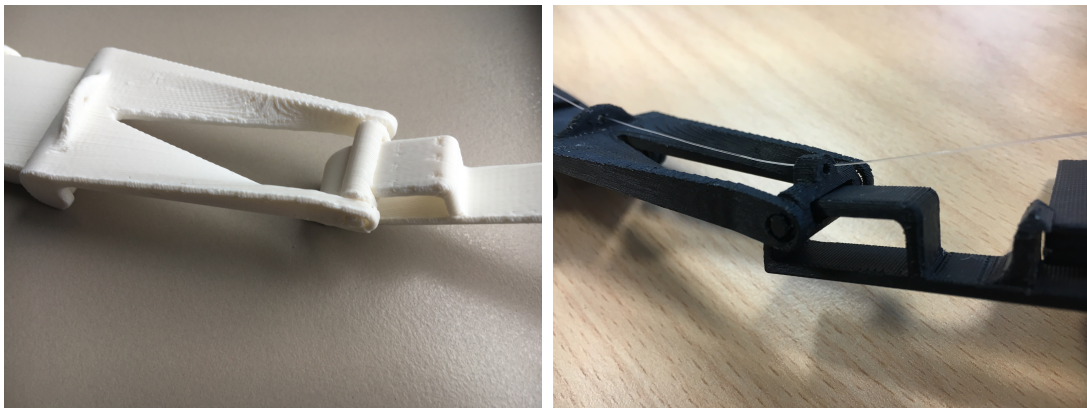
4.8.1 Veränderungen zu Prototyp 2

Da der zweite Prototyp weitestgehend dem fertigen Modell entspricht, werden nur geringfügige Anpassungen vorgenommen. Die wesentliche Änderung ist der Umbau der Aktorhalterung (im nächsten Abschnitt genauer beschrieben). Zusätzlich wurde eine Fadenführung am MCP-Gelenk des Zeigefingers hinzugefügt um die Rückstellung zu verbessern und die korrekte Fadenführung zu gewährleisten.

4.8.2 Halterung für Aktorik

Auf Basis der in Kapitel 4.7 ermittelten Anforderungen wird ein Aufbau für den Handrücken hinzugefügt, auf welchem Mikrocontroller und Aktoren angebracht werden können. Der Aufbau wird als ein clipsbares Modul ausgeführt, damit unterschiedliche Elektronik angebracht werden kann, ohne gleich das gesamte Handschuhmodell zu wechseln. Solange die Breite des Scharniers sowie der Abstand zum Clip eingehalten werden, kann man den Aktor- bzw. Elektronikaufbau beliebig gestalten.

Bei diesem finalen Modell wird eine Halterung entworfen, die einen Arduino Mini und zwei Servos beherbergen kann. Der Arduino wird seitlich in eine Befestigung gedrückt, während die Servos in einen Rahmen geschoben werden. Eine Verschraubung ist nicht vorgesehen, da die Servoplatinen Bohrungen von 1 mm besitzen. Im 3D-Druck müsste die Verschraubung manuell gebohrt, oder die Schraube direkt in den Kunststoff gedreht



(a) MCP-Gelenk am Prototyp 2

(b) MCP-Gelenk am finalen Modell

Abbildung 4.9: Versionsvergleich des MCP-Gelenks

werden. Hier würde es leicht zum Überdrehen der Schraube und zum Abscheren von Druckschichten kommen. An der gleichen Position erneut etwas zu verschrauben wäre damit unmöglich. Weiterhin sind derart kleine Schrauben unhandlich und nicht, wie bereits erwähnt, immer verfügbar.

Der Einschub für die Servos hat weitere Vorteile gegenüber einer Verschraubung. Die Fadenführung kann durch Bohrungen an passenden Stellen im Rahmen einfach gestaltet und verändert werden. Durch diese Art der Führung wird verhindert, dass der Faden sich in den Zahnrädern verheddert. Eventuelle Beschädigungen und Einflüsse von Außen werden durch die geschlossene Bauweise von den Bauteilen ferngehalten. Solange Platinenbreite und Servohöhe konstant bleiben, können beliebige Servos eingebaut werden. Bei abweichenden Längen der Servoplatinien können diese durch Austausch des Deckels in Position gehalten werden. Sind die Abweichungen der Servomaße von den vorhandenen Modellen (Spektrum SPMSH2040L) umfangreicher, müssen auch die Parameter der Servohalterung angepasst werden. Die anpassbaren Parameter sind in Tabelle 6.2 aufgelistet.

4.8.3 Besonderheiten beim Druck

Das finale Modell für den Nyldruck wird aus drei einzelnen STL-Dateien gedruckt. Der Deckel des Servogehäuses wird gesondert gedruckt, damit dieser besonders maßgenau ist und in das Gehäuse einrastet. Weiterhin wird der Zapfen des MCP-Gelenks des Daumens getrennt gedruckt, damit dieser ebenfalls leicht durch das Gelenklager geführt werden kann und das Lager nicht wegen Maßungenauigkeit verklemmt. Während beim Druck mit ABS-Kunststoff oder Polycarbonat das Handschuhmodell schräg gedruckt werden sollte, kann der Nylonhandschuh gerade, auf dem Handrücken liegend, gefertigt werden.

4.8.4 Nachbearbeitung

Beim Druck mit Nylon ist zu beachten, dass das Material dazu neigt, „Fäden“ zu bilden. Mit einem Messer müssen diese vom fertigen Modell abgeschnitten werden. Ein negativer Einfluss auf die Funktionalität und das Druckergebnis ist nicht zu erwarten.

4.8.5 Zusammenbau

Der Ausdruck ist so ausgelegt, dass möglichst wenig Zusammenbauarbeiten notwendig sind. Für den Anschluss des Daumens wird ein Clipsgelenklager (Igus Igubal ECLM-05-02 [[manual:igubal](#)]) dort eingedrückt. Da das Lager Kräfte bis zu mehreren 100 N verträgt und an dieser Position kaum Belastungen zu erwarten sind, wurde dieses Lager aufgrund der kleinen Bauform ausgewählt. Der Zapfen des MCP-Gelenks wird durch das Gelenklager geführt. Die anderen Bauteile des Daumens sind bereits zusammengefügt gedruckt und können direkt auf den Zapfen aufgesteckt werden. Anschließend müssen noch die Servos verkabelt und die Zugfäden durch die vorgesehenen Öffnungen gezogen werden. Danach ist der Handschuh bereit zur Verwendung (Abbildung 4.10). Zeich-

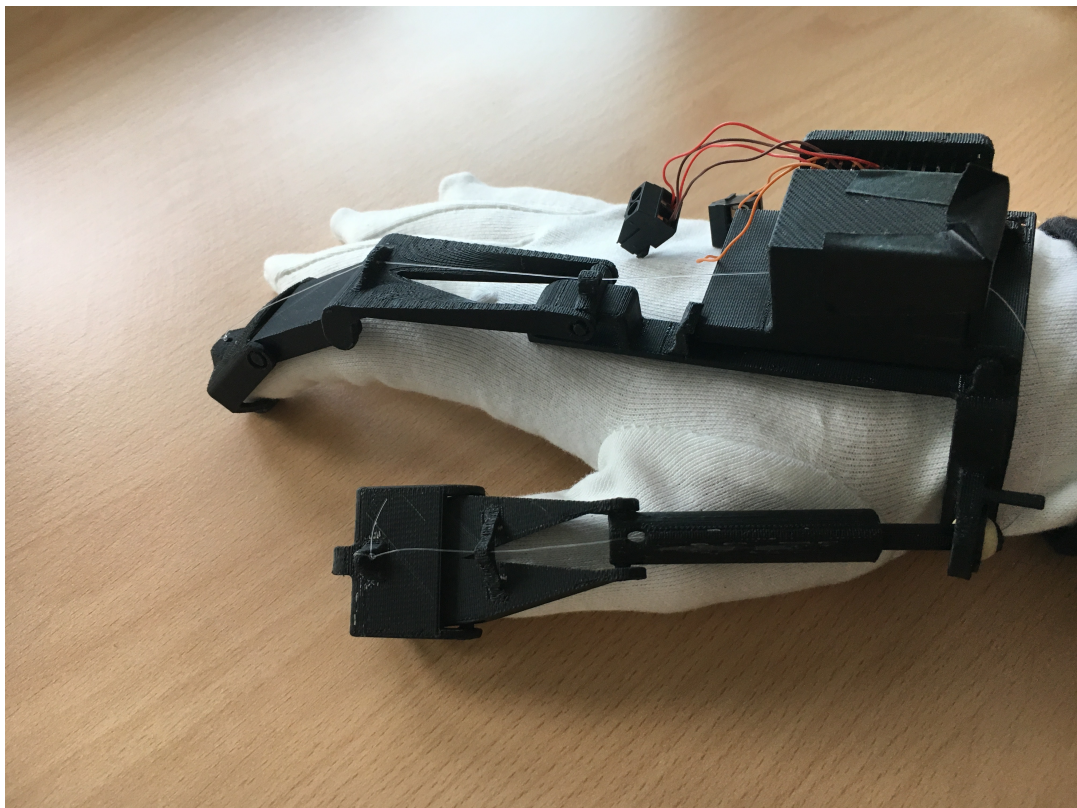


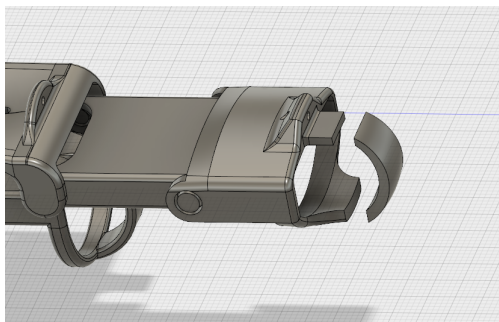
Abbildung 4.10: Finales Modell mit verbauter Aktorik

nungen der Einzelteile des finalen Modells befinden sich im digitalen Anhang. Auf die Bemaßung wird hier verzichtet. Durch die Parametrisierung und individuelle Anpassung wären die Maße lediglich beispielhaft.

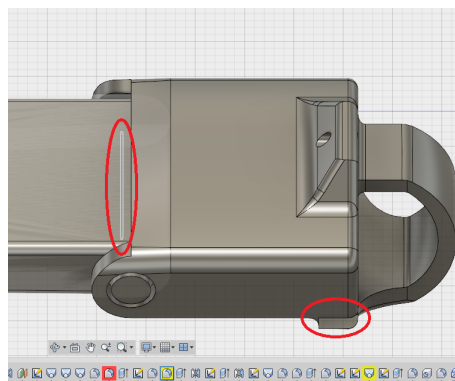
4.9 Anpassungsmöglichkeiten der Parameter

Wesentlich für den Tragekomfort ist die Passform des Handschuhs. Durch Anpassung der Konstruktionsparameter (Kapitel 4.3) an die individuellen Handabmessungen kann für jeden Anwender ein angepasster Handschuh gefertigt werden.

Besonders wichtig ist es, die Gelenkpunkte der Finger so genau wie möglich zu erfassen. Da man, auf einfachem Wege, nicht in die Finger hineinsehen kann, sollten mehrere Messungen durchgeführt und der Mittelwert als Parameter übernommen werden. Nach Eingabe der neuen Parameter in der Maske „Parameter ändern“ wird die Konstruktion mit den neuen Maßen automatisch generiert. Da die Software an einigen Stellen nicht absolut robust arbeitet, müssen nach der Neuberechnung die Konstruktionsabschnitte auf Fehler geprüft werden. Häufig findet die Software Kanten nicht und diese müssen neu gewählt werden. Bei großen Maßunterschieden kann es zusätzlich vorkommen, dass Rundungen an den Kanten nicht generiert werden können. Hier ist ggf. eine Anpassung der Radien vorzunehmen.



(a) Verlorene Kontaktfläche



(b) Verlorene Kontaktfläche und neu zu wählende Kante

Abbildung 4.11: Fehler bei der Parameteranpassung

5 Fazit und Ausblick

Der fertige Handschuh bietet die volle gewünschte Funktionsfähigkeit. Bei einem Präzisionsgriff kann eine Krafrückmeldung zwischen Daumen und Zeigefinger erfolgen. Die Ansteuerung der Servos ist einfach und mit Standardbibliotheken des Arduinos möglich. Sie weisen lineares Verhalten auf, können in eine vorgesehene Position fahren und auf diese Weise die Kontaktpunkte des Gegenstandes aus der VR widerspiegeln. Durch kontinuierliches Verfahren der Servos können auch weiche Gegenstände simuliert werden. Die Krafrückmeldung greift, wie gewünscht, an den Fingerspitzen und Fingerkuppen an.

Die Verletzungssicherheit ist auf unterschiedliche Arten realisiert. Durch die geringe Kraft der Servos können in der gesamten Konstruktion keine verletzenden Kräfte auftreten. Während die MCP-Gelenke frei beweglich sind und die Sicherheit durch den maximalen Verfahrweg der Servos gewährleistet ist, sind an den restlichen Gelenken Kontaktpunkte angebracht, die, ohne Zerstörung der Konstruktion, keinen verletzenden Bewegungsraum zulassen.

Um die Nutzung des Handschuhs möglichst einfach zu gestalten, ist das Modell auf einem Textilhandschuh befestigt. Durch die Fingerführung wird das Anziehen vereinfacht und zusätzlich die Konstruktion stabilisiert. Auch wird durch die Kombination mit dem Textilhandschuh die Robustheit verbessert, da die Bauteilverbindungen nicht nur am Faden hängen.

Die gesamte Elektronik und Aktorik sind auf einer separaten Halterung montiert, die ausgeclipst und getauscht werden kann. Auf diese Weise kann ein Handschuhmodell, ohne aufwendige Umbauten, mit unterschiedlicher Elektronik bestückt werden.

Das gesamte Modell ist durch das verwendete Material sehr leicht. Auch Aktorik und Elektronik in Miniaturgröße sind sehr leicht und stören durch das geringe Gewicht nicht bei der Verwendung. Wird der Handschuh getragen aber nicht bewegt, ist er kaum wahrnehmbar. Inklusive Akku, Mikrocontroller, Servos und Textilhandschuh wiegt der komplette Handschuh 70 g. Bis zu dem vorgegebenen Maximum von 200 g ist damit noch ausreichend Handlungsspielraum für weitere Konstruktionen oder Elektronik. Lediglich bei Bewegungen spürt man, dass sich ein festes Material an der Hand befindet und mitbewegt werden muss, was aber wegen der Kraftübertragung kaum vermeidbar ist.

Im Laufe der Arbeit haben sich viele Besonderheiten herausgestellt, die sich durch den 3D-Druck ergeben. Unterschiedliche Druckverfahren bieten vielfältige Möglichkeiten und unterscheiden sich deutlich bei Material, Genauigkeit und Konstruktionsmöglichkeiten. Aufgrund geringer Erfahrungswerte, besonders mit kleinen, dünnen und beweglichen

Bauteilen, mussten einige Versuchsteile mit den vorhandenen Druckern gefertigt werden, um die ideale Auswahl für das Projekt zu treffen. Bedingt durch seine Elastizität stellt Nylon eine gute Lösung dar, die trotz filigraner Bauweise ausreichend stabil ist.

Für den Anwender wird der Tragekomfort durch drei Punkte gewährleistet: Textilhandschuh als Verbindung, elastische Nylonkonstruktion und die Möglichkeit, durch Parameteranpassung einen individuell passenden Handschuh zu fertigen. Leider ist die Software, wie in Kapitel 4.9 erwähnt, bei Parameteränderungen nicht immer robust und erfordert geringfügige Nachbearbeitungen am CAD-Modell.

Für Testzwecke ist der Handschuh bereits einsatzbereit. Die Integration in die VR muss noch erfolgen. Dann jedoch können Versuche durchgeführt und ein Feedback durch die Servosteuerung eingerichtet werden. Auch gibt es noch Optimierungsbedarf beim Zusammenbau. Die filigrane Fadenführung und Verkabelung ist sehr schwierig und ohne Feinmechanikwerkzeug nicht durchführbar. Daher sollte geprüft werden, ob die Elektronik an anderen Positionen angebracht werden kann. In dem Zusammenhang können auch alternative Aktoren in Betracht gezogen werden, die durch Änderung des Aufbaus ggf. auch andere Positionierungsmöglichkeiten bieten.

Die Konstruktion eines Handschuhs und dessen Produktion im 3D-Druck ist gut durchführbar. Dabei sind jedoch zunächst die Möglichkeiten der vorhandenen Drucker zu beachten.

Ausblick

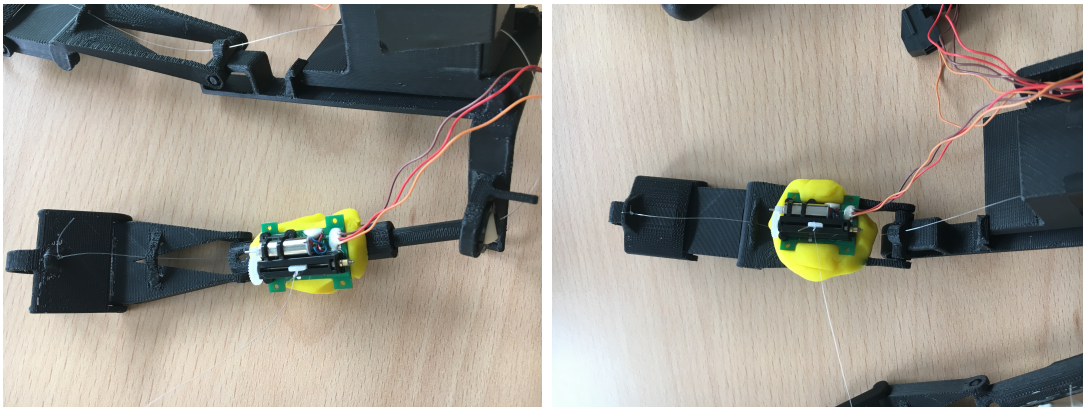
Mit dieser ersten Entwicklung ist ein verwendungsfähiger Handschuh entstanden, der viel Spielraum für Verbesserungen und Ergänzungen bietet. Um ein komplettes Force-Feedback an der Hand zu repräsentieren, sollten weitere Finger hinzugefügt werden. Damit wäre es auch möglich einen Kraftgriff zu simulieren. Mit Sensoren ist eine Kraftregelung denkbar, um die Rückmeldung präziser steuern zu können. Hierzu müsste eine Rückkopplung der Kraft bzw. des Fadenweges erfolgen.

Die Lage der Hand wird sehr gut mit LeapMotion erfasst, allerdings können Aufbauten auf der Hand Einfluss auf die Erkennungsgenauigkeit nehmen. Um das System robuster zu gestalten, sollten Sensoren angebracht werden. Hallsensoren in den Gelenken könnten Rückmeldung über die Gelenkstellungen geben, während Miniatur-Lasersensoren Abstände bzw. Wege detektieren können.

Um den Realismusgrad weiter zu verbessern, kann der Kraftangriffspunkt auf die Fingerkuppe beschränkt werden, damit die Fingerspitze lediglich mit dem Textilmaterial in Kontakt kommt. Abweichend von einem realen Griff spürt man bei dem aktuellen Modell die Konstruktion an der Fingerspitze. Weiterhin können Gleitlager in den Gelenken den Bewegungswiderstand der Konstruktion reduzieren.

Für eine präzisere Steuerung können die Montagepunkte der Servos verlagert oder an anderen Positionen weitere Aktoren hinzugefügt werden. Denkbare Montagemöglichkeiten

sind nachfolgend dargestellt (Abbildung 5.1). Zudem ist zu prüfen, ob mit kleinen Linearkraftmotoren oder Bremsen direkt einzelne Finger oder Gelenke angesteuert werden können. Bei einer größeren Zahl von Aktoren und Sensoren ist allerdings eine Abwägung erforderlich. Mehr Sensoren und Aktoren bedeuten einen größeren Realismusgrad, aber gleichzeitig auch eine Gewichts- und Kostensteigerung.



(a) Servomontage auf Daumen

(b) Servomontage auf Zeigefinger

Abbildung 5.1: Mögliche alternative Montagepunkte für Aktoren

Auf lange Sicht kann auch über den Einsatz alternativer und kleinerer Mikrocontroller nachgedacht werden. In einem finalen Modell könnte sogar die Entwicklung eigener Elektronik eine Rolle spielen, sodass nur die nötigen Anschlüsse vorhanden sind und die Baugröße minimiert wird.

Literatur

- [1] LeapMotion. *LeapMotion*. 15. Nov. 2016. URL: <https://www.leapmotion.com/> (besucht am 15. 11. 2016).
- [2] Grigore C. Burdea und Thomas H. Speeter. „Portable Dextrous Force Feedback Master for Robot Telemanipulation (P.D.M.F.F.)“ In: 1990.
- [3] Dipl.-Psych. Gunter Hannig. „Modellierung multi-modaler haptischer Wahrnehmung“. Diss. Universität der Bundeswehr Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik Institut für Arbeitswissenschaft, 10. Okt. 2012. (Besucht am 07. 03. 2017).
- [4] Patrick Weiß. „Robotic rehabilitation after stroke. A modular system for training distal upper limb functions“. Diss. Universität Lübeck, 2015.
- [5] Latifa Turki und Philippe Coiffet. „Dextrous Telemanipulation with Force Feedback in Virtual Reality“. In: 1995.
- [6] K. B. Shimoga. „A survey of perceptual feedback issues in dexterous telemanipulation. I. Finger force feedback“. In: *Virtual Reality Annual International Symposium, 1993., 1993 IEEE*. Sep. 1993, S. 263–270. DOI: [10.1109/VRAIS.1993.380770](https://doi.org/10.1109/VRAIS.1993.380770).
- [7] Festo. *ExoHand*. 2012. URL: <https://www.festo.com> (besucht am 15. 11. 2016).
- [8] Xiaochi Gu u. a. „Dexmo“. In: *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '16*. Association for Computing Machinery (ACM), 2016. DOI: [10.1145/2858036.2858487](https://doi.org/10.1145/2858036.2858487). URL: <https://doi.org/10.1145/2858036.2858487>.
- [9] Cyberglove Systems. <http://www.cyberglovesystems.com/cybergrasp/>. 21. Nov. 2016. URL: <http://www.cyberglovesystems.com/cybergrasp/> (besucht am 21. 11. 2016).
- [10] Matthew Ponsford und Nick Glass. *The night I invented 3D-printing*. Hrsg. von CNN. 2014. URL: <http://edition.cnn.com/2014/02/13/tech/innovation/the-night-i-invented-3d-printing-chuck-hall/>.
- [11] Andreas Gebhardt. *Additive Fertigungsverfahren*. Hanser Fachbuchverlag, 11. Okt. 2016. 711 S. ISBN: 3446444017.
- [12] G.A.O. Adam. „Systematische Erarbeitung von Konstruktionsregeln für die additiven Fertigungsverfahren Lasersintern, Laserschmelzen und Fused Deposition Modeling“. Diss. 2015. ISBN: 978-3-8440-3474-5. URL: <https://books.google.de/books?id=4jVkrGEACAAJ>.

-
- [13] Stratasys. *uPrint SE and uPrint SE Plus*. 2013. URL: <https://stratasys.box.com/shared/static/2v878107zb2rhsde1ukoe0ww9cv9qhh4.pdf> (besucht am 24.01.2017).
- [14] Stratasys. *Fortus 380mc 3D-Produktionssystem Bedienerhandbuch*. Nov. 2015. (Besucht am 30.01.2017).
- [15] Formlabs. *Form 1+, Form 2 Technische Daten*. 2016. (Besucht am 01.03.2017).
- [16] Stratasys. *ABSplus-P430*. 2015. URL: http://usglobalimages.stratasys.com/Main/Files/Material_Spec_Sheets/MSS_FDM_ABSplusP430.pdf (besucht am 24.01.2017).
- [17] Stratasys. *FDM Nylon 12*. 2015. URL: http://usglobalimages.stratasys.com/Main/Files/Material_Spec_Sheets/MSS_FDM_Nylon12.pdf (besucht am 24.01.2017).
- [18] Stratasys. *PC (polycarbonate)*. 2015. URL: http://usglobalimages.stratasys.com/Main/Files/Material_Spec_Sheets/MSS_FDM_PC.pdf (besucht am 24.01.2017).
- [19] Formlabs. *Materials Data Sheet - Photopolymer Resin for Form 1+ and Form 2*. 27. Jan. 2017. (Besucht am 04.02.2017).
- [20] Formlabs. *PreForm Software 2.10.3*. 31. Jan. 2017. URL: <https://formlabs.com/de/tools/preform/> (besucht am 09.02.2017).
- [21] Dr. Gregor Langer u. a. „Permanentmagnetbremse im Miniaturformat“. In: *SPS-MAGAZIN SPSS 2014* (19. Nov. 2014). URL: http://www.sps-magazin.de/?inc=artikel/article_show&nr=90287 (besucht am 07.02.2017).
- [22] Jamshed Iqbal, Nikos G. Tsagarakis und Darwin G. Caldwell. „Design of a Wearable Direct-driven Optimized Hand Exoskeleton Device“. In: *ACHI 2011: The Fourth International Conference on Advances in Computer-Human Interactions*. 2011.
- [23] ARDUINO. *Arduino-Mini-V5*. Version 5. 26. März 2012. (Besucht am 22.03.2017).
- [24] ARDUINO. *Arduino Nano-Rev3.2*. Hrsg. von E.Vita. Version 3.2. 30. Dez. 2014. URL: <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardNano> (besucht am 22.03.2017).
- [25] Futoshi Kobayashi u. a. „Two-Fingered Haptic Device for Robot Hand Teleoperation“. In: *Journal of Robotics* 2011 (2011), S. 1–8. DOI: [10.1155/2011/419465](https://doi.org/10.1155/2011/419465). URL: <http://dx.doi.org/10.1155/2011/419465>.
- [26] T. M. W. Burton u. a. „Development of a parametric kinematic model of the human hand and a novel robotic exoskeleton“. In: *2011 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics*. Institute of Electrical und Electronics Engineers (IEEE), Juni 2011. DOI: [10.1109/icorr.2011.5975344](https://doi.org/10.1109/icorr.2011.5975344). URL: <http://dx.doi.org/10.1109/ICORR.2011.5975344>.

- [27] Patrick Weiss u. a. „Towards a parameterizable exoskeleton for training of hand function after stroke“. In: *2013 IEEE 13th International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR)*. Institute of Electrical und Electronics Engineers (IEEE), Juni 2013. DOI: [10.1109/icorr.2013.6650505](https://doi.org/10.1109/icorr.2013.6650505). URL: <http://dx.doi.org/10.1109/ICORR.2013.6650505>.
- [28] C.S. Tzafestas. „Whole-hand kinesthetic feedback and haptic perception in dextrous virtual manipulation“. In: *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans* 33.1 (Jan. 2003), S. 100–113. DOI: [10.1109/tsmca.2003.812600](https://doi.org/10.1109/tsmca.2003.812600). URL: <http://dx.doi.org/10.1109/TSMCA.2003.812600>.
- [29] C. Tzafestas und P. Coiffet. „Computing optimal forces for generalised kinesthetic feedback on the human hand during virtual grasping and manipulation“. In: *Proceedings of International Conference on Robotics and Automation*. Institute of Electrical und Electronics Engineers (IEEE), 1997. DOI: [10.1109/robot.1997.620025](https://doi.org/10.1109/robot.1997.620025). URL: <http://dx.doi.org/10.1109/ROBOT.1997.620025>.
- [30] Dextarobotics. *Dexmo*. 15. Nov. 2016. URL: www.dextarobotics.com (besucht am 15. 11. 2016).
- [31] William R. Sherman und Alan B. Craig. *Understanding Virtual Reality*. Elsevier Science, 10. Sep. 2002. 608 S.
- [32] Ben Schwan. „Eine Software für alle Felle“. In: *Technology Review* (2016). URL: <https://www.heise.de/tr/artikel/Eine-Software-fuer-alle-Felle-3253174.html> (besucht am 30. 01. 2017).
- [33] Jifei Ou u. a. „Cillia“. In: *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '16*. Association for Computing Machinery (ACM), 7. Mai 2016. DOI: [10.1145/2858036.2858257](https://doi.org/10.1145/2858036.2858257). URL: <https://doi.org/10.1145/2858036.2858257>.
- [34] Zhao Qin u. a. „The mechanics and design of a lightweight three-dimensional graphene assembly“. In: *Science Advances* 3.1 (Jan. 2017), e1601536. DOI: [10.1126/sciadv.1601536](https://doi.org/10.1126/sciadv.1601536). URL: <https://doi.org/10.1126/sciadv.1601536>.
- [35] PTC. *Creo Software*. 30. Jan. 2017.
- [36] Dassault Systems. *CATIA V5 R19*. 30. Jan. 2017.
- [37] Siemens. *Siemens NX*. 30. Jan. 2017. URL: https://www.plm.automation.siemens.com/de_de/products/nx/index.shtml.
- [38] Autodesk. *Autodesk Fusion 360*. 30. Jan. 2017. URL: <http://www.autodesk.de/products/fusion-360/overview><http://www.autodesk.de/products/fusion-360/overview>.
- [39] Iigus. *Der Allround-Klassiker – iglidur® G*. 2016. URL: http://www.igus.de/contentData/Products/Downloads/iglidur_G_DEde.pdf (besucht am 16. 02. 2017).

- [40] Icus. *igubal®-Clips-Gelenklager* — *Lieferprogramm*. 2016. (Besucht am 16.02.2017).

Anhang

Erstellte Hilfsdateien und Zeichnungen zur Verdeutlichung des Aufbaus sind hier angefügt.

6.1 Tabellen der Konstruktionsparameter

Tabelle 6.1: Tabelle der zu messenden Parameter

Parametername	Bedeutung	Wert in mm
HG_H	Handgelenkshöhe	43
HG_B	Handgelenksbreite	56
HG_MCP	Daumen: Handgelenk-MCP	45
MCP_DIP	Daumen: MCP-DIP	30
DIP_TIP	Daumen: DIP-TIP	22
HG_MCP2	Zeigefinger: Handgelenk-MCP	87
MCP2_PIP2	Zeigefinger: MCP-PIP	32
PIP2_DIP2	Zeigefinger: PIP-DIP	25
DIP2_TIP2	Zeigefinger: DIP-TIP	24
DIP_B	Daumen: DIP-Breite	20
DIP2_B	Zeigefinger: DIP-Breite	15
PIP2_B	Zeigefinger: PIP-Breite	18
Zapfendicke	—	3
Zapfenhöhe	—	2,5
Lagerfreiraum	—	0,5

Tabelle 6.2: Tabelle der Aktorhalterparameter

Parametername	Bedeutung	Wert in mm
Servoplatinendicke	—	1
Servolänge	—	34
Servoplatinbreite	—	20
Aktorhalterbreite	—	38
Aktorhalterlänge	—	50
Akkuhöhe	—	9
Akkulänge	—	30
Akkubreite	—	25
μ C-Sockellänge	—	31,5
μ C-Sockelbreite	—	18

6.2 Mögliche Konstruktionslösungen

In der nachfolgenden Tabelle sind mögliche Konstruktionslösungen mit Bewertungen aufgeführt.

Tabelle 6.3: Bewertung der Konstruktionslösungen

Teilungsbereich	Idee	Erläuterung	Vorteile	Nachteile	Vorbewertung	Anmerkung	Metrix 2	Stabilität 5	Erfahrung 3	Punkte	Konkrete Produkte	Produktanmerkungen
Allgemeiner Konstruktionsaufbau	Ring an Handwandschuh	Kontaktpunkte werden mit Ringen am Handschuh angebracht	perliche Konstruktion passt sich flexibel an unterschiedliche Hände an	Stabilität durch Flexibilität ggf. beinrechtlichge Aufwendige Nachbearbeitung	6	3	8	51				
	Finger komplett umfasend	Finger komplett umfasend als Exoskelett den Kontakt	Möglichkeit für Aktorik	Aufwendige Konstruktion	5	10	4	72				
	Konstruktion überlagert Finger	Die konstruktive Mechanik liegt vollständig über dem Finger	Konstruktion freitragend durch Kontaktpunkte	Konstruktion muss verträglich ausgelegt werden	++	8	6	74				
	auf flexible Länge	Montierung über gedruckten Material	Körner als Kraftträger verwendet werden können weichen Montagemöglichkeit ein betont werden	Größe muss individuell angepasst werden	+							
	Gummiringe	Gummiringe dienen als Federungsanteile	flexibel	Kraftverteilung wird eingeregelt	+	7	10	3	73			
	Klebstoff	Klebstoffe werden für Kontakt und Montage genutzt	individuell anpassbar	nur für einseitig verwendbar	+	8	8	5	71			
	nur Text (bei Handwandschuhkonstruktion)	nur Text (bei Handwandschuhkonstruktion)	Kontaktfläche mit unterschiedlichen Abstände	keine feste Verbindung zur Hand zusätzliche Fixierung nötig um Rutschen zu vermeiden	+	8	8	8	80			
	Mit freiraumgedruckt	Mit freiraumgedruckt	Leichtgewicht	Abhängigkeit von Aktorschwerk Leichtgewicht	+	6	6	10	72			
	Minidrucklager	Lager mit min. dr-1, Dr-3	lange Lebensdauer hochelastisch	Leichtgewicht hochelastisch	+	9	6	8	72			
	Lagerrollen	sehr klein	gedruckt hochelastisch	sehr leicht hochelastisch	+	5	9	6	73			
Lagerung	Kunststofflager	sehr klein	gedruckt hochelastisch	Einzelstück aufwendig → eher einsetzen	+	8	9	8	85		z.B. von Seiberger aus ab 3mm Elastizität	Kunststofflager Kunststofflager Kunststofflager Kunststofflager Kunststofflager Kunststofflager Kunststofflager Kunststofflager Kunststofflager Kunststofflager
	Kunststofflager + Magnettreiben	sehr klein	gedruckt hochelastisch	nicht magnetisierbar	++	9	9	8	87			
	Kontaktpunkte an Fingerringen	Bei Zugkraft Kontaktpunkte an diesen Fingerringen	flexibel keine Scherkräfte große Kontaktfläche daher keine probleme	Benötigt für größere Führungskonstruktion	+	8	5	6	59			
	Kontaktpunkte an Fingerringen	Einzelne Fingerringe kontaktieren	keine zusätzlichen Teile	Benötigt für größere Führungskonstruktion	+	8	10	7	87			
	aus der Länge der Gelenke	Länglicher der Gelenke und Anschläge bei Gelenkbewegungen	keine zusätzlichen Teile stabilisieren zusätzlich Gelenkbewegung	zu kleinen ab Stabilität des Kontaktpunktes ausreichend	++	9	9	7	84			
	Lagerbewegung einzeichnen	Lagerbewegung einzeichnen um nachher über Vorrichtung schränkt Bewegungsraum ein	perliche Konstruktion, sowie Festlegung des Bewegungsraumes	Verträglichkeit Überschneidung auf ein	+	7	7	7	70			
	Überschneidung	Überschneidung des Daumens wird linear geführt	perliche Konstruktion stabilisieren	Abhängigkeit des Linearführers Verträglichkeit	+	9	4	9	65			
	Kugelgelenk	Kugelgelenk	Allein beweglich in einem Gelenk	Gefahr des Auslagerns Bauraum noch groß	+	6	9	8	81			
	Teufel	Teufel	Verbindung zu restlicher Konstruktion durch Teufel	3D-Druck verformen nicht möglich Kontaktfläche Möglichkeit der Stabilisierung	+	5	7	9	72			
	2-Richtungsgelenk	2-Richtungsgelenk	gedruckt stabil	perliche Konstruktion stabil	+	6	8	6	79			
Anbindung des Daumens	Anbindung des Daumens	gedruckt stabil	perliche Konstruktion stabil	++	8	8	7	77			per Produkt kann erleichtert angepasst werden	

6.3 Ansteuerung der Servos

Listing 6.1: Ansteuerung der Servos

```
1  #include <Servo.h>      // Low level servo library
2  Servo _servo;          // servo

4  void setup()
5  {
6  Serial.begin(115200);
7  Serial.println("start");
8  _servo.attach(3);
9  }

11 void loop()
12 {

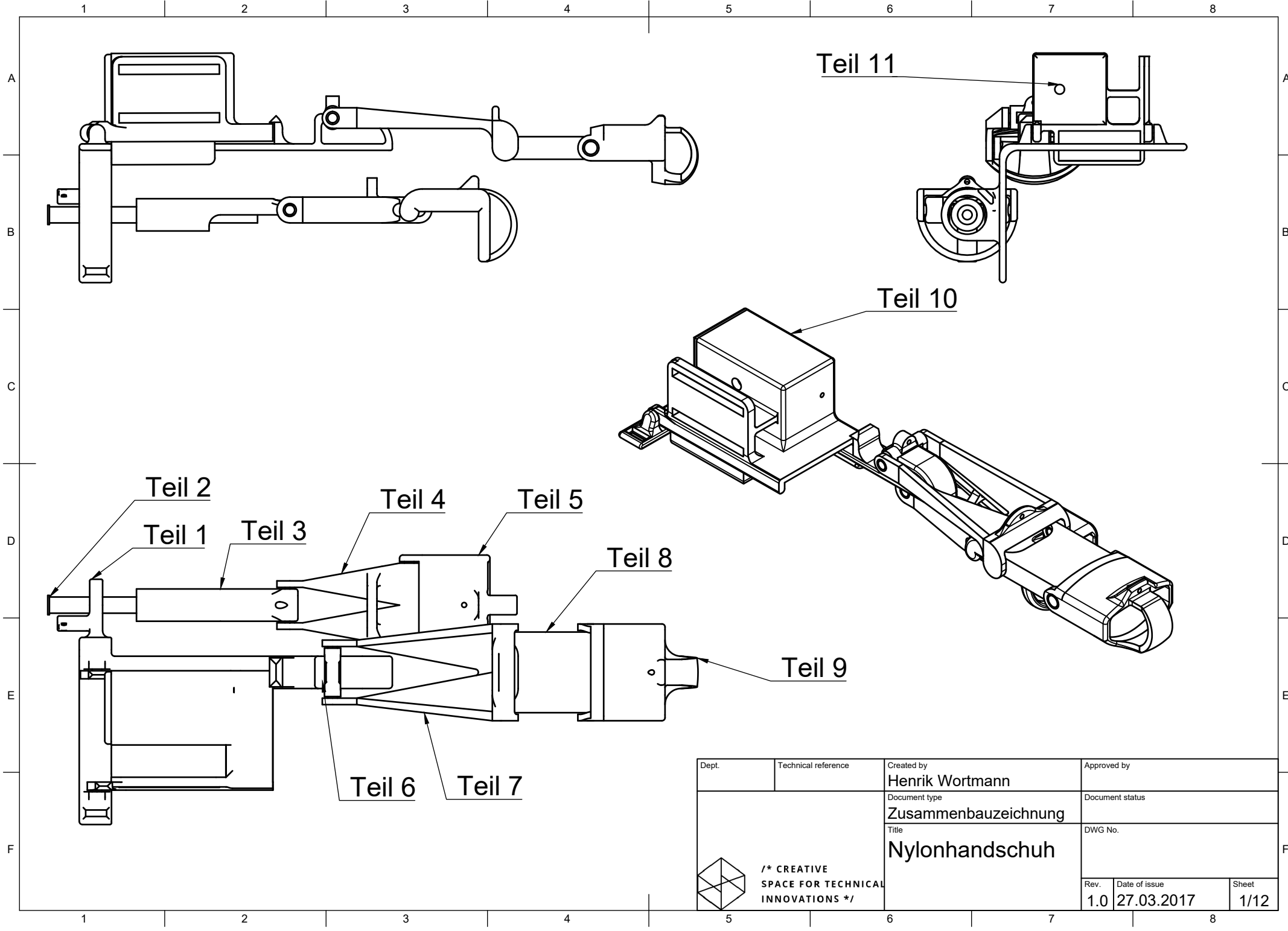
14  delay(500);
15  Serial.println("Links");
16  _servo.write(60);      //Servo in Startposition

18  delay(500);
19  Serial.println("Mitte");
20  _servo.write(105);     //Servo in Mittelposition

22  delay(500);
23  Serial.println("Rechts");
24  _servo.write(150);     //Servo in Endposition
25  }
```


6.4 Konstruktionszeichnungen

Zeichnungen der Konstruktion sind auf den folgenden Seiten angehängt.



Teil 11

Teil 10

Teil 2

Teil 1

Teil 3

Teil 4


Teil 5

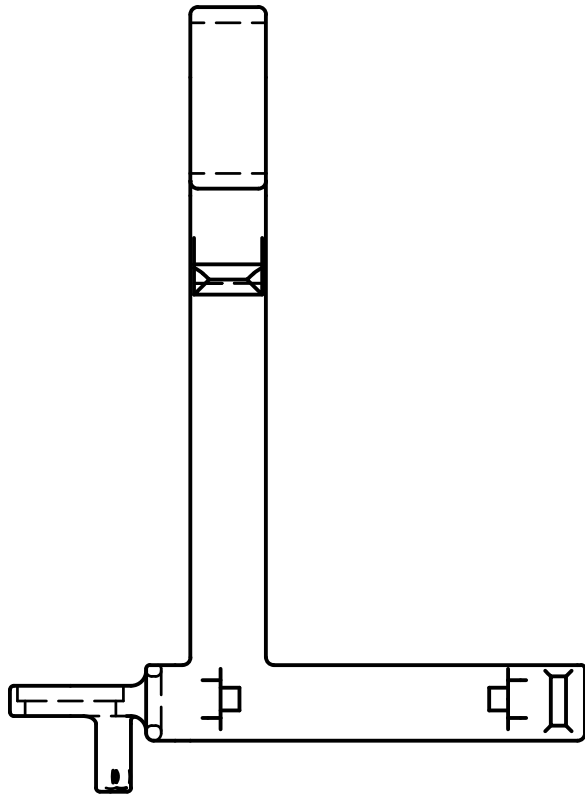
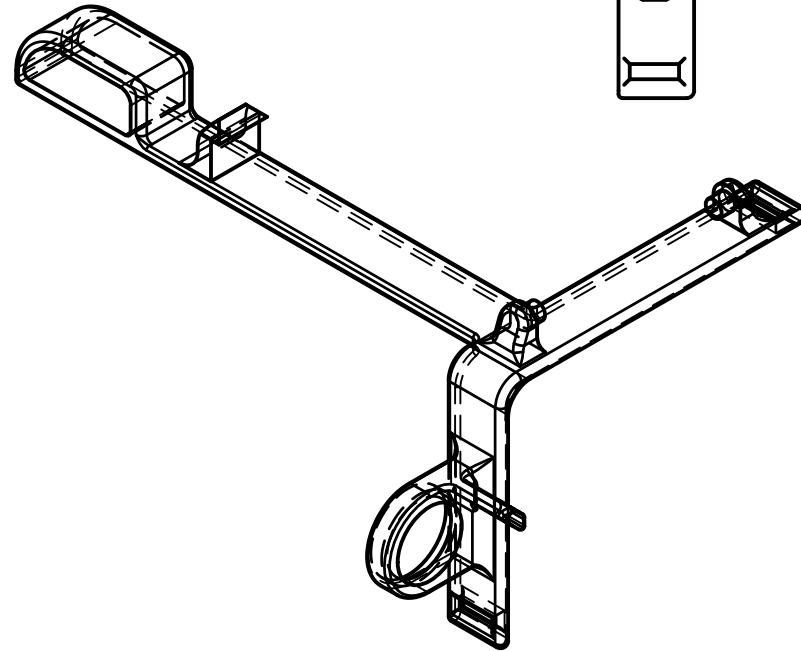
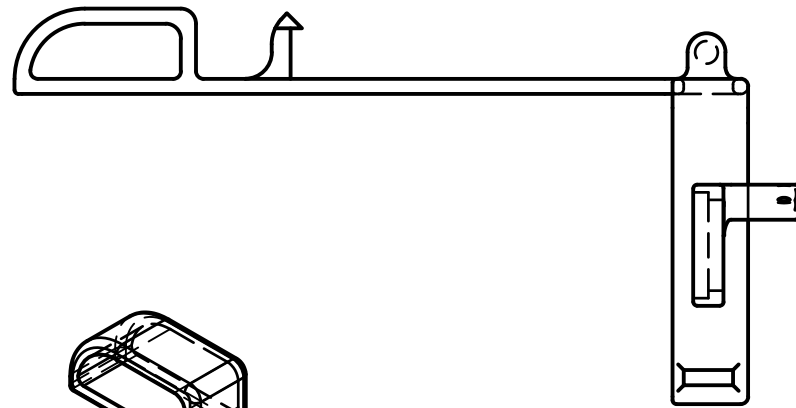
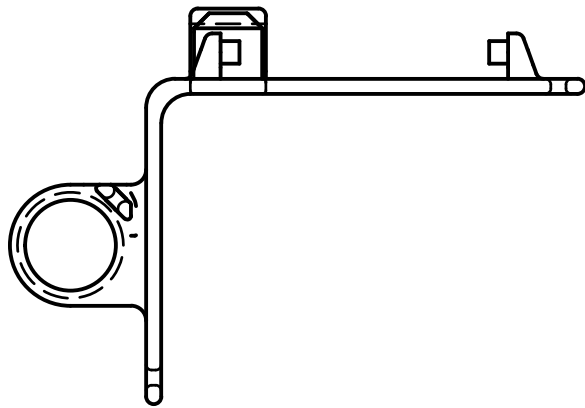
Teil 8

Teil 9

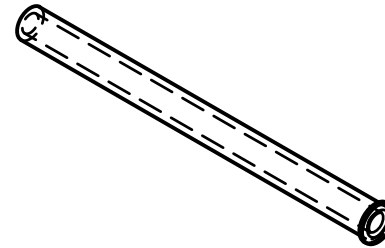
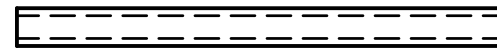
Teil 6

Teil 7

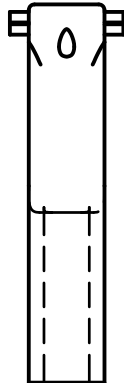
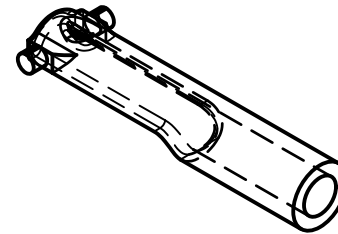
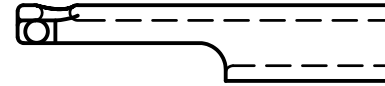
Dept.	Technical reference	Created by Henrik Wortmann	Approved by
 /* CREATIVE SPACE FOR TECHNICAL INNOVATIONS */		Document type Zusammenbauzeichnung	Document status
		Title Nylonhandschuh	DWG No.
Rev. 1.0	Date of issue 27.03.2017	Sheet 1/12	

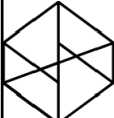


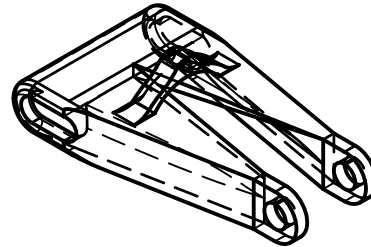
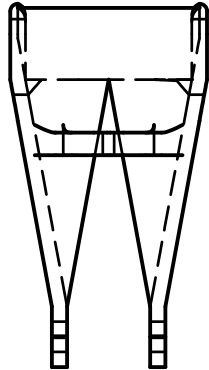
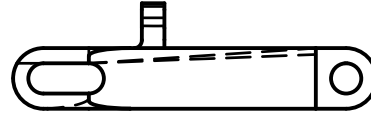
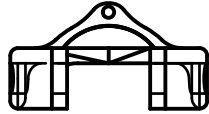
Dept.	Technical reference	Created by Henrik Wortmann	Approved by		
		Document type Einzelteilzeichnung	Document status		
		Title Nylonhandschuh Basis Teil 1	DWG No.		
 /* CREATIVE SPACE FOR TECHNICAL INNOVATIONS */		Rev. 1.0	Date of issue 27.03.2017	Sheet 2/12	



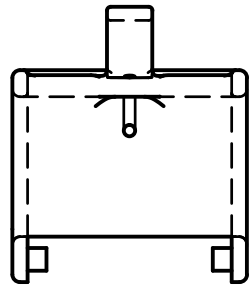
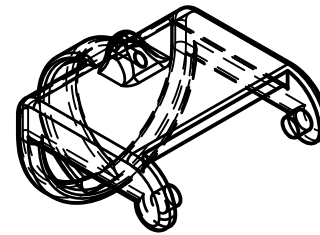
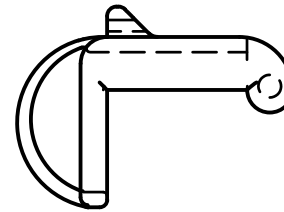
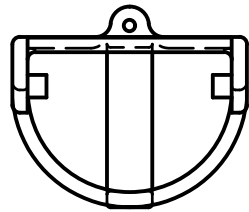
Dept.	Technical reference	Created by Henrik Wortmann	Approved by	
 /* CREATIVE SPACE FOR TECHNICAL INNOVATIONS */		Document type Einzelteilzeichnung	Document status	
		Title Nylonhandschuh Daumen MCP Teil 2	DWG No.	
		Rev. 1.0	Date of issue 27.03.2017	Sheet 3/12

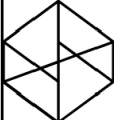


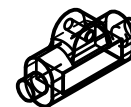
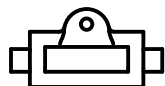
Dept.	Technical reference	Created by Henrik Wortmann	Approved by		
 /* CREATIVE SPACE FOR TECHNICAL INNOVATIONS */		Document type Einzelteilzeichnung	Document status		
		Title Nylonhandschuh Daumen MCP Teil 3	DWG No.		
		Rev. 1.0	Date of issue 27.03.2017	Sheet 4/12	

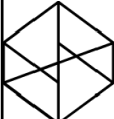


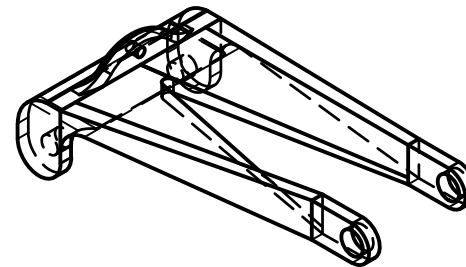
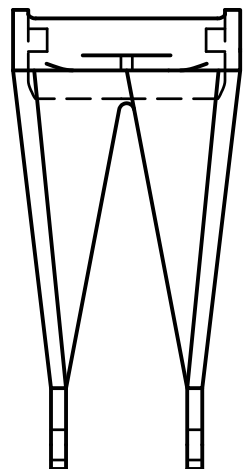
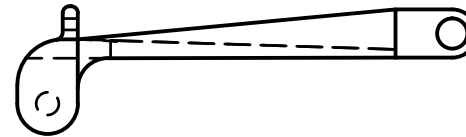
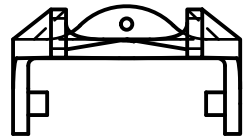
Dept.	Technical reference	Created by Henrik Wortmann	Approved by	
 /* CREATIVE SPACE FOR TECHNICAL INNOVATIONS */		Document type Einzelteilzeichnung	Document status	
		Title Nylonhandschuh MCP_DIP Teil 4	DWG No.	
		Rev. 1.0	Date of issue 27.03.2017	Sheet 5/12

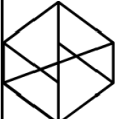


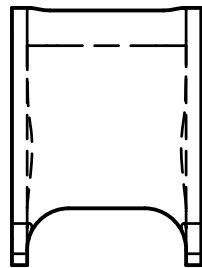
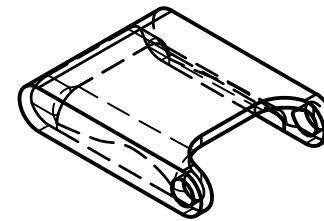
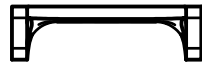
Dept.	Technical reference	Created by Henrik Wortmann	Approved by	
 /* CREATIVE SPACE FOR TECHNICAL INNOVATIONS */		Document type Einzelteilzeichnung	Document status	
		Title Nylonhandschuh Daumen TIP Teil 5	DWG No.	
		Rev. 1.0	Date of issue 27.03.2017	Sheet 6/12

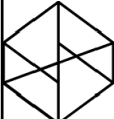


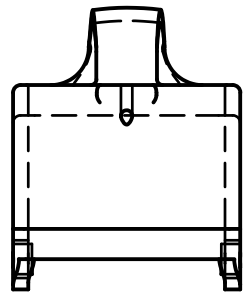
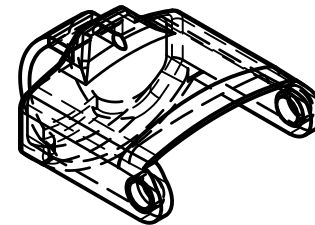
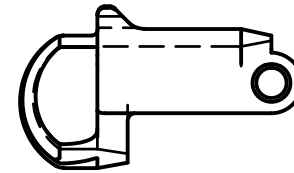
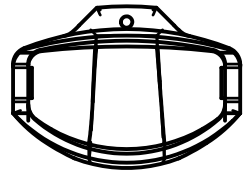
Dept.	Technical reference	Created by Henrik Wortmann	Approved by		
 /* CREATIVE SPACE FOR TECHNICAL INNOVATIONS */		Document type Einzelteilzeichnung	Document status		
		Title Nylonhandschuh MCP2 Teil 6	DWG No.		
		Rev. 1.0	Date of issue 27.03.2017	Sheet 7/12	

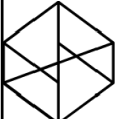


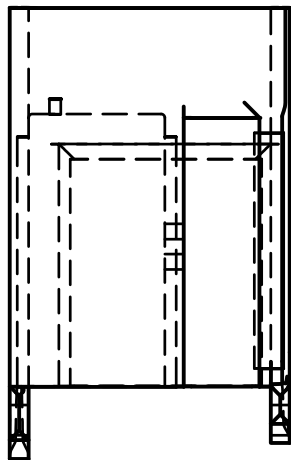
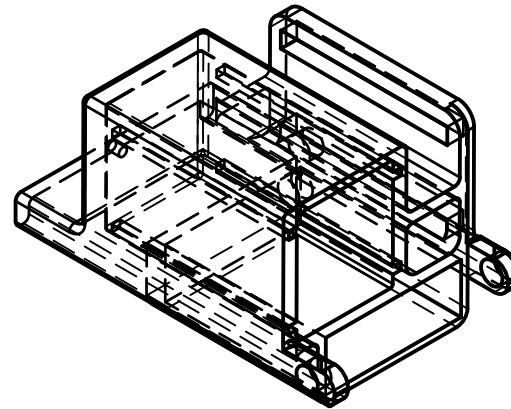
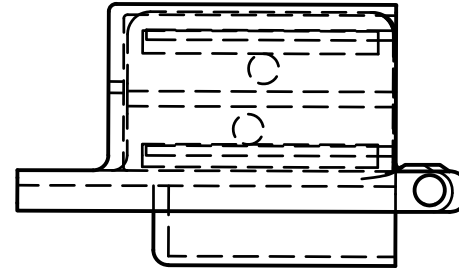
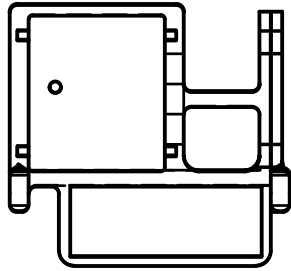
Dept.	Technical reference	Created by Henrik Wortmann	Approved by	
 /* CREATIVE SPACE FOR TECHNICAL INNOVATIONS */		Document type Einzelteilzeichnung	Document status	
		Title Nylonhandschuh MCP2_PIP2 Teil 7	DWG No.	
		Rev. 1.0	Date of issue 27.03.2017	Sheet 8/12

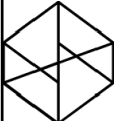


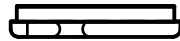
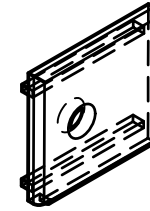
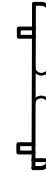
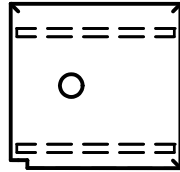
Dept.	Technical reference	Created by Henrik Wortmann	Approved by	
 /* CREATIVE SPACE FOR TECHNICAL INNOVATIONS */		Document type Einzelteilzeichnung	Document status	
		Title Nylonhandschuh PIP2_DIP2 Teil 8	DWG No.	
		Rev. 1.0	Date of issue 27.03.2017	Sheet 9/12



Dept.	Technical reference	Created by Henrik Wortmann	Approved by		
 /* CREATIVE SPACE FOR TECHNICAL INNOVATIONS */		Document type Einzelteilzeichnung	Document status		
		Title Nylonhandschuh DIP2_TIP2 Teil 9	DWG No.		
		Rev. 1.0	Date of issue 27.03.2017	Sheet 10/12	



Dept.	Technical reference	Created by Henrik Wortmann	Approved by	
 /* CREATIVE SPACE FOR TECHNICAL INNOVATIONS */		Document type Einzelteilzeichnung	Document status	
		Title Nylonhandschuh Aktorhalter Teil 10	DWG No.	
		Rev. 1.0	Date of issue 27.03.2017	Sheet 11/12



Dept.	Technical reference	Created by Henrik Wortmann	Approved by		
 /* CREATIVE SPACE FOR TECHNICAL INNOVATIONS */		Document type Einzelteilzeichnung	Document status		
		Title Nylonhandschuh Servodeckel Teil 11	DWG No.		
		Rev. 1.0	Date of issue 27.03.2017	Sheet 12/12	

6.5 Digitaler Anhang

Im digitalen Anhang sind die Konstruktionszeichnungen in Originalgröße angehängt. Zusätzlich sind die Dateien der Konstruktion und der Ansteuerungscode für die Servos beigefügt.

Versicherung über die Selbstständigkeit

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit im Sinne der Prüfungsordnung nach §16(5) APSO-TI-BM ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen habe ich unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

Hamburg, 8. April 2017

Ort, Datum

Unterschrift